

ISSN 2189-7557

# 年次研究報告

ANNUAL REPORT OF DIVISION OF PHYSICS  
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2014 (平成26) 年度

筑波大学数理物質系物理学域

## 目 次

### — 研究活動 —

I	素粒子理論グループ	1
II	素粒子実験グループ	30
III	宇宙物理理論グループ	62
IV	宇宙観測グループ	84
V	原子核理論グループ	96
VI	原子核実験グループ	114
VII	物性理論グループ	
VII-1	非平衡統計物理グループ	147
VII-2	量子物性理論グループ	149
VII-3	ナノ量子物性グループ	157
VII-4	ナノ構造物性グループ	161
VII-5	量子輸送研究グループ	170
VII-6	表面界面物性グループ	175
VIII	生命物理グループ	181
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	191
IX-2	ナノフォトニクスグループ	196
IX-3	強相関物性グループ	202
IX-4	光ナノ物性グループ	211
IX-5	低温物性グループ	217
IX-6	構造科学グループ	225
X	プラズマ研究グループ	229

### — 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	263
	【1】 物理教育	
	(1) 学類教育	
	(2) 大学院教育	
	【2】 体験学習	
	【3】 カリキュラム関係	

### — 補足資料 —

	大学院資料	268
	物理学域資料	277

## I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、佐藤 勇二、毛利 健司

客員教授 青木 慎也（京都大学基礎物理学研究所）

研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介

大学院生（9名）

### 【人事異動】

山崎剛博士が数理物質系准教授として着任した（2014年4月1日）。

大野浩史博士が計算科学研究センター国際テニュアトラック助教として着任した（2014年4月1日）。

伊敷吾郎博士が数理物質系テニュアトラック助教として着任した（2014年11月1日）。

金谷和至教授が数理物質系長を退任し、素粒子論研究室の教授に復帰する（2015年4月1日）。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の2つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。格子場の理論グループの研究者の大半が参加している主要プロジェクトとして、HPCI戦略プログラム分野5（後述）における研究開発課題1「格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定」がある。これは、PACS-CS Collaboration（2011年9月末のPACS-CS機シャットダウンに伴って解散）が取り組んで来た物理点での $N_f = 2+1$  QCDシミュレーションやup-downクォーク質量差および電磁相互作用を取り入れた $N_f = 1+1+1$  QCD+QEDシミュレーションを発展的に引き継いだものであり、HAL QCD Collaborationが推進している核子間ポテンシャルやハドロン間相互作用の計算も取り入れている。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、「京」コンピュータを中核とした革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築を主導するために、「High

Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム」が文部科学省により推進されている。その HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、京都大学基礎物理学研究所青木慎也教授（本学客員教授）が統括責任者を務める分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2011 年度から本格的に活動が始まり、2012 年秋から共用が開始された「京」コンピュータを中心に、その研究活動が活発化している。詳しい活動内容は、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>を参照していただきたい。また、分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木教授が拠点長を務める「計算基礎科学連携拠点」であるが、その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp/>に詳しい。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ・重力対応という 3 つの関連するテーマを中心として研究を進めている。11 月 1 日より、超弦理論に数値的手法を取り入れる研究を行っている伊敷氏が加わり、研究の幅が広がっている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅、行列模型における古典極限等、超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

## 【1】 格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克、谷口 裕介、浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介)

### (1) HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題

分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して 4 つの研究開発課題が設定されており、そのうちの 하나가「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」である。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、アイソスピン対称性の破れの効果を取り入れた計算や、低エネルギーのハドロン構造計算を意味する。他方、マルチスケール化とは QCD を用いて核子を複数作ることによって核子間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチであり、後者は藏増、山崎を中心としたグループによって推進されている（後述）。

#### 格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

平成 24 年度秋の「京」の共用開始以降、継続的に実行していたゲージ配位生成が終了した。DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法を用いて、 $96^4$  の格子サイズ、0.1 fm 程度の格子間隔を持つ、2+1 フレーバー ( $m_u = m_d \neq m_s$ ) QCD のゲージ配位を生成した。生成されたゲージ配位は 5 分子動力学時間毎に保存し、ネットワークを通じて筑波大学へ転送し、HA-PACS (計算ノード数 332、GPU 部ピーク演算性能 1.048Pflops、CPU 部ピー

ク演算性能 0.118Pflops) を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を行っている。図 1 はこれまで得られた物理点でのハドロン質量の計算結果を実験値と比較したものである。ここでは、クォーク質量 ( $m_u = m_d \neq m_s$ ) と格子間隔を決めるための 3 つの物理量として、 $\pi$  中間子質量 ( $m_\pi$ )、 $K$  中間子質量 ( $m_K$ )、 $\Omega$  バリオン質量 ( $m_\Omega$ ) を採用している。

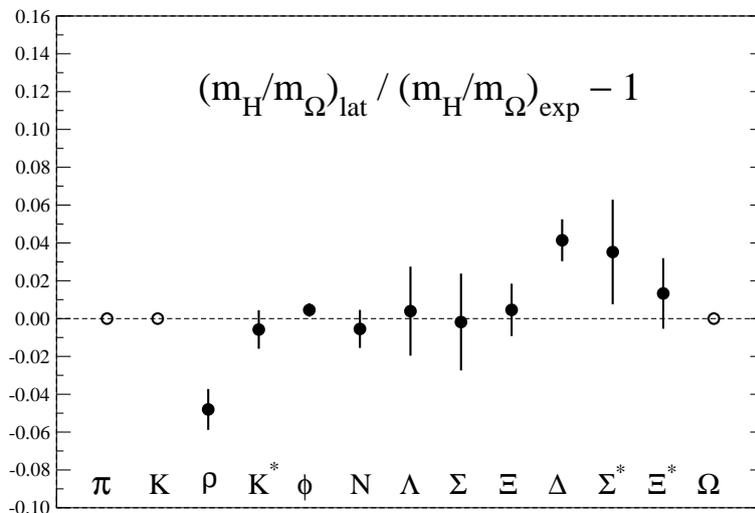


図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られたハドロン質量と実験値との比較。白抜きシンボルはクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

まだすべてのゲージ配位の解析が終了したわけではないが、安定粒子 (強い相互作用で崩壊しない) は実験値と誤差の範囲で一致しているのに対して、不安定粒子 (強い相互作用で崩壊する  $\rho$  や  $\Delta$  など) は、誤差の範囲を超えて実験値との有意なズレが見取れる。これは、現在採用しているハドロン質量の計算方法が不安定粒子に対しては有効でないことを表しており、これまで長い間期待されていたことであるが、今回初めて確認に成功した。ハドロン質量の計算と並行して、擬スカラー中間子の崩壊定数、カイラル摂動論における低エネルギー定数、核子のシグマ項、ハドロンの各種形状因子などの様々な物理量の計算を行っており、興味深い結果を得ている。

## (2) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、山崎は理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであったが、その後、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。ただし、この計算は 中間子質量 0.5 GeV 相当のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重い。そのため、物理点へ向けたクォーク質量依存性を調べるために、 中間子質量 0.3 GeV 相当のクォーク質

量での計算を遂行し、本年度結果を論文として発表した（論文1）。図2は ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーのクォーク質量依存性をプロットしたものである。中間子質量 $0.5\text{ GeV}$ での結果と $0.3\text{ GeV}$ での結果を比較すると、誤差の範囲を超えた顕著なクォーク質量依存性は認められない。現在、「京」で生成された $96^4$ 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点での軽原子核束縛エネルギー計算に取り組んでいる。

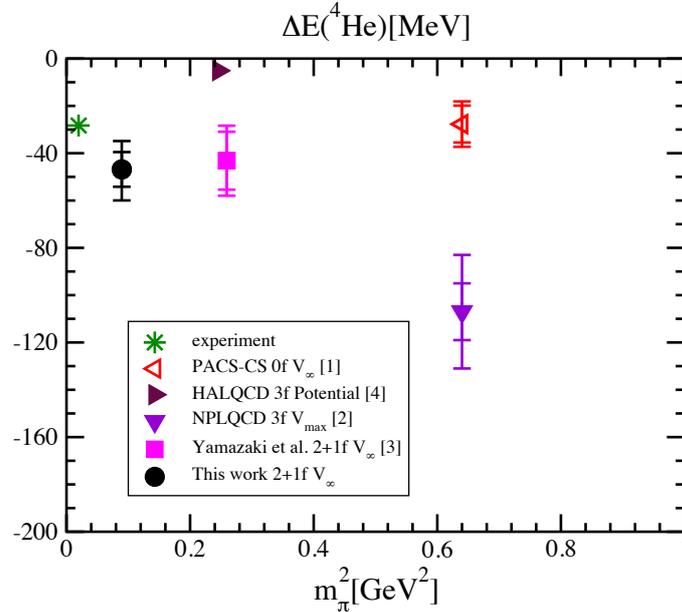


図 2:  ${}^4\text{He}$  原子核の束縛エネルギーの中間子質量依存性。白抜きシンボルはクエンチ近似の結果を表す。

### (3) $K$ 中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、かつ理論の検証において極めて重要な問題が残されている。 $K$  中間子崩壊での  $\Delta I = 1/2$  則の解明と、CP 非保存パラメータ ( $\epsilon'/\epsilon$ ) の理論からの予測である。これらの問題には、 $K$  中間子が二つの  $\pi$  中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を数値計算し、問題の研究を行った。 $\pi$  中間子質量  $m_\pi = 280\text{ MeV}$  のもとで、終状態の  $\pi$  中間子が運動量をもたない場合の計算を完成させた（文献3）。この計算により、 $\Delta I = 1/2$  則の兆候を見ることができた。CP 非保存パラメータ ( $\epsilon'/\epsilon$ ) に関しては統計誤差が非常に大きく、計算の改善が必要である。現在、二体  $\pi$  中間子の演算子の改良を検討中である。

また、この計算を運動量をもつ現実の場合に拡張し、より信頼性の高い振幅を求めることを考えた。具体的には、 $\pi$  中間子質量  $m_\pi = 250\text{ MeV}$  に下げ、格子の一辺を 1.5 倍にし、運動量を持たせる方法をとる。現在、この場合の崩壊振

幅の計算を行う為に、あらたにゲージ配位を生成している。また、本格計算に向けた試験計算を行っている。

#### (4) トポロジカルチャージの研究

滑川は、トポロジカルチャージの系統的比較研究を行い、トポロジカルチャージ定式化間における結果の同等性を定量的に明らかにした（論文 4）。トポロジカルチャージは量子色力学において真空を特徴付ける重要な物理量である。但し、その定式化は数種類存在しており、定式化間における結果の一致・不一致が不明であった。本研究により、単純なグルーオンの演算子及び平滑化を用いた場合、厳密な指数定理の結果との一致度が 70–80% に留まる事が分かった。また、演算子及び平滑化の改良により、一致度を 90% 強に引き上げ可能である事を示した。

#### (5) 有限温度・有限密度 QCD の研究 (WHOT-QCD Collaboration)

金谷らは、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田准教授、理化学研究所初田主任研究員らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。改良 Wilson クォークによる  $N_f = 2 + 1$  QCD の物理点近傍における状態方程式のための配位生成を継続して推進するとともに、状態方程式の評価に必要なベータ関数を QCD の多変数空間で精度よく決定する手法として、多重点再重み付け法によるベータ関数評価の試験を行った。

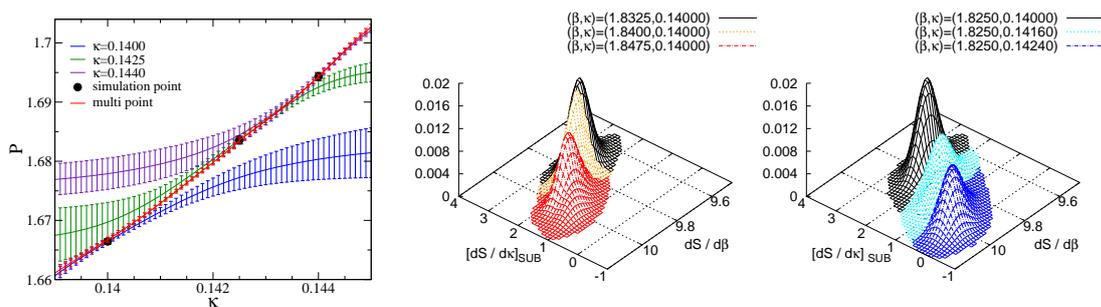


図 3:  $N_f = 2$  QCD における多重点再重み付け法の試験研究 (論文 5)。左図: 改良プラケット  $P = c_0 W^{1 \times 1} + 2c_1 W^{1 \times 2}$  の期待値の  $\beta = 1.825$  における  $\kappa$  依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。中央および右図: 再重み付け法で重要な、作用の  $\beta$  微分、 $\kappa$  微分のヒストグラムのパラメータ依存性。様々なシミュレーション点のデータを組み合わせることにより、重ねあわせ問題を回避してパラメータ空間の広い領域をカバーすることができる。

#### 多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

有限温度・有限密度 QCD の状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算するためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線 (Line of Constant Physics: LCP) 」(同一の物理系を様々な格子間隔で表現) と、LCP 上でパラメータの格子間隔依存性をあらわす「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲージ結合定数 ( $\beta$ ) と複数のクォーク質量 ( $\kappa$ ) や化学ポテンシャル ( $\mu$ ) を基本パラメータとして持つが、多次元のパラメータ空間で LCP やベータ関数を精度よく評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法 (multi-point reweighting 法)」を検討し、密度ゼロの  $N_f = 2$  QCD の場合に試験研究を行った (論文 5)。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法 (reweighting 法) がよく使われるが、有限温度・有限密度 QCD の研究で要求されるような、パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図 3 左に、改良プラケット  $P$  の  $\kappa$  依存性を示す。黒丸は 3 つのシミュレーション点における観測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点のデータを使って再重み付け法を使って計算した  $P$  の  $\kappa$  依存性の予言をあらわす。パラメータを大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低く、このまま LCP やベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータの大きな変化に対応できない事による (「重ねあわせ問題」)。

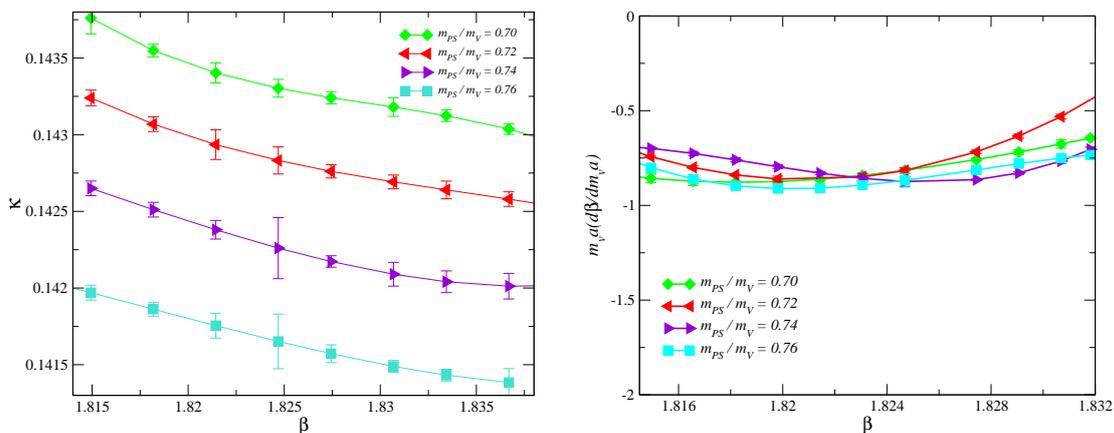


図 4: 多重点再重み付け法による、 $N_f = 2$  QCD の等物理線 (左図) と、ゲージ結合パラメータに関するベータ関数 (右図) (論文 5)。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュレーションデータを統合して再重み付けする (方法の詳細は論文 5 を参照)。図 3 左の赤線で、3 つのシミュレーション点のヒストグラムを合わせて多重点再重み付け法により計算した結果を示す。観測結果 (黒丸) をスムーズに繋ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精度の高い結果が得られた。

図 3 中央と右に、再重み付け法に必要なヒストグラムの  $\beta$  および  $\kappa$  依存性を示

す。 $\beta$  および  $\kappa$  の様々なシミュレーション点のデータを組み合わせることにより、LCP とベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域で精度の高い結果が得られることがわかる。それに基づいて計算した  $N_f = 2$  QCD の LCP とベータ関数の結果の一部を、図 4 に示す。いずれも十分な精度で評価することが出来た。

この手法の  $N_f = 2 + 1$  QCD や有限密度 QCD への応用を計画している。

#### (6) 有限温度・有限密度 QCD の研究 (BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration)

大野は、国際テニュアトラック助教として米国 Brookhaven National Laboratory (BNL) に長期滞在し、Frithjof Karsch 教授を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加して有限温度・有限密度 QCD の共同研究を行っている。

#### 格子 QCD によるストレンジネス及びチャームの揺らぎとそれらの間の相関の研究

閉じ込め・非閉じ込め相転移の前後では、系の自由度がハドロンからクォークに変化する。保存電荷の揺らぎやそれらの間の相関は、この自由度の変化に敏感であり、相転移の性質を詳細に調べるのに有用である。

大野は、BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration において、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered 作用を用いた格子 QCD シミュレーションにより、ストレンジやチャーム等、様々な保存電荷の揺らぎのキュムラントを計算する共同研究を行った (論文 6, 7)。そして、得られた結果を、相互作用の無い様々なハドロンからの寄与の重ね合わせに基づく、hadron resonance gas (HRG) モデルで計算されたものと比較した。図 5 に示す通り、実験的に見つかったハドロンを用いるだけでは、HRG モデルの結果は我々の結果を記述できなかった。一方で、ある種のクォークモデルにより予言される、未発見のハドロンまで含めた HRG モデルは、カイラルクロスオーバー温度以下において、我々の結果をよく再現した。このことから、カイラルクロスオーバー温度近傍で、ストレンジハドロンやチャームハドロンは消失していることが示唆された。加えて、実験的に見つからないハドロンの存在も示唆された。

#### 有限温度格子 QCD によるチャーモニウム・ボトモニウム相関関数の研究

チャームやボトムといった、重いクォークとその反クォークの束縛状態であるクォーコニウムは、RHIC や LHC での相対論的重イオン衝突実験におけるクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 生成を確かめるプローブのひとつである。従って、クォーコニウムの高温媒質中での振る舞いを理論的に調べることは、QGP の性質を理解し、実験結果を説明する上で重要である。また、近年では、クォーク・グルオン・プラズマの流体力学的性質に関する研究も盛んに行われており、重いクォークの輸送等についても理論的理解が必要となっている。

これらのことを第一原理から調べるため、本研究では有限温度における格子 QCD による数値シミュレーションを用いて、クォーコニウムの相関関数を計算し、その温度依存性を調べた。その際、相関関数からより多くの情報を引き出せるよう、格子サイズとして  $96^3 \times 24$  から  $192^3 \times 96$  と非常に大きなものを

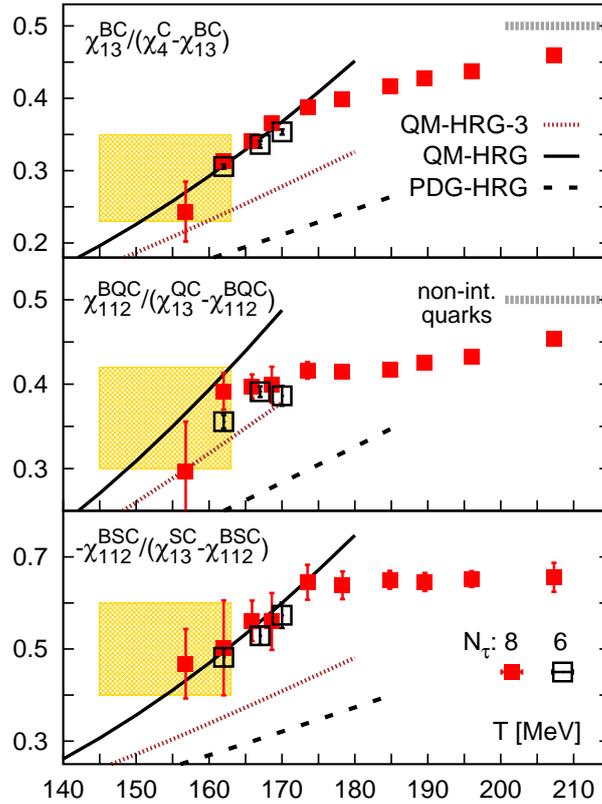


図 5: ストレンジネス・チャーム等の揺らぎの様々なキュムラントの比。PDG-HRG、QM-HRG 及び QM-HRG-3 はそれぞれ、実験的に見つかったハドロンを用いた HRG モデルの結果、ある種のクォークモデルで予言されるハドロンまで含めた HRG モデルの結果及び、同じクォークモデルが予言する 3GeV 以下の質量を持つハドロンを含めた HRG モデルの結果。

用いた。また、計算コストを抑えるため、動的クォークの効果を見捨てたクォーク近似的を適用した。さらに、チャームからボトムまでクォーク質量を変化させ、チャーモニウムとボトモニウムの違いを調べた (論文 8)。

まず、図 6 に、ベクターチャネルの空間的相関関数より計算された基底状態の遮蔽質量の温度依存性を示す。ここで、ゼロ温度において遮蔽質量はクォークの質量と等しくなるのに対して、高温の極限では自由クォークの場合に収束する。チャーモニウムの場合を見ると、温度上昇に伴い、遮蔽質量も上昇しており、媒質の影響を強く受けていることが分かった。一方、ボトモニウムの場合は、温度依存性が比較的小さく、高温でも安定に存在していることが示唆された。次に、クォークのスペクトル関数の温度変化を間接的に調べるため、 $1.4T_c$  ( $T_c$  は臨界温度) における通常の時間的相関関数と、 $0.7T_c$  における時間的相関関数を用いて作られた reconstructed correlator とを比較した。通常の相関関数を reconstructed correlator で割った量を調べた結果、虚時間  $\tau$  の大きい領域で大きな変化が見られた。この変化は、温度変化に伴ってスペクトル関数の低周波数領域に大きな変化が現れたことに対応すると考えられる。これは、スペクトル関数のゼロ周波数近傍に transport peak が現れたことによると予想された。このことから、スペクトル関数のその他の部分の温度変化

が比較的小さいと仮定して、通常の相関関数から reconstructed correlator を引くことで、transport peak の寄与を抜き出し、これより重いクォークの拡散係数を概算した。その結果は、先行研究と矛盾のないものだった。

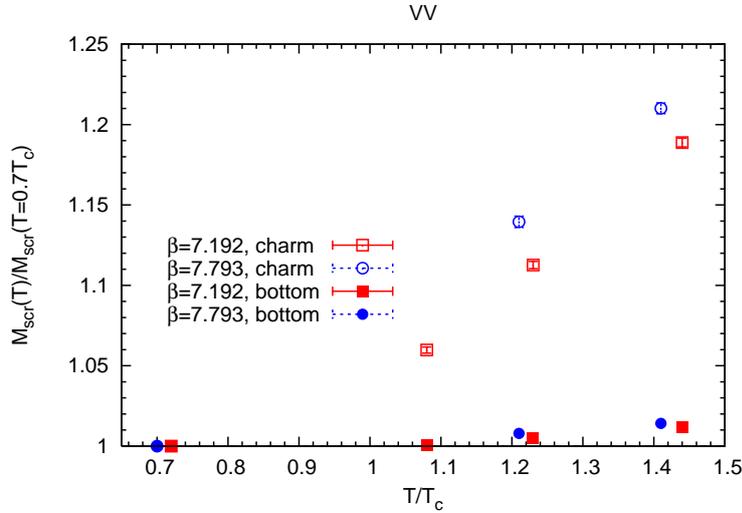


図 6: ベクターチャンネルの遮蔽質量の温度依存性。横軸は温度を臨界温度  $T_c$  で規格化、縦軸は  $0.7T_c$  の遮蔽質量で規格化したものである。チャーモニウムの結果を中抜き、ボトモニウムの結果を中塗りのシンボルで表す。また、粗い格子間隔の結果を四角、細かい格子間隔の結果を丸で表す。

### (7) 3 フレーバーにおける有限温度・有限密度 QCD (蔵増)

温度  $T$  とクォーク化学ポテンシャル  $\mu$  を関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。蔵増は、理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、 $O(a)$  改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、 $T$ 、 $\mu$ 、クォーク質量  $m_q$  のパラメータ空間における 3 フレーバー QCD の臨界線の決定に取り組んでいる。まず、最初のステップとして  $\mu = 0$  (密度ゼロ) における臨界終点を決定した (論文 9)。われわれが用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケリング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。「時間方向」の格子サイズを  $N_T = 4, 6, 8$  と変化させることによって格子間隔依存性を調べ、連続極限における臨界終点の温度として  $T_E = 133(2)(1)(3)$  MeV、また、擬スカラー中間子質量として  $m_{PS} = 306(7)(14)(7)$  MeV という値を得た (図 7 参照)。本研究は、世界で初めて 3 フレーバー QCD における臨界終点の決定に成功したものであり、QCD の相構造を理解する上での非常に重要な礎石となる。

次のステップとして、われわれは本研究を有限密度領域  $\mu \neq 0$  へと拡張した。具体的には、「時間方向」の格子サイズを  $N_T = 6$  に固定し、 $\mu/T - (m_{PS})^2$  平面における  $\mu = 0$  近傍での臨界線の曲率を決定した (論文 10)。有限の化学ポ

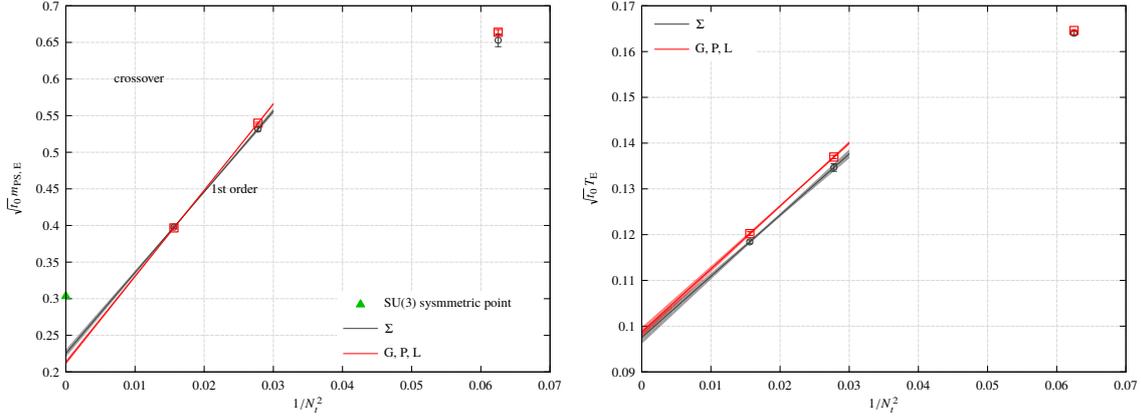


図 7: 臨界終点における擬スカラー中間子質量 (左) と転移温度 (右) の  $1/(N_T)^2$  依存性。

テンソル  $\mu \neq 0$  における臨界終点の決定は、 $\mu = 0$  の場合と同様である。また、 $\mu \neq 0$  におけるクォーク行列式からの位相の寄与は、reweighting 法によって取り入れた。更に、幅広い  $\mu$  の領域に対する臨界線の振る舞いを調べるために、マルチパラメータ reweighting 法を採用した。図 8 は、 $\mu/T - (m_{PS})^2$  平面における臨界線の振る舞いをプロットしたものである。赤シンボルと青シンボルの違いは、格子間隔を決めるための物理インプットの選択の任意性による不定性を表している。臨界線が曲率を持っていることは明らかであるが、定量的に評価するために以下の関数形でフィットを行った結果、 $\alpha_1 = 1.924(60)$  (赤シンボル)、 $\alpha_1 = 2.148(39)$  (青シンボル) という値を得た。

$$\left(\frac{m_{PS,E}(\mu)}{m_{PS,E}(0)}\right)^2 = 1 + \alpha_1 \left(\frac{\mu}{\pi T_E(0)}\right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{\mu}{\pi T_E(0)}\right)^4$$

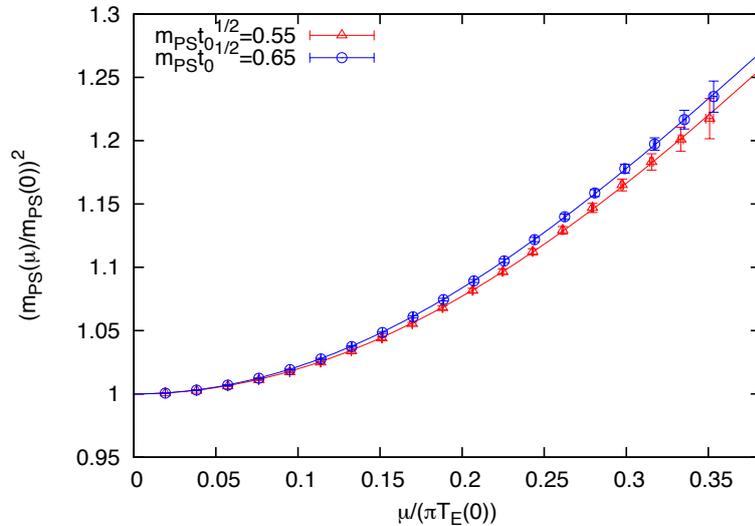


図 8:  $\mu/T - (m_{PS})^2$  平面における臨界線。赤シンボルと青シンボルは、格子間隔を決めるための異なる物理インプットを表す。

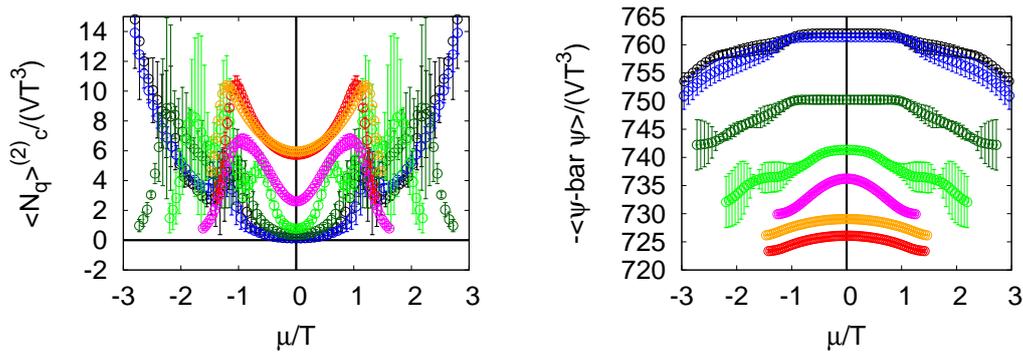


図 9: 左図: クォーク化学ポテンシャル  $\mu/T$  の関数としてのクォーク数密度の 2 次キュムラント  $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / (VT^3)$ 。グラフは上から高温側:  $\beta = 2.1$  (orange), 1.9 (red), 1.7 (magenta), 1.5 (green), 1.3 (dark green), 1.1 (blue), 0.9 (black): 低温側。右図: グランドカノニカル分布から求めたクォーク化学ポテンシャル  $\mu/T$  の関数としてのカイラル凝縮  $-\int d^3x \langle \bar{\psi}\psi \rangle / (VT^3)$ 。グラフの色と  $\beta$  の関係は左図と同じ。ただし、上側が低温、下側に行くほど高温側。

#### (8) カノニカル法を用いた有限密度 QCD の研究 (谷口)

有限密度格子 QCD には複素作用の問題、及びその派生としての符号問題と呼ばれる未解決の問題がある。2014 年度はこの複素作用の問題を直接回避する方策として、カノニカル分配関数をフガシティ展開の係数として直接計算するカノニカル法と呼ばれる手法を採用した。更に重いクォークに対して有効な hopping parameter 展開を採用することで、広い温度領域でカノニカル分配関数の計算を行った。物理量の計算としては、求めたカノニカル分配関数を用いてグランドカノニカル分配関数を実化学ポテンシャルの関数として再構成したことが挙げられる。その結果、クォークの閉じ込め相である低温側から出発して、実化学ポテンシャルを上げて行った時の各種物理量の振る舞いを見ることができた (図 9)。そこからはクォークの閉じ込め - 非閉じ込め相転移 (図 9 左) や自発的に破れているカイラル対称性が回復する相転移の様子 (図 9 右) が見て取れた。特に明らかな閉じ込め相において、比較的大きな化学ポテンシャルでの相転移現象を捉えることができたことは特筆すべき点であると思われる。

#### (9) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD を用いた数値計算の最大の特徴は非摂動的な第一原理計算であり、それは強い相互作用の定量的理解を可能とする。過去 30 年以上にわたって継続的なアルゴリズムの開発・改良が行われた結果、スーパーコンピュータの著しい性能向上と相俟って、現在では自然界の  $u$ 、 $d$ 、 $s$  クォーク質量 (物理点) を用いたシミュレーションや質量数 4 以下の軽原子核の束縛エネルギー計算も可能となりつつある。このような成功の一方で、長年にわたり本質的問題として認識されながらも、効果的な解決策が見出されることなく取り残された

ままの課題が存在する。その代表的かつ重要な例として、以下の3つが挙げられる。

i) 負符号問題

現在の典型的な格子 QCD 計算である 2+1 フレーバー QCD シミュレーションでは、s クォークは独立に扱うが、u、d クォーク質量は人為的に縮退させる ( $m_u = m_d$ )。この操作により、軽い質量のクォークに起因する負符号問題をアルゴリズム的にうまく回避することが可能となる。もし、仮に u、d クォークを独立に扱おうとすると ( $m_u \neq m_d$ )、現在広く用いられているモンテカルロアルゴリズムでは、分配関数 (経路積分) における Boltzman weight の部分に負符号の寄与が現れ、確率解釈が困難になってしまう。

ii) 複素作用を持つ系のシミュレーション

格子 QCD において Strong CP 問題や有限密度 QCD を扱う場合、作用が複素数になってしまう。具体的には、前者の場合は通常の QCD 作用に付加する  $\theta$  項が複素数となり、後者の場合は非ゼロ化学ポテンシャル  $\mu$  の導入が複素作用の問題を引き起こしてしまう。格子 QCD を用いて Strong CP 問題や有限密度 QCD の物理を系統的に研究するためには、複素作用を持つ分配関数の精確な数値評価は避けて通れない課題であるが、いまだ効果的な解決策が見つかっていないのが現状である。

iii) フェルミオン系の計算コスト

格子 QCD シミュレーションが多大な計算コストを必要とすることはよく知られた事実だが、その原因はモンテカルロ法においてグラスマン数を直接扱えないことに起因する。現在広く用いられているアルゴリズムでは、QCD 作用におけるフェルミオン場を一旦解析的に積分し、その後改めてボゾン場を用いて QCD の有効作用を構築し、その Boltzman weight をもとにモンテカルロ計算を行っている。しかしながら、ボゾン場で記述された QCD の有効作用は非局所的なものとなってしまう (オリジナルな QCD 作用は局所的)、そのシミュレーションに要する計算コストは膨大なものとなる。

以上の3つの問題の原因を考察してみると、いずれもモンテカルロ法の本質的な欠点に起因していることがわかる。すなわち、現在の格子 QCD 計算が抱える重要な問題は、そのベースとなるアルゴリズムとしてモンテカルロ法を採用している限り、根本的解決は難しい。

一方、他分野に目を転じてみると、物性物理 (あるいは統計基礎論) 分野においても分配関数を用いた数値計算が行われているが、比較的シンプルなモデルを扱っているということもあり、格子 QCD よりもはるかに多様なアルゴリズムが開発・試行されている。そのような状況のもと、2007 年 Levin と Nave により、テンソルネットワーク形式に基づいたテンソル繰り込み群という古典格子スピンモデルに対する新たな計算アルゴリズムが提案された。この手法では、まず分配関数を局所的 (格子点) に定義されたテンソルの積で書き表す。

$$Z = \sum_{i,j,k,\dots} e^{-S(i,j,k,\dots)} = \sum_{i,j,k,\dots} T_{ijkl} T_{imno} T_{jpqr} T_{ksuv} T_{lwx y} \dots$$

ここでは2次元正方格子を仮定しているが、それ以外の場合でも、相互作用が局所的であれば必ず上式のようなテンソルネットワーク形式で表せることが知られている。もちろん、このテンソル積の添字に関する縮約をすべて実行してしまえば、厳密な分配関数  $Z$  の値が得られるが、それでは自由度が巨大過ぎて、たとえ最先端のスーパーコンピュータであっても計算可能な格子サイズは非常に小さなものに限られる。そのため、Levin と Nave は、特異値分解に基づいた重要度の高い自由度の選択とブロック変換の一種による疎視化を組み合わせた手続きを反復することにより、分配関数  $Z$  の値そのものを高精度で計算することが可能なアルゴリズムを提唱した。なお、特異値分解とは行列の近似手法であり、画像データの圧縮など幅広い分野で応用されている。このアルゴリズムの最大の長所は、符号問題や複素作用の問題がないことであり、欠点はモデルの高次元化に伴ってテンソルの添字が増えることによる計算コストの増大である（注：ただし、計算コストに関しては、一辺の長さ  $L$  の  $d$  次元格子体積  $L^d$  に対して  $d \log L$  でしか増大しないという大変魅力的な側面もある。ちなみに、4次元格子 QCD 計算において、現在広く用いられているモンテカルロ法をベースとしたアルゴリズムでは、計算コストの体積依存性は  $L^5$  である）。その後、物性物理分野の研究者によりテンソル繰り込み群のアルゴリズム改良が提案され、実際に幾つかの2次元スピン系と3次元イジングモデルの高精度計算に応用された。

藏増と理研計算科学研究機構 (AICS) の清水特別研究員は、先ず論文 15 においてテンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し (グラスマンテンソル繰り込み群)、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用を行った。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて1フレーバーの2次元格子 Schwinger モデル (2次元格子 QED) における相構造を調べた。相転移に対しては、Lee-Yang/Fisher ゼロの有限サイズスケール解析を行い、フェルミオンのゼロ質量極限における2次相転移を確認し、その臨界指数の高精度計算を行うことによって、ユニバーサリティクラスを同定した。この論文において、テンソル繰り込み群がグラスマン数に対しても定式化可能であり、必要な計算コストがボゾン系の場合と変わらないことおよびフェルミオン系に起因する負符号問題がないことを示した。また、論文 16 では、論文 15 中の作用に  $\theta$  項を付け加えた系の相構造を調べた。この系では  $\theta = \pi$  の場合、フェルミオン質量がある有限の値以上であれば一次相転移が起きることが期待されている。われわれは、論文 15 と同じ解析手法を用いて、期待されている一次相転移を確認した。さらに、臨界終点における2次相転移の臨界指数の高精度計算を行うことによって、そのユニバーサリティクラスを同定した。これにより、グラスマンテンソル繰り込み群が、複素作用の分配関数も精確に取り扱えることを示した。以上2本の論文において、われわれは2次元 Schwinger モデルを用いて、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が持つ3つの重要問題をすべて解決していることを示すことに成功した。

#### (10) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補で

ある。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) を中心とした LatKMI Collaboration の研究者、山脇幸一特別教授、青木保道准教授らと共に、格子ゲージ理論を用いた数値計算からそのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行った。これまでの 4、8 (論文 17)、12 (論文 18) フレーバー SU(3) ゲージ理論の研究から、8 フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性がある事を示した。特に、論文 17 では、ウォーキングテクニカラー模型ではヒッグス粒子に対応するフレーバー 1 重項スカラー中間子が、 $\pi$  中間子と同程度に軽くなるという結果を得た。この結果は、8 フレーバー理論がウォーキングテクニカラー模型の理論として好ましい性質を持っている事を示唆している。

(11) コンフォーマル理論の研究

吉江は、コンフォーマル理論の数値的研究を、岩崎 (筑波大学・KEK)、石川 (広島大学)、中山 (Walter Burke Institute)、野秋、Cossu (KEK) と共同で行った。繰り込み群の議論から、i) 赤外固定点 (クォーク質量はゼロ) でのメソン伝搬関数の体積依存性に関するスケーリング則を導き、ii) そのスケーリング則を満たす点をサーチする事で、 $N_f = 7, 8, 12, 16$  QCD での赤外固定点を同定した (論文 19)。

(12) 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究 (HAL QCD Collaboration)

陽子および中性子 (核子) を結びつけ、原子核を構成している力 (核力) は、現象論的には中間子交換によって生じると考えられているが、その起源をより基本的なクォーク・グルーオンの自由度に基づいて理解すること、とりわけ短距離核力における斥力芯の発現機構を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の 1 つである。根村、佐々木は、京都大学基礎物理学研究所青木教授、理化学研究所初田主任研究員らと HAL QCD Collaboration を結成し、2 核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子 QCD の数値シミュレーションで計算してきた。論文 20 では、 $m_\pi \approx 470$  MeV において得られた核力ポテンシャルの、有限核 ( $^{16}\text{O}$  および  $^{40}\text{Ca}$ ) への適用を行った。論文 21 では、核力のスピン軌道力成分を格子 QCD 計算から導出できることを具体的に示した。論文 22 は、HAL QCD の方法を用いて、核子と  $\Omega$  粒子との間に働くポテンシャルを計算したものである。以下では、根村、佐々木、及び青木教授の学生である山田、宮本の 2014 年度の研究成果を紹介する。

4 点相関関数の GPGPU 対応高速計算コードの開発および格子 QCD に基づく核力ポテンシャルによる精密少数系の研究

物理点での格子 QCD による (一般化) 核力ポテンシャルの導出に備えて、この計算の基本部分となる Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数の格子 QCD 計算を効率よく高速に行うためのアルゴリズムの開発並びに実際に大型計算

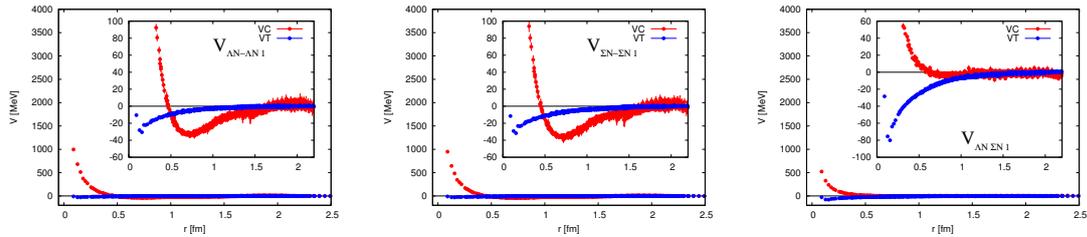


図 10:  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合チャンネルポテンシャル。赤は中心力、青はテンソル力を表す。

機で高速に動くプログラムの開発を進めた。とりわけ今年度は、演算加速器 (GPGPU) を搭載した大型計算機である HA-PACS 上で、2+1 フレーバ格子 QCD 計算のもとで 4 点相関関数を効率よく計算するためのアルゴリズムの開発ならびに、複数の GPGPU を利用可能な、MPI+OpenMP+CUDA によるハイブリッド並列化された C++ プログラムを作成した。また、これまでに得られている正パリティの核力ポテンシャル (中心力、テンソル力) に加え、負パリティの核力 (中心力、テンソル力、スピン軌道力) を含んだ格子 QCD による核力ポテンシャルを用いた  $^4\text{He}$  の精密計算を行った。

#### 結合チャンネルポテンシャル法を用いたハイペロン力の研究

佐々木は、従来の HAL QCD Collaboration によるポテンシャルの導出方法を結合チャンネル Schrödinger 方程式に適用しストレンジネスを含む 2 体バリオンのポテンシャル行列を導出してきた。本年度は、これらをさらに拡張し、スピン 3 重項状態におけるテンソル力も含めた結合系ポテンシャルの導出に成功した。PACS-CS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 701 MeV に対応する 2+1 フレーバゲージ配位を使って計算した  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合系のポテンシャルを図 10 に示す。今度はこれらのポテンシャルを使って、散乱観測量の計算を行う予定である。

#### 格子 QCD を用いた $\Omega$ - $\Omega$ 相互作用の研究

ストレンジクォークを含むハイペロン間の相互作用の研究は自然を理解する上で重要かつ実験と理論の両側が互いに協力して研究されている分野である。特にストレンジクォークを多く含む  $\Omega$  バリオンは実験が難しく格子 QCD を用いた理論的導出が重要な手がかりになると期待されている。山田らは、HALQCD 法を用いて  $\Omega$ - $\Omega$  間のポテンシャルを計算した。これまでの計算では体積が小さく (格子の一辺 1.9 fm、 $\pi$  中間子質量 875 MeV) ポテンシャルがシミュレーション空間に入りきっていない可能性があるものであった。また大きい体積の結果では統計が少なくシグナルが統計エラーに埋もれていた。本年度は大きい体積 (格子の一辺 2.9 fm、 $\pi$  中間子質量 701 MeV) での統計を上げポテンシャルを計算した。計算の結果を図 11 に示す。図より近距離には斥力芯があり、中距離には強い引力ポケットがある事がわかる。

#### $\Lambda_c$ - $N$ 相互作用の研究

チャームクォークを含む重いバリオンの物理を調べることは、物質世界の謎を解明する上で重要なことである。宮本らは、チャームクォークを含むバリオ

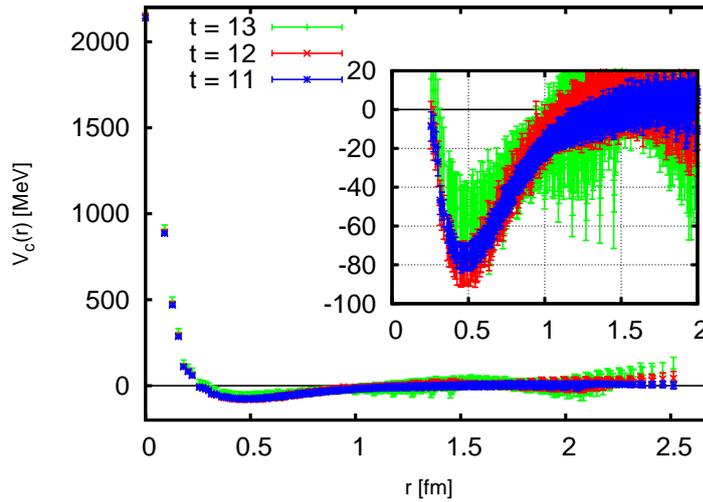


図 11:  $\Omega$ - $\Omega$  の中心力ポテンシャル (色の違いはソースとシンクの相対時間)。

ンのうち最も軽いとされる  $\Lambda_c^+(J^P = \frac{1}{2}^+)$  と核子との間に働く核力ポテンシャルを HAL QCD Collaboration による方法を用いて数値的に計算した。本研究では CP-PACS/JLQCD Collaborations により生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位 (格子の一边 1.934(26) fm、 $\pi$  中間子質量 884.04(81) MeV) を用い、チャームクォークの伝搬関数はストレンジクォークの質量を重く設定することで部分クエンチ近似的に解いた。また、比較のために同じゲージ配位で  $\Lambda$ - $N$  間のポテンシャルも計算した。計算の結果を図 12 に示す。図より、 $\Lambda_c$ - $N$  間のポテンシャルが  $\Lambda$ - $N$  のものに比べて斥力芯が弱いことと、引力が小さいことが分かる。今後得られたポテンシャルを適当な解析関数によって表現し、位相差などの物理量を求めていく予定である。

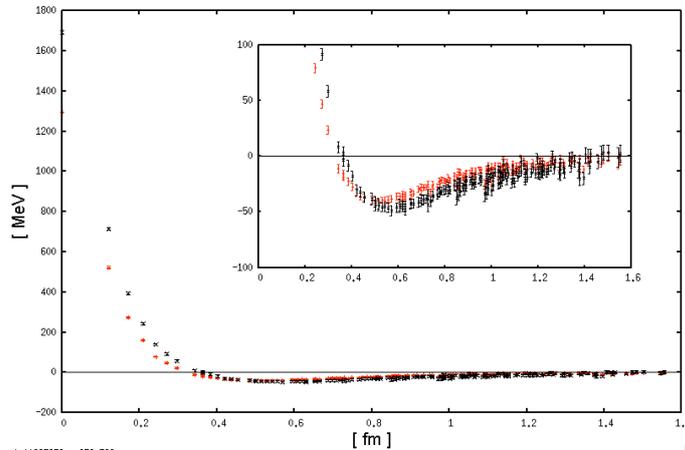


図 12:  $\Lambda$ - $N$  (黒) と  $\Lambda_c$ - $N$  (赤) の中心ポテンシャル。

### (13) JLDG の改良と運用

吉江は、格子 QCD データグリッド JLDG の改良を、建部、天笠 (筑波大電子情報) 等と行った。主な改良は、(a) 阪大 RCNP での JLDG FUSE mount の実装、運用開始、(b) Metadata Slave サーバの阪大 RCNP への設置、(c) HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携システムの運用開始、などである。

### (14) 格子 QCD 共通コード開発

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++ の開発を進めた (論文 24、25、26)。格子 QCD 共通コード Bridge++ は、QCD を含む格子ゲージ理論シミュレーションのための汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリズムを適用可能で、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。2012 年 7 月に Bridge++ ver.1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>)。素粒子理論グループからは、金谷、滑川、根村、谷口、浮田が参加している。

本年度は、OpenMP によるスレッド並列化への対応を進めた。また、ゲージ群を  $SU(3)$  から一般の  $SU(N)$  へと拡張した。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.2.0 へのメジャーアップデートが 2014 年 9 月に行われた。その後も、コードの細かい改定、改良が進められている。最新版は、ver.1.2.2 である。

## 【 2 】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

### (1) 弦の場の理論におけるタキオン真空解の研究

弦の場の理論は弦の理論の非摂動効果を研究することができる定式化である。この理論の大きな成果の一つはタキオン真空解の構築である。タキオン真空とはタキオンが凝縮して D ブレーンが消滅した状態であり、この状態を開弦の場の理論の古典解として実現することができる。タキオン真空解の周りの弦の場の理論は閉弦の場の理論を記述するのではないかと予想されている。しかし、現在実際に得られているタキオン真空解の周りの弦の場の理論についてこの予想を示した例はない。石橋は、高橋・谷本解と呼ばれるタキオン真空解とその周りの弦の場の理論を調べ、この場の理論をうまく定義するための正則化を提案した。この正則化を用れば、上記の予想を示すことができるのではないかと期待されている (論文 31)。

### (2) 重力理論/ゲージ理論双対性と強結合グルーオン散乱振幅

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。これまでの研究により我々は、双対性の背後に現れる可積分模型を用いて強結合散乱振幅を解析的に求める方法を定式化してきた。

佐藤は初田 (DESY)、伊藤 (東京工業大学)、鈴木 (静岡大) と共に、2次元可積分系の基本関係式である量子ロンスキアン関係式を用いた新たな散乱振幅の解析的評価法を開発し、一般の4次元運動量に対する6点MHV振幅の主要次数の展開式を導いた (論文 32)。

### (3) 行列幾何とコヒーレント状態

超弦理論の非摂動的定式化として知られる行列模型において、弦やDブレーンといった物体は、行列を用いて記述される。このような従来微分幾何を用いて記述される連続的な物体に対して、行列を用いた離散的な記述を与えることを行列正則化と呼ぶ。行列正則化はまだ理解されていない側面が多く、特に大きな問題として次の二つが挙げられる。一つ目は任意の多様体に対する行列正則化の構成法が知られていないこと、そして二つ目は与えられた行列の配位から、対応する微分幾何を読み取る方法が知られていないことである。

伊敷は量子力学におけるコヒーレント状態の考えを一般の行列幾何の場合に拡張し、これを用いて後者の問題についての解を与えた。この結果により、与えられた行列の配位から、対応する多様体やその上に定義される計量や曲率といった幾何学的な量を計算することが可能となった (論文 34)。

### (4) Sine-square deformation と共形場の理論

一次元スピン系において、隣のスピンの相互作用を位置のサイン関数の2乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂 (東大) らの研究によってわかっている。石橋は多田 (理研) とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べた。相互作用をサイン関数の2乗にとった場合と定数の場合は、ある共形変換で結びついていることを示し、この共形変換から基底状態等の性質が理解できることを示した (論文 35)。

### (5) 共形界面と弦理論

共形場理論において共形対称性を保つ欠陥 (defect) / 界面 (interface) は共形欠陥/界面と呼ばれる。弦理論の世界面からのアプローチでは共形対称性は指導原理の一つともなっているため、共形境界 (boundary) が弦理論のソリトン (Dブレーン) を表すように、共形対称性を保つ対象は弦理論において基本的な役割を果たすと期待される。

佐藤は菅原 (立命館大学) と共に、「T-fold」など非幾何学的背景時空中の弦を記述する新たなタイプの分配関数が共形界面を用いて構成されることを示した (論文 36)。

## 論文

1. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, arXiv:1502.04182.

2. Takeshi Yamazaki, Hadronic interactions, Proceeding of Science (LATTICE 2014) 009.
3. N. Ishizuka, K.I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Calculation of  $K \rightarrow \pi\pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 364.
4. Y. Namekawa, Comparative study of topological charge, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 344.
5. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 222.
6. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner and M. Wagner, Additional Strange Hadrons from QCD Thermodynamics and Strangeness Freezeout in Heavy Ion Collisions, Phys. Rev. Lett. 113, No. 7 (2014) ref. 072001.
7. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner and M. Wagner, The melting and abundance of open charm hadrons, Phys. Lett. B 737 (2104) ref. 210.
8. H. Ohno, H.-T. Ding and O. Kaczmarek, Quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 219.
9. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD, Phys. Rev. D91 (2015) ref. 014508.
10. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudoscalar meson mass for three-flavor QCD, arXiv:1503.00113.
11. Y. Nakamura, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, S. Takeda, and A. Ukawa, Update on the critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD with clover type fermions, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 194.
12. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Scalar correlators near the 3-flavor thermal critical point, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 195.

13. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Critical end point in  $N_f = 3$  QCD with finite density and temperature, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 196.
14. A. Nakamura, S. Oka, Y. Taniguchi, Canonical approach to the finite density QCD with winding number expansion, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 198.
15. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Grassmann tensor renormalization group approach to one-flavor lattice Schwinger model, Phys. Rev. D90 (2014) ref. 014508.
16. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Critical behavior of the lattice Schwinger model with a topological term at  $\theta = \pi$  using the Grassmann tensor renormalization group, Phys. Rev. D90 (2014) ref. 074503.
17. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Light composite scalar in eight-flavor QCD on the lattice, Phys. Rev. D 89 (2014) ref. 111502(R).
18. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Conformality in twelve-flavor QCD, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 256.
19. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, IR fixed points in  $SU(3)$  gauge Theories, arXiv:1503.02359[hep-lat].
20. T. Inoue, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Medium-Heavy Nuclei from Nucleon-Nucleon Interactions in Lattice QCD, Phys. Rev. C 91, 011001(R).
21. K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, H. Nemura, K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Spin-Orbit Force from Lattice QCD, Phys. Lett. B 735 (2014) 19.
22. F. Etminan, H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Spin-2  $N\Omega$  Dibaryon from Lattice QCD, Nucl. Phys. A 928 (2014) 89.
23. H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, Recent developments on LQCD studies of nuclear force, Proceedings of the Seventh International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei, Int. J. Mod. Phys. E23 (2014) 1461006.

24. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, Development of Lattice QCD Simulation Code Set “ Bridge++ ” on Accelerators, *Procedia Computer Science* Volume 29 (2014) 1701.
25. S. Ueda S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Development of an object oriented lattice QCD code 'Bridge++', *J. Phys. Conf. Ser.* 523 (2014) 012046.
26. S. Ueda S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Lattice QCD code Bridge++ on multi-thread and many core accelerators, *Proceeding of Science (LATTICE2014)* ref. 036.
27. Sinya Aoki, Michael Creutz, Pion masses in 2-flavor QCD with  $\chi$  condensation, *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) ref. 141603, 1-5 (arXiv:1402.1837[hep-lat]).
28. H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, Computation of the electromagnetic pion form factor from lattice QCD in the epsilon regime. *Phys. Rev. D* 90, (2014) ref. 034506 ( arXiv:1405.4077 [hep-lat]).
29. Sinya Aoki, Janos Balog and Peter Weisz, Walking in the 3-dimensional large  $N$  scalar model, *JHEP* 1409 (2014) 167 (arXiv:1407.7074[hep-lat]).
30. Xu Feng, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Time-like pion form factor in lattice QCD, *Phys. Rev. D* 91 (2015) ref. 054504 (arXiv:1412.6319[hep-lat]).
31. N. Ishibashi, Comments on Takahashi-Tanimoto 's scalar solution *JHEP* 1502 (2015) 168.
32. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, Quantum Wronskian approach to gluon scattering amplitudes at strong coupling, *JHEP* **1408** (2014) 162.
33. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, *Nuclear Physics B Proceedings Supplement* 251-252 (2014) 123-128.
34. Goro Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, arXiv:1503.01230 [hep-th], UTHEP-669.
35. N. Ishibashi and T. Tada, Infinite circumference limit of conformal field theory, UTHEP-672.
36. Yuji Satoh and Yuji Sugawara, Non-geometric backgrounds based on topological interfaces, preprint UTHEP-667.

## 学位論文

### [博士論文]

1. 趙 栄貴

「Improvement of the Brillouin fermion action for heavy quark (重いクォークの物理に向けたブリルアンフェルミオン作用の改良)」

2. 山田 真徳

「A study of the Omega-Omega interaction using the central potential in Lattice QCD (格子 QCD での中心力ポテンシャルを用いたオメガバリオン間の相互作用に関する研究)」

### [修士論文]

1. 酒井 慧

「テンソル繰り込み群の開発と応用」

2. 鈴木 遊

「カノニカル法を用いた格子 QCD における高次キュムラントの計算」

3. 寺松 宏平

「 $I = 2 \pi\pi$  散乱における HAL method での演算子依存性」

4. 宮本 貴也

「格子 QCD を用いた  $\Lambda_c$ - $N$  核子間相互作用の研究」

## 研究成果発表 (講演)

### [国際会議]

1. Sinya Aoki, 「Some topics in 2-flavor QCD at zero and finite temperature」 (招待講演),

Workshop "Facing Strong Dynamics" (Liselund Castle, Denmark, June 2-6, 2014).

2. Yuji Satoh, 「Quantum wronskian relation and gluon scattering amplitudes at strong coupling」 (招待講演),

Finite-size Technology in Low Dimensional Quantum System (VII) (Eotvos University, Budapest, Hungary, June 16-27, 2014).

3. Takeshi Yamazaki, 「Hadronic Interactions」 (招待講演),

The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, USA, June 23-28, 2014).

4. Sinya Aoki, 「Finite-volume methods for hadrons and their interactions in lattice QCD」(招待講演),  
CERN Theory Workshop ”Conceptual advances in lattice gauge theory (LGT14)”  
(CERN, Geneva, Switzerland, July 21-August 1, 2014).
5. Nobuyuki Ishibashi, 「Comments on the Takahashi-Tanimoto tachyon vacuum solution」(招待講演),  
String field theory and related aspects VI, SFT2014 (SISSA, Trieste, Italy,  
July 24-August 1, 2014)
6. Yusuke Namekawa, 「Heavy hadrons from lattice QCD」(招待講演),  
Structure and productions of charmed baryons II  
(Tokai, Japan, August 7-9, 2014).
7. Sinya Aoki, 「Hadron interactions from lattice QCD」(招待講演),  
KITPC program ”Present Status of the Nuclear Interaction Theory” (KITPC/ITP-  
CAS, Beijing, China, August 25-September 19, 2014).
8. Sinya Aoki, 「2-flavor QCD with non-degenerate quarks」(招待講演),  
Creutz Fest 2014 ”A Celebration of the Career and Accomplishments of Michael  
Creutz” (Physics Department, BNL, USA, September 4-5, 2014).
9. Yoshinobu Kuramashi, 「Lattice QCD」(招待講演),  
US/Japan Exascale Applications Workshop (Gatlinburg, Tennessee, USA, Sep.  
5-6, 2014).
10. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」(招待講演),  
Advances and perspectives in computational nuclear physics (Hilton Waikoloa  
Village, USA, Oct. 5-7, 2014).
11. K. Sasaki, 「Coupled channel approach to hyperon-nucleon interaction from-  
Lattice QCD」(招待講演),  
Workshop ”Achievements and Perspectives in Low-energy QCD with Strangeness”  
(Trento, Italy, Oct. 27-31, 2014).
12. K. Sasaki, 「Hadron interactions and resonances from lattice QCD」(招待講  
演),  
Workshop ”Resonance Workshop at Catania” (Catania, Italy, Nov. 3-7, 2014).
13. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」(招待講演),  
RIKEN BNL Research Center workshop ”Multi-Hadron and Nonlocal Matrix  
Elements in Lattice QCD” (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6,  
2015).
14. Naruhito Ishizuka, 「 $K \rightarrow \pi\pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion」  
(招待講演),

- RIKEN BNL Research Center workshop "Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD" (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6, 2015).
15. Sinya Aoki, 「Hadron interaction in lattice QCD」(招待講演),  
Long-term workshop on "Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (HHIQCD2015)" (YITP, Kyoto, Japan, February 12-March 21, 2015).
  16. H. Nemura (for HAL QCD Collaboration), 「Stochastic variational calculation of 4He using lattice NN potential」(招待講演),  
International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations Methodologies and Algorithms for Fermion Many-Body Problem (University of Tokyo, Tokyo, Japan, Feb. 18-21, 2015).
  17. Yoshinobu Kuramashi, 「2+1 flavor lattice QCD simulation on K computer」(招待講演),  
CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
  18. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of  $K \rightarrow \pi\pi$  amplitudes」(招待講演),  
CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
  19. Yusuke Taniguchi, 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」(招待講演),  
CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
  20. Hiroshi Ohno, 「Quarkonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD」(招待講演),  
CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
  21. Hiroshi Ohno, 「Lattice QCD study on quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature」,  
The XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014) (Darmstadt, Germany, May 19-24, 2014).
  22. Sinya Aoki, 「Pion masses in 2-flavor QCD with eta condensation」,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
  23. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of  $K \rightarrow \pi\pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD」,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).

24. Yusuke Taniguchi, 「 Canonical approach to the finite density QCD with winding number expansion 」 ,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
(Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
25. Hiroshi Ohno, 「 Quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature 」 ,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
(Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
26. Y.Namekawa, 「 Comparative study of topological charge 」 ,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
(Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
27. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto  
(WHOT-QCD Collaboration), 「 Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state 」 ,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
(Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
28. Masanori Yamada, for HAL QCD Collaboration, 「 Omega-Omega interaction from 2+1 flavor QCD 」 ,  
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)  
(Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
29. Tomoteru Yoshié, 「 Report from JLDG 」 ,  
International Lattice Data Grid 22 (Columbia University, New York, USA,  
June 24, 2014).
30. Yusuke Taniguchi, 「 Canonical approach to the finite density lattice QCD with winding number expansion (II) hadronic observables 」 ,  
Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (Hawaii, USA, October 7-11, 2014).
31. Masanori Yamada, for HAL QCD Collaboration, 「 Omega-Omega interaction on the Lattice 」 ,  
Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (Hawaii, USA, October 7-11, 2014).
32. Goro Ishiki, 「 Matrix Geometry and Coherent States 」 ,  
KEK Theory Workshop 2015 (KEK, Tsukuba, Japan, Jan. 28-31, 2015).

33. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (Kyoto University, Kyoto, Feb. 15-Mar. 21, 2015).

[国内学会、研究会]

1. 山崎 剛, 「hadronic interaction and beyond standard model from lattice gauge theory」(招待講演),  
素粒子物理学の進展 2014 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2014年7月28日-8月1日).
2. 青木 慎也, 「Toward the entanglement entropy in lattice gauge theories」(招待講演),  
「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2014 (慶應大学日吉キャンパス, 神奈川, 2014年9月12日-15日).
3. 山崎 剛, 「格子 QCD を用いた原子核直接計算」(招待講演),  
RCNP workshop "QCD を基礎とする核子多体系物理の理解" (大阪大学 RCNP, 大阪, 2014年12月19-20日).
4. 谷口裕介, 「カイラル相転移を追いかけて」(招待講演),  
素粒子論の展望: 80年代、90年代から未来へ (大阪大学, 豊中市, 2015年2月14日).
5. 谷口裕介, 「カノニカル法による格子 QCD 有限密度相転移現象への挑戦」(招待講演),  
九大研究会 -格子 QCD と現象論モデルによる有限温度・有限密度の物理の解明- (九州大学, 福岡市, 2015年2月19日).
6. 石橋 延幸, 「Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory in noncritical dimensions」(招待講演),  
弦の場の理論 15 奈良 (奈良女子大学, 奈良, 2015年3月5日-6日).
7. 青木 慎也, 「全体概要」(招待講演),  
素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム (紀尾井フォーラム, 東京, 2015年3月11日-12日).
8. 山崎 剛, 「格子 QCD を用いた軽い原子核の計算」(招待講演),  
素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム (紀尾井フォーラム, 東京, 2015年3月11日-12日).
9. 谷口裕介, 「カノニカル法による格子 QCD の有限密度相転移現象への挑戦」,  
理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光市, 2014年9月3日-5日).

10. 大野浩史, 「有限温度格子 QCD におけるチャーモニウム及びボトモニウム相関関数の研究」,  
理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所,  
和光市, 2014 年 9 月 3 日-5 日).
11. 石塚成人, 「Calculation of  $K$  to  $\pi\pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion」,  
日本物理学会 2014 年 秋季大会 (佐賀大学, 佐賀, 2014 年 9 月 18 日-21 日).
12. 山崎 剛 for LatKMI Collaboration, 「Study of hadron spectra in 8-flavor QCD with lattice gauge theory」,  
日本物理学会 2014 年 秋季大会 (佐賀大学, 佐賀, 2014 年 9 月 18 日-21 日).
13. 根村 英克 (HAL QCD Collaboration), 「Study of hyperon potentials from lattice QCD and hypernuclei」,  
「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会 (熱川ハイツ, 静岡, 2014 年 9 月 25 日-27 日).
14. 佐々木 健志, 「格子 QCD から導くハイペロン間相互作用の研究」,  
「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会 (熱川ハイツ, 静岡, 2014 年 9 月 25 日-27 日).
15. 吉江 友照, 「HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携」,  
HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (東京, 2014 年 10 月 30 日-31 日).
16. 吉江 友照, 「HEPnet-J/sc 報告」,  
HEPnet-J ユーザー会 (KEK, つくば, 2014 年 12 月 11 日-12 日).
17. 吉江 友照, 「格子 QCD データ共有・管理基盤 JLDG/ILDG」,  
HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム (東京, 2015 年 3 月 11 日-12 日).
18. 山崎 剛 for LatKMI Collaboration, 「格子ゲージ理論を用いた 8 フレーバー QCD における近似的共形対称性の研究」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
19. 谷口裕介, 「カノニカル法による格子 QCD の有限密度相転移現象の研究」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
20. 大野浩史, 「有限温度格子 QCD による チャーモニウム及びボトモニウムの研究」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
21. 佐藤 勇二, 菅原祐二, 「Non-geometric backgrounds based on topological interfaces」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).

22. 伊敷 吾郎, 「Matrix Geometry and Coherent States」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
23. 鈴木 遊, 「カノニカル法を用いた格子 QCD における高次キュムラントの計  
算」,  
日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
24. 大野浩史, 「有限温度格子 QCD によるチャーモニウム・ボトモニウム 及び重  
クォーク拡散係数の研究」,  
チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最前線まで」(理化学  
研究所, 和光, 2015 年 3 月 25 日-27 日).

## 受賞

1. 青木慎也、初田哲男、石井理修  
「量子色力学の第一原理計算に基づく核力の研究」、平成 26 年度科学技術分  
野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門)、2014 年 4 月 7 日、文部科  
学省

## 国際会議・研究会の実施

1. HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」/計算基礎科学連携拠  
点/京都大学基礎物理学研究所 主催,  
サマースクール「クォークから超新星爆発まで」-基礎物理の理想への挑戦-,  
2014 年 7 月 22 日-26 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.
2. HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」計算基礎科学連携拠  
点 主催,  
素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, ポスト「京」  
重点課題 (9)「宇宙の基本法則と進化の解明」,  
2015 年 3 月 11 日-12 日, 紀尾井フォーラム, 東京.
3. 筑波大学計算科学研究センター/理研 BNL 研究センター共催,  
CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015),  
2015 年 3 月 12-13 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.

## 国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動

1. 計算基礎科学連携拠点  
<http://www.jicfus.jp/jp/>

2. High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム  
<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>
3. 計算科学研究機構 (AICS)  
<http://www.aics.riken.jp/>
4. International Lattice Data Grid (ILDG)  
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)  
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
6. 石橋延幸, 日本学術振興会学術システム研究センター専門委員
7. 石橋延幸, PTEP 編集委員
8. 佐藤勇二, 欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」(<http://gatis.desy.eu/>) のグローバルネットワークへの参加
9. 佐藤勇二, Hungarian Academy of Sciences (HAS) との二国間交流事業 (共同研究)「ゲージ理論/重力理論双対性における可積分性と強結合ゲージ理論ダイナミクス」代表
10. 佐藤勇二, 日本物理学会素粒子論領域運営委員

## II. 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
准教授	原 和彦
講師	武内 勇司, 佐藤 構二
助教	大川 英希
研究科特別研究員	武政 健一
大学院生	20 名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験 CDF, ATLAS, および ILC の研究を行っている。CDF は 2011 年度に運転終了, ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始, ILC は技術設計中の実験である。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。また, 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索を目的とした高分解能光検出器 STJ の開発, 宇宙線ミュー粒子を用いた大規模構造物の透視を行っている。

### 【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は, 米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり, 日本をはじめアジア, 北米, 欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれている。1996 年の物理実験 Run I の終了後 CDF 検出器およびテバトロン加速器は, 1996 年の物理実験 Run I の終了後の大幅な増強を経て 2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが, 2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約  $10 \text{ fb}^{-1}$  である。この全データを用いた物理解析も多くが終了し, 最終結果を論文として公表する段階にある。2014 年には 19 篇の原著論文が公表された。以下に 2014 年度の成果について主なものを記す。

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見からおおよそ 20 年が経過し, Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いてその様々な性質が詳細に研究されている。テバトロンでのトップクォーク生成は, クォーク・反クォーク対を始状態とする対生成が主である。

その質量は多くの終状態を用いて測定されている。2014 年には, CDF 実験と D0 実験の測定を総合した Run-II 実験の最終結果が  $m_{\text{top}} = 174.34 \pm 0.37 \pm 0.52 \text{ GeV}/c^2$  と得られた(図 1 (左))。

また, トップクォーク対の生成機構の研究を継続して行った。 $t\bar{t}$  対の前後方非対称度に着目し, 2010 年度には  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  相当のデータを用いて dilepton チャンネルにおける初めての測定を行った。2014 年度には, 論文発表に向け, 全データを用いた dilepton チャンネルの解析を継続した。

### 【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は, 2012 年までの RUN-1 を経て 2014 年度は重心系エネルギーを 13 – 14 TeV に増強するための工事が行われた。2015

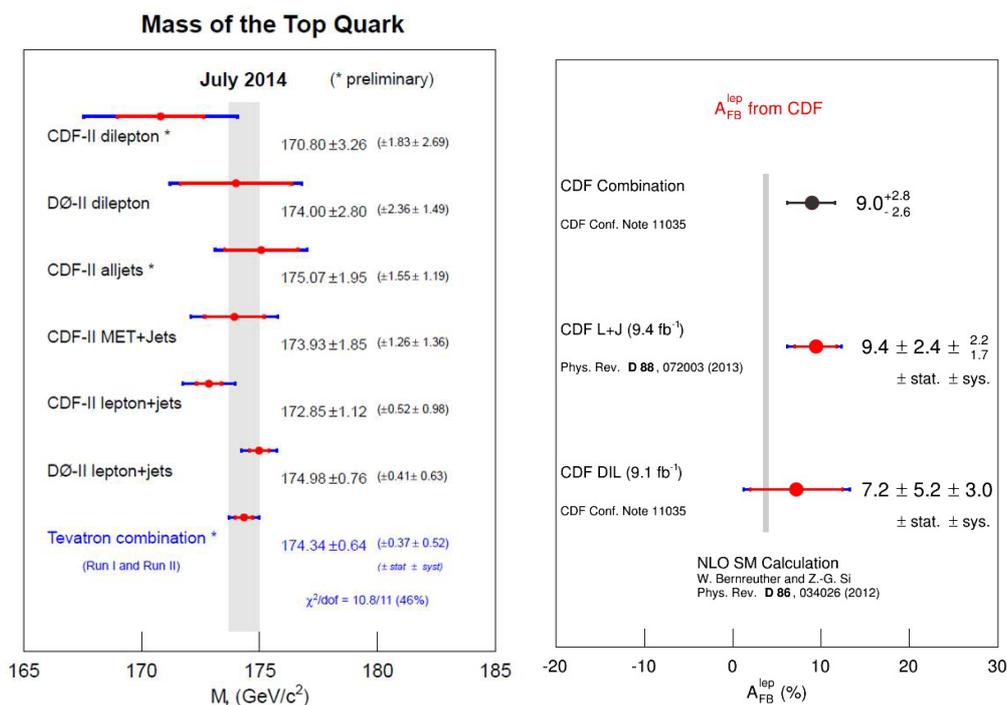


図 1: (左): CDF および D0 実験によるトップクォークの質量の測定。(右): CDF 実験でのトップクォーク対崩壊による荷電レプトンの前後方非対称度。

年度からは RUN-2 が始まる。重心系エネルギーが上がることにより、ヒッグス粒子の生成断面積が増大し、より統計精度をあげた測定が期待できる。

ATLAS 実験グループはこの間にヒッグス粒子の様々な粒子への崩壊断面積の測定を完了した。本グループは  $b$  クォーク対に崩壊するモードに対し、測定感度を上げた解析を実施した。また、2023 年以降は、LHC は設計値を超えた高輝度実験、HL-LHC 加速器に増強される予定である。放射線レベルも現在の検出器設計の 10 倍に達するため、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も継続している。

## (1) ヒッグス粒子の崩壊と結合定数

質量の起源とされるヒッグス粒子は 2012 年末に発見された。現在は、精密測定を通して、標準模型の枠組みどおりヒッグス粒子はすべての素粒子に質量を与えるのか、他にヒッグス粒子はあるのかについての研究を進めている。

ATLAS 実験による様々な粒子対へのヒッグス生成断面積の最新結果を図 2 にまとめる。 $W/Z$  ゲージ粒子に質量を与えることはヒッグスの発見により確立したが、今年度は初めてレプトン ( $\tau$ ) に対しても高い精度で質量を与えることが判明し、また、 $b$  対に崩壊する解析に重要な進展が得られた。クォーク ( $b$ ) に質量を与えるかに関しては、測定された中心値が低めであったために、十分な確立には至っていないが、標準模型との明らかな差異もない。再開する RUN-2 のデータにより明らかにしていく。

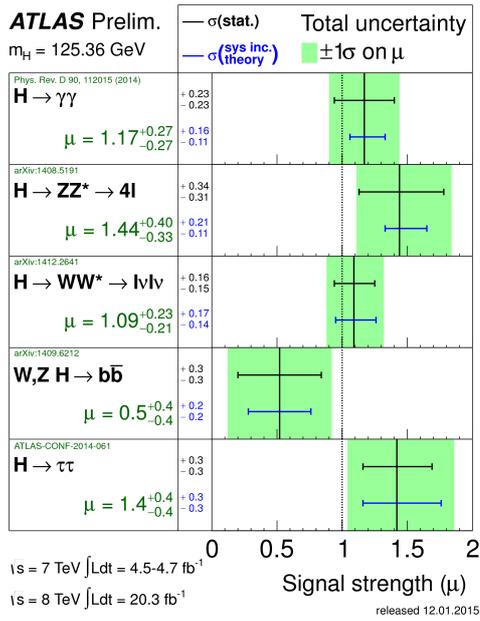


図 2: ATLAS によるヒッグス粒子の様々な粒子対への崩壊断面積測定の結果。値は標準模型での予想値で規格化したもの。

## (2) ヒッグスのフェルミオンとの結合

ヒッグスが  $W/Z$  粒子に質量を与えることはヒッグスの定義であるが、湯川結合によりフェルミ粒子にも質量を与えるかは標準模型の検証において最も重要なステップである。

レプトンに関する測定として、 $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  モードの測定感度を図 3 に示す。多変数解析による解析法の最適化により 2014 年度にこのモードでバックグラウンドを超過する有意な信号が得られた。生成断面積は、標準模型の生成断面積で規格化して  $\mu = 1.43^{+0.43}_{-0.37}$  である。これは統計的に  $4.5\sigma$  の有意度であり、 $\tau$  粒子に対してヒッグスが質量を与える重要な証拠であると見なせる。

クォークに対しては  $b$  が最も観測できる可能性が高い。QCD のバックグラウンドが多いため、 $H \rightarrow b\bar{b}$  単独ではなく、 $W/Z$  粒子が随伴されるモードで  $W$  や  $Z$  が崩壊して発生する高運動量のレプトンをトリガーにすることで探索した。このチャンネルでも多変数解析で信号/バックグラウンド比を最適化する解析法を用いた。図 4 は、この解析法で  $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在しない場合に、生成断面積に対してどの程度の制限を与えられるかを、期待値 (破線) およびその精度を  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  の帯として示している。点線は標準模型の  $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在する場合である。データはその中間 (黒点) に位置し、 $H \rightarrow b\bar{b}$  が存在するという統計的な有意度は  $125.36$  GeV/ $c^2$  の質量では  $1.4\sigma$  である。これは標準模型での期待値  $2.6\sigma$  を下回り、実際に  $H \rightarrow b\bar{b}$  生成断面積は標準模型で規格化して  $\mu = 0.52 \pm 0.32(\text{stat}) \pm 0.24(\text{syst})$  にとどまった。標準模型とは統計的に矛盾しないが、明らかな生成の証拠とは言えない。図 5 は  $b\bar{b}$  候補事象の不変質量分布を、ボゾン対 ( $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ ) 生成と標準模型から期待される分布と比較したものである。これは  $8$  TeV での衝突データであり一致度は良いが、 $7$  TeV のデータや他の探索モードも統合すると  $\mu = 0.52$  にとどまる。統計量を上げた測定が不可欠である。

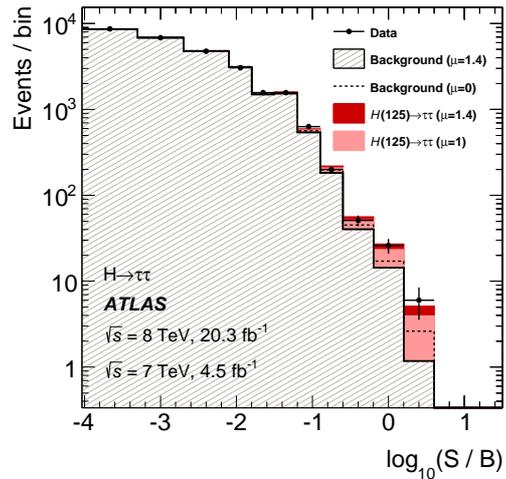


図 3:  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  候補事象数を多変数解析における信号期待量とバックグラウンド量の比の関数として示す。信号が期待できる正の領域でバックグラウンドのみより有意に多い事象数を示している。この新しい解析で統計的に  $4.5\sigma$  の有意度で  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  が観測された。

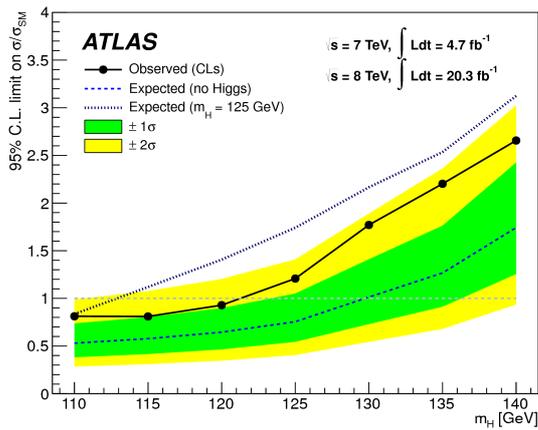


図 4:  $H \rightarrow b\bar{b}$  生成が存在しない場合の期待される生成断面積の上限値 (破線および  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  の領域)。標準模型 (点線) の期待に対して、測定値 (黒点) は中間に位置した。

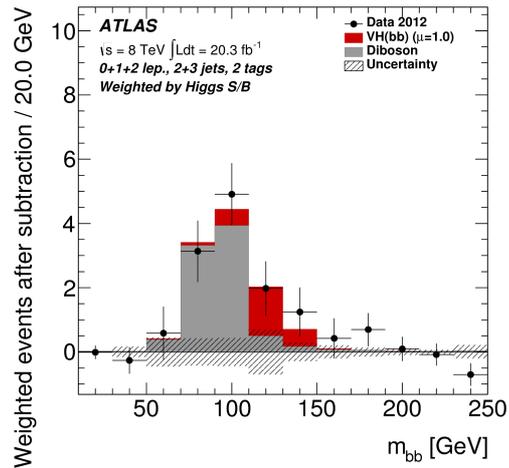


図 5:  $H \rightarrow b\bar{b}$  探索のために、ボゾン対生成以外のバックグラウンドを差し引いた  $b\bar{b}$  質量の分布と 8 TeV でのデータの比較。赤は標準模型で期待される  $H \rightarrow b\bar{b}$  分布。

### (3) ヒッグス粒子の質量

ヒッグス粒子の質量や生成断面積は標準模型の検証および標準模型を超える物理を示唆する場合に重要なパラメータとなる。ヒッグス粒子の質量について ATLAS と CMS を統合した測定を図 6 に示す。この質量の測定ではニュートリノ発生に伴う消失エネルギーのない  $H \rightarrow \gamma\gamma$  と  $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4l$  の崩壊モードだけに限って解析に用いた。ヒッグスの質量と生成断面積には相関があるため、図 7 には生成断面積の測定への依存性も示している。2つの解析モードの生成断面積の標準模型との比は共通であると仮定して、これらの質量値を同時にフィットした結果は  $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$  である。評価に用いた両グループの両モードでの値はこの統合値に統計的に矛盾しない。

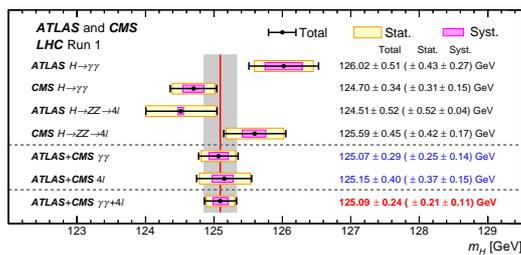


図 6: ATLAS と CMS によるヒッグス粒子質量の測定とその総合値。生成断面積は、標準模型との比が共通であると仮定している。

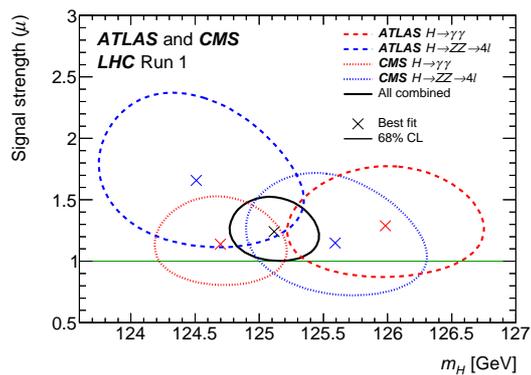


図 7: ATLAS と CMS によるヒッグス粒子質量と生成断面積の測定。

#### (4) ヒッグス以外の物理

超対称性粒子や標準模型を超える物理結果の重要なアップデートはない。トップ質量の測定結果に関して ATLAS は統合値を発表した。トップクォークは  $W + b$  に崩壊するが、質量値は、 $W$  の崩壊モード毎に質量を直接測定したもの、生成断面積から間接測定したものに分類されるが、これらをまとめると  $172.99 \pm 0.91 \text{ GeV}/c^2$  を得た。Tevatron での測定値は  $174.34 \pm 0.64 \text{ GeV}/c^2$  であり、中心値の差異に矛盾はなく、また、ATLAS は比較できる程度の測定精度を達成していると言える。

#### (5) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

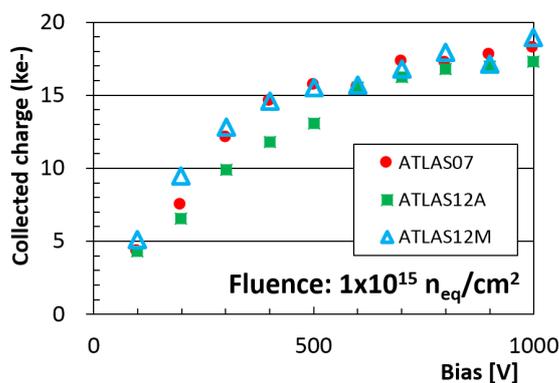


図 8: 通過する  $\beta$  線で評価した収集電荷量の電圧依存性。1 MeV 中性子に換算した粒子数  $10^{15}/\text{cm}^2$  での損傷を与えたサンプル。

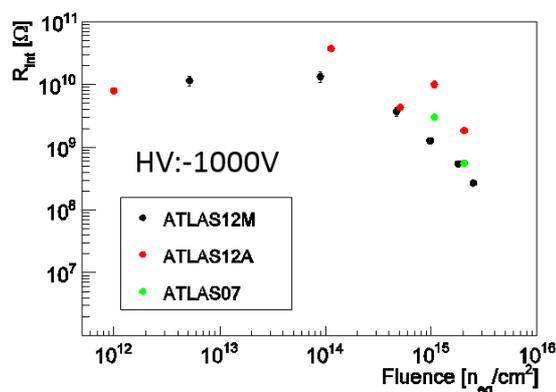


図 9: 電極間抵抗の照射量（中性子数換算）依存性。バイアス電圧は 1000 V。

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2023 年から当初設計値を超え、年間  $200\text{-}250 \text{ fb}^{-1}$  の衝突をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大するため、シリコン半導体検出器による新しい内部飛跡検出器の開発研究を継続して行った。

HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極、p 型基板を用いたセンサー ( $n^+$ -on-p) の開発を継続して行い、実際に陽子線や中性子を照射し、HL-LHC の高放射線線量でも使用可能な設計をしている。

最内層は電極サイズが  $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$  のピクセル型、外層は、 $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$  のストリップ型で、それぞれ最大  $2 \times 10^{16}$ 、 $1 \times 10^{15}$  1-MeV  $n_{eq}/\text{cm}^2$  を受けても使用可能であると証明した。

図 8 は東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームをストリップ型サンプルに照射して貫通する  $\beta$  線に対して収集できる電荷量を評価したものである。サンプルは旧設計 (ATLAS07)、新設計 (ATLAS12A, M) にかかわらず、ウェハの初期抵抗で振舞いに違いがあるが、電圧を上げることで収集電荷量は増加する。ノイズは 500 電子程度であるので、最大照射量を浴びても十分な電荷を収集できる。収集電荷量の減少は、損傷によりキャリアのトラップが増えるためであるが、移動度の高い電子を収集する p 型基板ではこの影響が少ないことが利点として挙げられる。

バルク基板の損傷に対して表面の損傷は様々な影響を与える。例えば電極間抵抗が低下するとクロストークが増えるが、図 9 は電極間抵抗を照射量の関数として測定したものであ

る。照射量とともに劣化が見られるが、クロストークの基準を決めるバイアス抵抗 (1.5 M $\Omega$ ) と比較して充分に高いので問題はない。電極間抵抗は測定温度やバイアス電圧により変わるが、変化の主要因は、バルク損傷による暗電流の増加であることを明らかにした。これにより、センサーの表面自体に電極間抵抗を変化させる損傷が発生するのはなく、測定方法に起因する影響と理解できる。しかしながら暗電流の影響により実効的な抵抗が低下するために、運転温度に対する要求などを明確にしていく必要がある。

p型基板を用いたピクセル型センサーも試作し、DESYの電子ビームを用いて性能評価を継続した。

### 【3】 SOI技術を用いた読み出し回路一体型ピクセル検出器

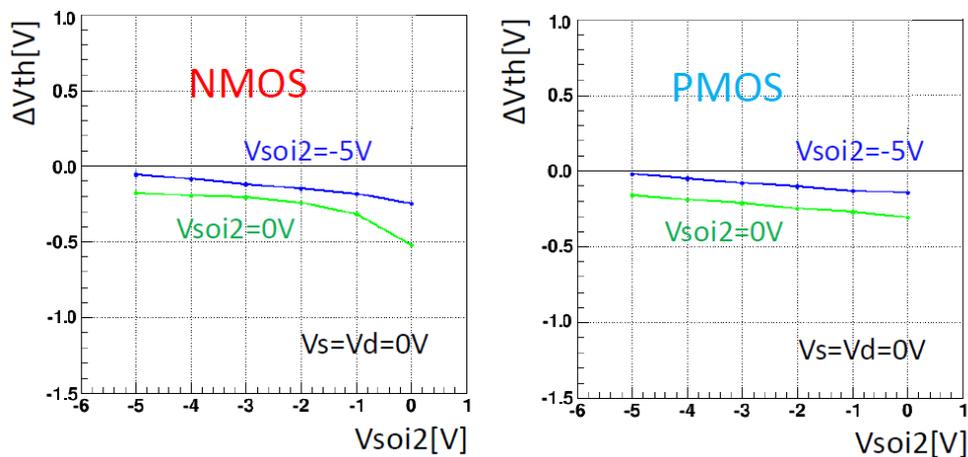


図 10: ガンマ線照射中に SOI2 層へ 0 V, 5 V の電圧をかけた場合の FET 閾値電圧の照射前からの変動。横軸は照射後の FET 評価時に加えた SOI2 電圧の値。(左) NMOS, (右) PMOS。

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器である。我々は Lapis セミコンダクター社の 0.20  $\mu\text{m}$  SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で、将来の加速器実験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく高速応答が期待できるが、一方、正孔を酸化膜に蓄積しやすく、電離性放射線線量 (TID) が増えると蓄積電荷の影響を受けて近傍のトランジスタ特性が大きく変化することを明らかにしてきた。そこで SOI の素粒子実験への適用を可能にするため、埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 重 SOI 基板を世界で初めて製作し、評価を継続している。粒子センサー基板の上に 2 重の埋め込み酸化膜層を形成し、その中間シリコン層 (SOI2) に TID 損傷による劣化に応じて負の電荷を加えることで TID 損傷を補償することを目指している。

トランジスタに  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線を照射して、トランジスタ特性変化の線量依存性を測定し、SOI2 に適切な負の電圧を加えることで原理的に SOI2 センサーを 1 MGy を越えて作動させられることを初めて示した。2014 年度は、特に照射中の SOI2 への電圧の有無による劣化の差異を評価した。図 10 は照射中に SOI2 に 0 V または -5 V を印可して 100 kGy の照射を行った後に、SOI2 に 0 V から -5 V を加えながらトランジスタの閾値電圧を測定したものである。SOI2 に電圧を加えながら照射した場合の方が閾値の変動が NMOS, PMOS ともに低減されることが分かる。

ピクセル回路には、様々なタイプのトランジスタが使われているので、個別に SOI2 電圧を調整するのではなく、依存性の大小に応じてグループ分けをして調整することは現実的である。2014 年度までに作成したものはすべて単一の SOI2 電圧設定をするものであり、完全な TID 補償が達成できず、センサーの作動点に変化しながらも未照射と同レベルの応答を示すことが分かってきた。

図 11 は積分型ピクセルセンサー INTPIXh2 のあるピクセル中央に焦点をあてて入射した赤外レーザーの応答を測定したものである。クロストークにより隣接ピクセルに信号が漏れ、その効果はセンサーが空乏化していない低バイアス電圧で顕著である。照射後には SOI2 に電圧を加える (加えないと信号は見られない) と低バイアスでのクロストークは低減している。これはピクセル間の酸化膜に正孔が蓄積され直下に電子層が形成され p 型のピクセル端子間の抵抗を高くしたものと解釈できる。

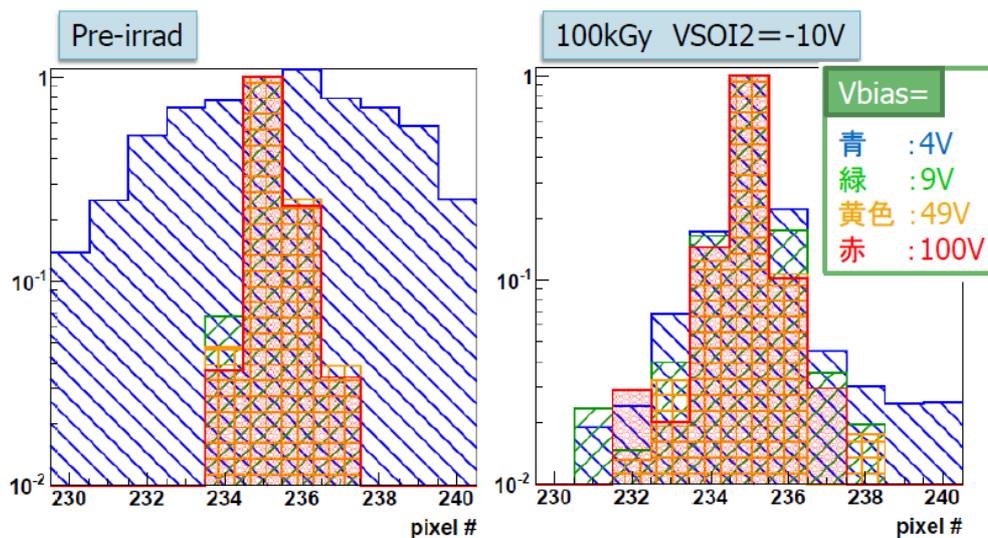


図 11: ある (235 番目) ピクセル中央に赤外レーザーを入射した場合の隣接ピクセルからの応答 (2重 SOI, 100  $\mu\text{m}$  厚)。バイアス電圧を変化させて測定している。(左) 未照射, (右) 100 kGy 照射 (-10 V の SOI2 電圧)。

また、図 12 はレーザーの時間応答を測定することで、INTPIXh2 回路の時間応答を初めて測定したものである。レーザーの約 50 ns の信号幅に対して 150 ns の応答が得られ、ピーク位置も約 40 ns で十分に速い。

電荷積分に波形整形回路を通したピクセル (PIXOR) に対し、照射により各部分の応答がどのように変化し SOI2 電圧の印可でどのように補償できるかを評価した。図 13 は、整形

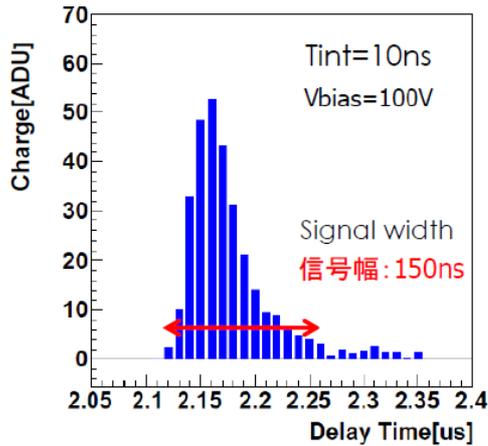


図 12: 信号幅が約 50 ns のレーザーパルスに対する積分型センサーの応答。ピークは 40 ns であり十分に速い信号処理が可能である。

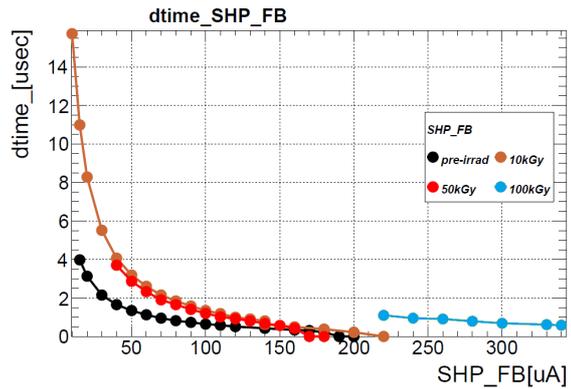


図 13: 2重 SOI 電荷積分+波高整形回路の出力幅を整形回路帰還電流を変えて測定。100 kGy 照射を受けても帰還電流を調整することで速い信号幅を維持できる。

回路を通した信号幅を、帰還電流を変えて測定したものである。帰還電流を増やすことで回路応答は速くなり、100 kGy 照射後でも未照射に近い高速応答性を示すことが明らかにされた。この素子は BELL-2 実験を想定した素子であるが、初めて SOI 素子とその放射線環境でも作動することを実証した。

この経験を受けて国際リニア衝突器 ILC に使用できる素子の開発を継続している。これは新学術科研費の資金を使用し 2017 年までに完成させる計画で進めている。

#### 【4】 ILC 実験

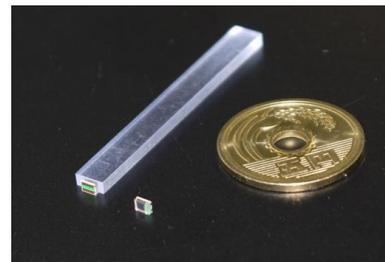
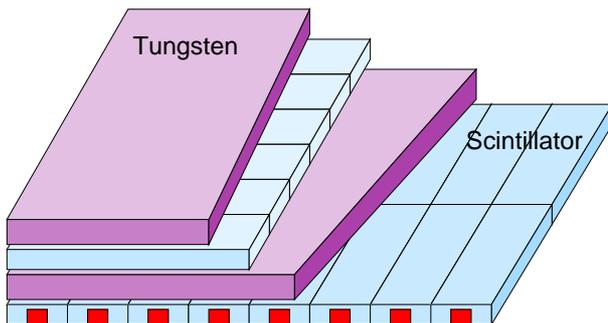


図 14: ILC (ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、シンチレータストリップ (43.5 mm × 5 mm × 2 mm) を横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。

次世代のエネルギーフロンティアにおける素粒子実験を遂行するため、重心系エネルギー 500 GeV の電子・陽電子衝突型線形加速器を建設する計画が提案されている。素粒子である電子を衝突に用いるので、加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ、ま

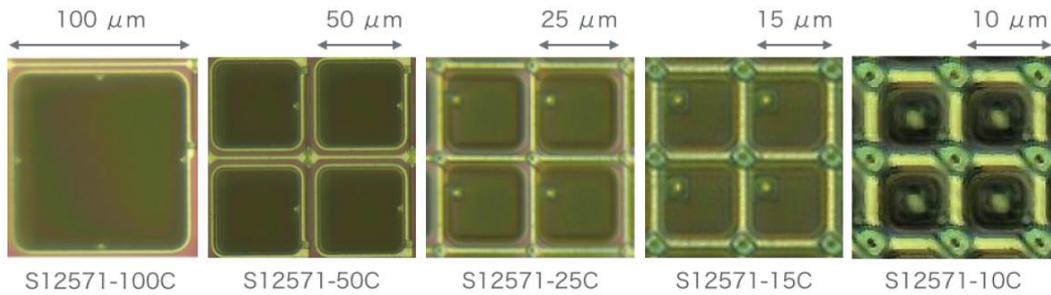


図 15: さまざまなピクセル数を持つ新型 MPPC の写真。

た背景事象の少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる。国際協力により進められているこの計画は ILC 計画と名付けられ、参加各国の大学や研究機関で精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている。計画では、その第一期において、重心系エネルギー 250 GeV からスタートし、500 GeV まで増強する。そして、第二期において重心系エネルギー 1 TeV までの加速器増強が想定されている。

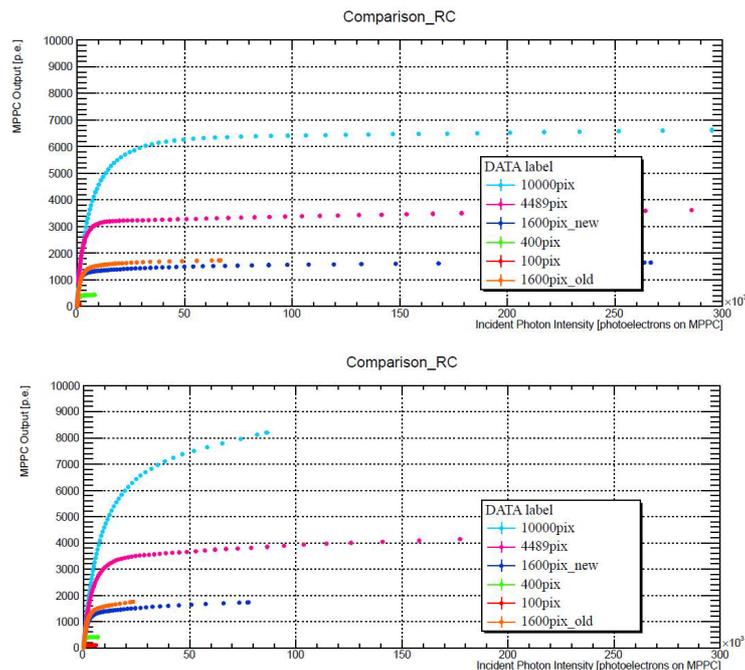


図 16: 新型の MPPC の出力応答の入射光量依存性。(上) : MPPC 単体にレーザー光を照射したもの。(下) : MPPC とシンチレータを組み合わせ、レーザー光を照射したもの。ピクセル数の増加に伴い、応答範囲が大きく向上している。

ILC 実験では、ゲージボソンやトップクォーク、ヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネギーを精密に測定することが非常に重要となる。ジェットに対するエネギー分解能は、 $\sigma(E)/E = 0.3/\sqrt{E(\text{GeV})}$  が要求されており、この要求値を実現する



図 17: 新型 MPPC の写真。トレンチ構造を持たないもの（左）と持つもの（右）。ピクセル境界部の黒く見える部分がトレンチ。

ため、Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネルギー測定方法が提唱されている。この方法を用いるには、カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネルギー分解能に加え、非常に細かいセルに分割された構造を有することが要求される。

現在筑波大学グループでは、信州大、九州大、新潟大等と共同で、ILC 実験において検討される検出器候補のひとつILD 検出器のうち、電磁カロリメータ (ECal) の研究開発を行っている。ILD の電磁カロリメータでは、候補の一つとしてシンチレータとタングステン板を積層構造にしたサンプリング型のものが考えられている (図 14)。

シンチレータは非常に細かいセル構造を持つため、読み出しチャンネル数が膨大となり、また磁場中に設置されることから、光センサーは非常にコンパクト且つ低コストで磁場の影響を受けないという特徴を持つ必要がある。これを果たすのは、現状では新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) がほぼ唯一の解である。

カロリメータの性能としてエネルギー分解能が重要であるが、それを決める要因に光センサーの検出効率と線形応答性がある。我々は、これまで、様々な仕様の MPPC を使い、さまざまな特性の測定・評価を行ってきた。2014 年度には、前年度から継続して、浜松ホトニクスにより開発された新型の MPPC の性能を評価した。この新型 MPPC では、クエンチング抵抗をポリシリコンから金属に変更することによってより微細な加工が可能となり、不感領域の減少とピクセルサイズの微小化、それに伴うピクセル数の増加 (最大 10,000 ピクセル) を実現している (図 15)。これらは、検出効率と応答線形性の向上につながると期待されるが、実際に測定を行い評価した。ピクセル数 100, 400, 1600, 4489, 10000 を持つ新型 MPPC の線形応答性を図 16 (上) に示す。これは MPPC 単体に速いパルスレーザー光を照射したものである。より実際の検出器に近づけた形として、シンチレータと MPPC を組み合わせたものにレーザー光を照射した場合の応答が図 16 (下) である。いずれの場合もピクセル数の増加により応答範囲が拡大していることが判る。また、シンチレータ光の場合には、範囲はさらに拡大している。

新型 MPPC は、さらなる改良として、ピクセル間にトレンチと呼ばれる構造体を導入したものが開発された (図 17)。これにより、チャンネル間のクロストーク、ノイズ発生率、アフターパルスなどが減少すると期待される。実際に測定すると、これらが大幅に改善していることが判った (図 18)。特に、クロストークは、ほぼ無視できるレベルになっている。

また、これらの基礎データをもとにしてシンチレータストリップの形状、MPPC の仕様の最適化を図るとともに、単一光子を入射した場合についてカロリメータの現実的なシミュレーションを行い、エネルギー分解能や応答線形性など、検出器としての最終的な性能を評価した。

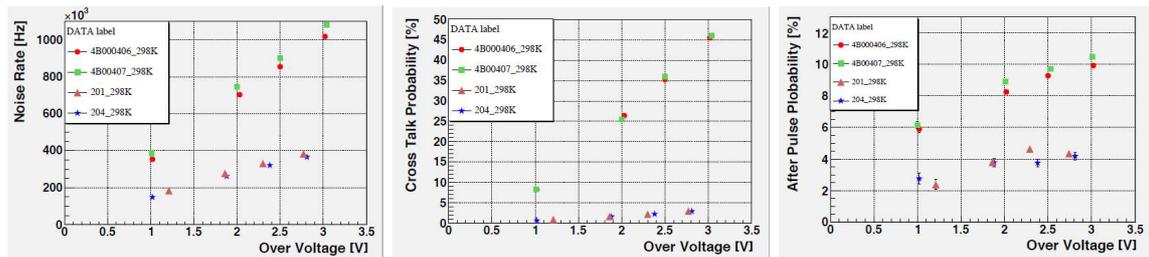


図 18: 新型 MPPC のトレンチ構造の有無による特性の比較。(左) : ノイズ発生率, (中) : クロストーク率, (右) : アフターパルス率。いずれもトレンチの導入により大幅に向上している。

## 【5】 超伝導赤外線検出器の開発

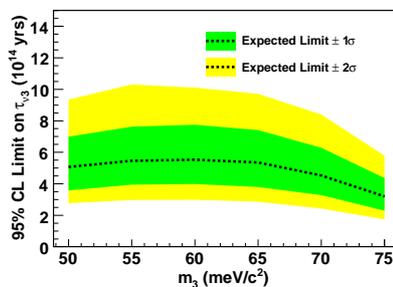


図 19: シミュレーションによる宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験で期待されるニュートリノ寿命下限値の分布。仮定したニュートリノ質量の関数としてあたえられている。直径 15 cm, 焦点距離 1 m の主鏡, および  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 8$  の受光面積の検出器を焦点位置に備えたロケット実験で 200 秒の測定を仮定。

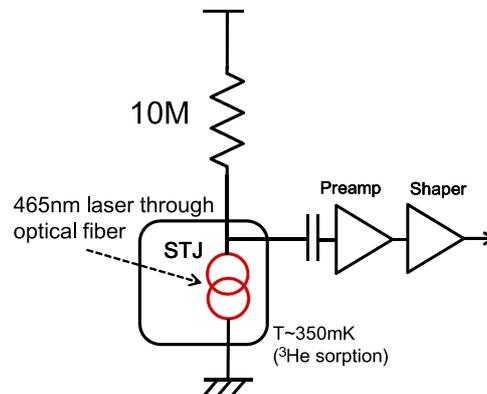


図 20: STJ の光パルス応答を電荷積分型アンプで読み出す回路。室温に置かれた電荷積分型プリアンプおよびシェーパーアンプからなる。

過去 10 数年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界でひろく行われてきた。これは超伝導体が半導体と比較してはるかに小さいエネルギーバンドギャップを有することを利用して、半導体検出器などの既存の光検出器に比べてエネルギー分解能がはるかに高い光検出器を原理的に実現できることが強い動機となっている。このことから、高エネルギー分解能の X 線検出器や赤外線検出器への応用を目指して開発が進められてきた。

本開発研究では、ニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標として従来用いられている Nb (超伝導ギャップエネルギー  $\Delta = 1.55 \text{ meV}$ ,  $T_c = 9.23 \text{ K}$ ) を用いた Nb/Al-STJ やさらに  $\Delta$  の小さい Hf ( $\Delta = 0.020 \text{ meV}$ ,  $T_c = 0.165 \text{ K}$ ) を超伝導素材として用い、遠赤外線領域 ( $E_\gamma \sim$  数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数%の精度で測定するための超伝導体検出器 (STJ) の開発を目指している。

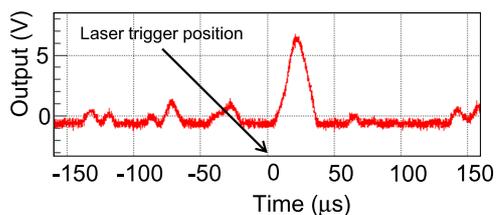


図 21: 産総研の CRAVITY で作製された  $100 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ の光パルス応答。光パルスは、可視光 ( $465 \text{ nm}$ ) のレーザーを用いた。STJ でレーザートリガー位置に検出された応答は、およそ 4 光子程度に相当。

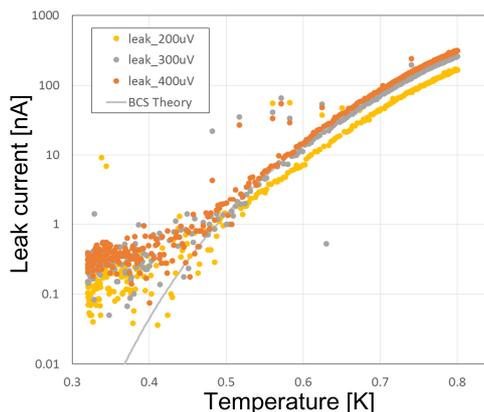


図 22: 産総研の CRAVITY で作製された  $50 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ の漏れ電流の温度依存性。

宇宙論により存在が予言されている宇宙背景ニュートリノが崩壊する際に発生する光子は、例えば重いニュートリノ ( $\nu_3$ ) の質量を  $\sim 50 \text{ meV}$  と仮定すると波長が  $50 \mu\text{m}$  (エネルギー  $25 \text{ meV}$ ) となる。我々は、宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションの結果から波長  $50 \mu\text{m}$  の光子一つ一つに対してエネルギー分光が可能な光検出器を用いてロケット実験により宇宙空間において 200 秒の測定で、現在のニュートリノ寿命下限値  $3 \times 10^{12}$  年を二桁改善できる可能性を示した (図 19)。

2007 年 1 月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学、KEK、理研の共同研究によって、Hf-STJ 開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法の確立を行い、2010 年度には、Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf による SIS 構造の作成に成功し、ジョセフソン電流を確認、2012 年度に Hf-STJ 試作サンプルでの可視光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認している。現在は、可視パルス光入射に対するパルス応答の確認、およびリーク電流の改善が課題である。

Hf-STJ 開発と並行して、既に作成方法の確立している Nb/Al-STJ を用いた一光子分光検出器の開発も行っている。Nb/Al-STJ 単体では、 $25 \text{ meV}$  の光子に対して十分なエネルギー分解能は期待できないが、一光子計数が実現できれば回折格子と組み合わせると Nb/Al-STJ のピクセルをアレイ状並べることでエネルギー分光能力を得ることが可能となる。Nb/Al-STJ では、室温アンプを用いた読み出しにおいて可視光～近赤外までの一光子検出、一光子分光の報告例がある。我々も、過去の年次報告で述べてきたように、これまでに室温アンプを用いた読み出しを試み、電荷積分型アンプでの可視光数光子の読み出しまでは達成している (図 20, 図 21) が、読み出し系のノイズ、および Nb/Al-STJ の漏れ電流等の要因により、一光子検出には至っていない。

これらの問題を解決するために、産総研との共同研究による産総研 CRAVITY で作製された漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに Nb/Al-STJ 極低ノイズ読み出し系として、極低温で動作する SOI (Silicon On Insulator) プロセスによるアンプおよび、SOI 上に直接 STJ を形成する SOI-STJ の開発も行っている。CRAVITY で作製された  $50 \mu\text{m}$  角の Nb/Al-STJ サンプルでは、 $300\text{mK}$  において漏れ電流  $200\text{pA}$  を示した (図 22)。我々の要求する性能は、 $25 \text{ meV}$  の一光子を  $30 \text{ Hz}$  以下のダークカウントレートで計数することであるが、そのために漏れ電流は、 $100 \text{ pA}$  以下である必要がある。漏れ電流がトンネル接合面の面積に比例すると仮定すると、この要求の達成は、十分可能であると期待される。SOI に

よる読み出し回路に関しては、SOI 上の MOSFET が STJ の動作温度においてトランジスタとして機能することが確認されたことは、既に昨年度において報告した。現在は、実際の STJ の信号読み出しに使用可能な高速、且つ低消費電力の電荷積分アンプを設計中である。

## 【6】 ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視

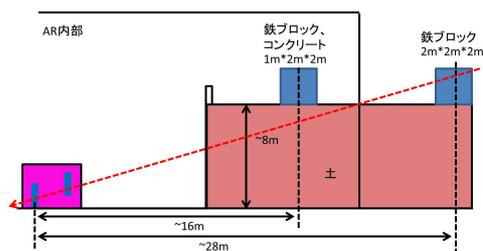


図 23: 測定セットアップの概略図。地下に設置された検出器（ピンク）から地上の鉄ブロック標的（青）を測定することにより、ミューオンが地中を長く通る条件で測定を行った。

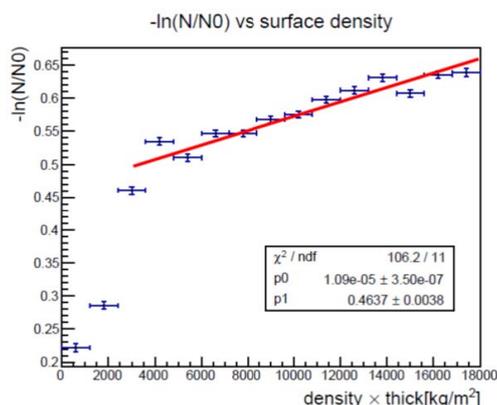


図 24: 通過した物質質量に対するミューオン透過率の依存性。物質質量が  $4,000 \text{ kg/m}^2$  から  $18,000 \text{ kg/m}^2$  の範囲では透過率は指数関数で減少し、一つの吸収係数で表される。

宇宙線  $\mu$  粒子を使って、原子炉などの大規模構造体内部構造の透視の研究を行った。これは福島原子炉事故を受けて、高エネルギー加速器研究機構らと協力して、2011年秋から準備を始めたものである。2012年3月には  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  の有感面積をもつシンチレータ面（1 cm 幅のシンチレータバーを縦横に 100 本ずつ並べたもの）4 セットからなる検出器を実際の原子炉に設置して実証実験を開始した。シンチレータ光を波長変換ファイバーで取り出し MPPC で読み出す方式は、本研究室が開発してきた技術であり、FPGA による読み出し回路の構成など高エネルギー実験の技術を応用している。

2013年12月まで炉心から 64 m 離れた 3 地点で測定を行い、このデータを用い、位置と大きさの特定された使用済み燃料プールの場所と、核燃料、および原子炉格納容器の外形形状を 18 度ごとの異なった視点で再構成した結果、核燃料と考えられる重い物質、使用済み燃料プール及び格納容器に対応するイメージを得た。この結果については PTEP 論文（2013年7月）で報告し、さらに 2014年1月に全データ解析の結果を公表するプレスリリースを行い、新聞各紙（朝日、毎日、日経等）で報道された。

2014年度には、福島第一原子力発電所で、実際に原子炉において炉心融解が起こったときに燃料が溶け落ちていることを想定し、ミューオン透過法検出器を地下に設置し、地中を通った場合でも、物体の位置、密度の見積もりが可能かどうか検証した。2014年8月25日から2014年12月15日の間、高エネルギー加速器研究機構の AR 南実験棟に検出器と鉄ブロック標的を図 23 のように、ミューオンが地中を多く通るように設置し、標的の位置、大きさ、種類を変えて測定を行なった。

このデータを用い、通過した物質質量に対するミューオン透過率の依存性を測定した。厚

さ  $x$ , 密度  $\rho$  の物質を通過するミュオンレートの  $N(x)$  は  $\rho x$  の指数関数で減少する場合、吸収係数  $\mu$  を用いて  $N(x) = N_0 \exp(-\mu\rho x)$  と表される。測定結果は図 24 のように、物質質量  $\rho x$  が  $4,000 \text{ kg/m}^2$  (厚さ 2.2 m の土に相当) と  $18,000 \text{ kg/m}^2$  (厚さ 10 m の土に相当) の範囲では、透過率  $N(x)/N_0$  は指数的に減少し、一つの吸収係数  $\mu$  で表されることがわかり、 $\mu = (1.09 \pm 0.04) \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$  が得られた。鉄ブロック標的を、この範囲に置いて測定を行った結果、図 25 に示す通り、鉄ブロック標的を通過するときの、通過した鉄の物質質量に対するミュオン透過率の依存性が得られた。この測定の結果、鉄の比重として  $\rho = 8.3 \pm 1.0 \text{ g/cm}^3$  が得られ、これより 30 日間の測定で鉄の比重を 12% の精度で測定できることを検証した。

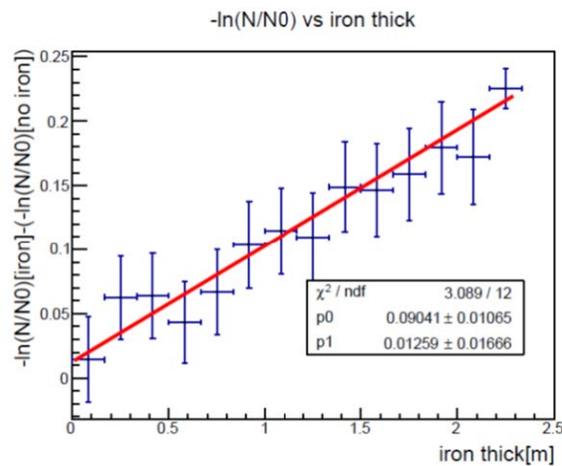


図 25: 鉄ブロック標的を通過するときの、通過した鉄の物質質量に対するミュオン透過率の依存性。

## 【7】 外部資金

1. 科学研究費 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」 2013 – 2017 年度  
計画研究 B02：「宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発」，研究代表者：金 信弘，研究分担者：武内勇司  
14,950 千円（直接経費 11,500 千円，間接経費 3,450 千円）（2014 年度）
2. 科学研究費 基盤研究 (C)「ハドロン衝突における重いクォーク生成の研究」 2013 – 2015 年度，研究代表者：受川 史彦  
1,690 千円（直接経費 1,300 千円，間接経費 390 千円）（2014 年度）
3. 科学研究費 基盤研究 (C)「アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定」 2013 – 2015 年度，研究代表者：原 和彦  
1,174 千円（直接経費 904 千円，間接経費 270 千円）（2014 年度）
4. 科学研究費 新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦」 2011 – 2015 年度  
計画研究 A01：「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」，研究分担者：受川 史彦  
10,000 千円（直接経費：10,000 千円，間接経費：3,000 千円）（2014 年度）
5. 科学研究費 新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」 2013 – 2017 年度  
計画研究 C01：「高輝度加速器実験のための素粒子イメージング」，研究分担者：原 和彦  
8,190 千円（直接経費 6,300 千円，間接経費 1,890 千円）（2014 年度）
6. 日米科学技術協力事業「ニュートリノ崩壊探索」  
共同研究（日本側参加機関：筑波大物理，宇宙航空研究開発機構，高エネルギー加速器研究機構，岡山大理，理化学研究所，福井大工，近畿大理工  
日本側研究代表者：金 信弘）  
物件費：3,000 千円，旅費：1,000 千円
7. KEK 大学等連携支援事業「筑波大 – KEK 連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて」  
共同代表者：守友 浩，金 信弘，末木啓介  
物件費：650 千円（STJ プロジェクト向け配分額）  
物件費：350 千円（SOI プロジェクト向け配分額）

## 【8】 研究発表

### (1) 原著論文

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Measurement of indirect CP-violating asymmetries in  $D^0 \rightarrow K^+K^-$  and  $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  decays at CDF,”  
 Phys. Rev. D **90**, no. 11, 111103 (2014) [arXiv:1410.5435 [hep-ex]].
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurement of the Top-Quark Mass in the All-Hadronic Channel using the full CDF data set,”  
 Phys. Rev. D **90**, no. 9, 091101 (2014) [arXiv:1409.4906 [hep-ex]].
  3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section and  $|V_{tb}|$  in Events with One Charged Lepton, Large Missing Transverse Energy, and Jets at CDF,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, no. 26, 261804 (2014) [arXiv:1407.4031 [hep-ex]].
  4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurement of the inclusive leptonic asymmetry in top-quark pairs that decay to two charged leptons at CDF,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, 042001 (2014) [arXiv:1404.3698 [hep-ex]].
  5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurement of  $B(t \rightarrow Wb)/B(t \rightarrow Wq)$  in Top-Quark-Pair Decays Using Dilepton Events and the Full CDF Run II Data Set,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, no. 22, 221801 (2014) [arXiv:1404.3392 [hep-ex]].
  6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Mass and lifetime measurements of bottom and charm baryons in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072014 (2014) [arXiv:1403.8126 [hep-ex]].
  7. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurements of Direct CP -Violating Asymmetries in Charmless Decays of Bottom Baryons,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, no. 24, 242001 (2014) [arXiv:1403.5586 [hep-ex]].
  8. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Measurement of the ZZ production cross section using the full CDF II data set,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 11, 112001 (2014) [arXiv:1403.2300 [hep-ex]].
  9. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Invariant-mass distribution of jet pairs produced in association with a  $W$  boson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV using the full CDF Run II data set,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 9, 092001 (2014) [arXiv:1402.7044 [hep-ex]].
10. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Study of Top-Quark Production and Decays involving a Tau Lepton at CDF and Limits on a Charged-Higgs Boson Contribution,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 9, 091101 (2014) [arXiv:1402.6728 [hep-ex]].
  11. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Observation of s-channel production of single top quarks at the Tevatron,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 231803 (2014) [arXiv:1402.5126 [hep-ex]].
  12. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Search for  $s$ -Channel Single-Top-Quark Production in Events with Missing Energy Plus Jets in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, no. 23, 231805 (2014) [arXiv:1402.3756 [hep-ex]].
  13. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Indirect measurement of  $\sin^2 \theta_W$  (or  $M_W$ ) using  $\mu^+\mu^-$  pairs from  $\gamma^*/Z$  bosons produced in  $p\bar{p}$  collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072005 (2014) [arXiv:1402.2239 [hep-ex]].
  14. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Evidence for  $s$ -channel Single-Top-Quark Production in Events with one Charged Lepton and two Jets at CDF,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 231804 (2014) [arXiv:1402.0484 [hep-ex]].
  15. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “First Search for Exotic Z Boson Decays into Photons and Neutral Pions in Hadron Collisions,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 111803 (2014) [arXiv:1311.3282 [hep-ex]].
  16. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Precise measurement of the  $W$  -boson mass with the Collider Detector at Fermilab,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072003 (2014) [arXiv:1311.0894 [hep-ex]].
  17. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Combination of measurements of the top-quark pair production cross section from the Tevatron Collider,”  
 Phys. Rev. D **89**, no. 7, 072001 (2014) [arXiv:1309.7570 [hep-ex]].

18. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Search for new physics in trilepton events and limits on the associated chargino-neutralino production at CDF,”  
 Phys. Rev. D **90**, no. 1, 012011 (2014) [arXiv:1309.7509 [hep-ex]].
19. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],  
 “Study of orbitally excited  $B$  mesons and evidence for a new  $B\pi$  resonance,”  
 Phys. Rev. D **90**, no. 1, 012013 (2014) [arXiv:1309.5961 [hep-ex]].
20. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for neutral Higgs bosons of the minimal supersymmetric standard model in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1411**, 056 (2014) [arXiv:1409.6064 [hep-ex]].
21. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for nonpointing and delayed photons in the diphoton and missing transverse momentum final state in 8 TeV  $pp$  collisions at the LHC using the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 112005 (2014) [arXiv:1409.5542 [hep-ex]].
22. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for pair and single production of new heavy quarks that decay to a  $Z$  boson and a third-generation quark in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1411**, 104 (2014) [arXiv:1409.5500 [hep-ex]].
23. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive  $Z$ -boson production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3195 (2014) [arXiv:1409.3433 [hep-ex]].
24. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of long-range pseudorapidity correlations and azimuthal harmonics in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. C **90**, 044906 (2014) [arXiv:1409.1792 [hep-ex]].
25. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for long-lived neutral particles decaying into lepton jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1411**, 088 (2014) [arXiv:1409.0746 [hep-ex]].
26. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in  $pp$  collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 112015 (2014) [arXiv:1408.7084 [hep-ex]].

27. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “A measurement of the ratio of the production cross sections for  $W$  and  $Z$  bosons  
 in association with jets with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3168 (2014) [arXiv:1408.6510 [hep-ex]].
28. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at  
 $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Nucl. Phys. B **889**, 486 (2014) [arXiv:1408.5778 [hep-ex]].
29. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for the lepton flavor violating decay  $Z \rightarrow e\mu$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV  
 with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 072010 (2014) [arXiv:1408.5774 [hep-ex]].
30. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of flow harmonics with multi-particle cumulants in Pb+Pb collisions  
 at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3157 (2014) [arXiv:1408.4342 [hep-ex]].
31. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Fiducial and differential cross sections of Higgs boson production measured in the  
 four-lepton decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **738**, 234 (2014) [arXiv:1408.3226 [hep-ex]].
32. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new resonances in  $W\gamma$  and  $Z\gamma$  final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV  
 with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **738**, 428 (2014) [arXiv:1407.8150 [hep-ex]].
33. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momen-  
 tum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1409**, 037 (2014) [arXiv:1407.7494 [hep-ex]].
34. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for Scalar Diphoton Resonances in the Mass Range 65 – 600 GeV with the  
 ATLAS Detector in pp Collision Data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, 171801 (2014) [arXiv:1407.6583 [hep-ex]].
35. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurements of jet vetoes and azimuthal decorrelations in dijet events produced  
 in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3117 (2014) [arXiv:1407.5756 [hep-ex]].
36. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the production cross-section of  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+\mu^-) \pi^+\pi^-$  in

- pp* collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV at ATLAS,”  
 JHEP **1409**, 79 (2014) [arXiv:1407.5532 [hep-ex]].
37. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3071 (2014) [arXiv:1407.5063 [hep-ex]].
  38. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurements of spin correlation in top-antitop quark events from proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 112016 (2014) [arXiv:1407.4314 [hep-ex]].
  39. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurements of fiducial and differential cross sections for Higgs boson production in the diphoton decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with ATLAS,”  
 JHEP **1409**, 112 (2014) [arXiv:1407.4222 [hep-ex]].
  40. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the muon reconstruction performance of the ATLAS detector using 2011 and 2012 LHC proton-proton collision data,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3130 (2014) [arXiv:1407.3935 [hep-ex]].
  41. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of differential production cross-sections for a  $Z$  boson in association with  $b$ -jets in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1410**, 141 (2014) [arXiv:1407.3643 [hep-ex]].
  42. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for contact interactions and large extra dimensions in the dilepton channel using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3134 (2014) [arXiv:1407.2410 [hep-ex]].
  43. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Flavor tagged time-dependent angular analysis of the  $B_s \rightarrow J/\psi\phi$  decay and extraction of  $\Delta\Gamma$ s and the weak phase  $\phi_s$  in ATLAS,”  
 Phys. Rev. D **90**, 052007 (2014) [arXiv:1407.1796 [hep-ex]].
  44. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Observation of an Excited  $B_c^\pm$  Meson State with the ATLAS Detector,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, 212004 (2014) [arXiv:1407.1032 [hep-ex]].
  45. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the cross-section of high transverse momentum vector bosons reconstructed as single jets and studies of jet substructure in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 New J. Phys. **16**, 113013 (2014) [arXiv:1407.0800 [hep-ex]].

46. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair-produced third-generation squarks decaying via charm quarks or in compressed supersymmetric scenarios in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **90**, 052008 (2014) [arXiv:1407.0608 [hep-ex]].
47. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with large missing transverse momentum, jets, and at least one tau lepton in  $20 \text{ fb}^{-1}$  of  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector,” JHEP **1409**, 103 (2014) [arXiv:1407.0603 [hep-ex]].
48. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for strong production of supersymmetric particles in final states with missing transverse momentum and at least three  $b$ -jets at  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1410**, 24 (2014) [arXiv:1407.0600 [hep-ex]].
49. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1411**, 118 (2014) [arXiv:1407.0583 [hep-ex]].
50. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of normalized differential cross sections for  $t\bar{t}$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **90**, 072004 (2014) [arXiv:1407.0371 [hep-ex]].
51. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the direct production of charginos, neutralinos and staus in final states with at least two hadronically decaying taus and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1410**, 96 (2014) [arXiv:1407.0350 [hep-ex]].
52. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Comprehensive measurements of  $t$ -channel single top-quark production cross sections at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **90**, 112006 (2014) [arXiv:1406.7844 [hep-ex]].
53. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A neural network clustering algorithm for the ATLAS silicon pixel detector,” JINST **9**, P09009 (2014) [arXiv:1406.7690 [hep-ex]].
54. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson decay to  $\mu^+\mu^-$  with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **738**, 68 (2014) [arXiv:1406.7663 [hep-ex]].

55. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section using  $e\mu$  events with  $b$ -tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 3109 (2014) [arXiv:1406.5375 [hep-ex]].
56. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for  $WZ$  resonances in the fully leptonic channel using  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **737**, 223 (2014) [arXiv:1406.4456 [hep-ex]].
57. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Higgs boson mass from the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  channels with the ATLAS detector using 25 fb $^{-1}$  of  $pp$  collision data,” *Phys. Rev. D* **90**, 052004 (2014) [arXiv:1406.3827 [hep-ex]].
58. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $Z/\gamma^*$  boson transverse momentum distribution in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1409**, 145 (2014) [arXiv:1406.3660 [hep-ex]].
59. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive jet charged-particle fragmentation functions in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **739**, 320 (2014) [arXiv:1406.2979 [hep-ex]].
60. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct pair production of the top squark in all-hadronic final states in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1409**, 015 (2014) [arXiv:1406.1122 [hep-ex]].
61. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the underlying event in jet events from 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2965 (2014) [arXiv:1406.0392 [hep-ex]].
62. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collision data,” *JHEP* **1409**, 176 (2014) [arXiv:1405.7875 [hep-ex]].
63. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Light-quark and gluon jet discrimination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 3023 (2014) [arXiv:1405.6583 [hep-ex]].
64. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for Electroweak Production of  $W^\pm W^\pm jj$  in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV

- with the ATLAS Detector,”  
 Phys. Rev. Lett. **113**, 141803 (2014) [arXiv:1405.6241 [hep-ex]].
65. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for supersymmetry in events with four or more leptons in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$   
 collisions with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 052001 (2014) [arXiv:1405.5086 [hep-ex]].
66. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for microscopic black holes and string balls in final states with leptons and  
 jets with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
 JHEP **1408**, 103 (2014) [arXiv:1405.4254 [hep-ex]].
67. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for high-mass dilepton resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the  
 ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. D **90**, 052005 (2014) [arXiv:1405.4123 [hep-ex]].
68. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the centrality and pseudorapidity dependence of the integrated  
 elliptic flow in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 2982 (2014) [arXiv:1405.3936 [hep-ex]].
69. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Monitoring and data quality assessment of the ATLAS liquid argon calorimeter,”  
 JINST **9**, P07024 (2014) [arXiv:1405.3768 [hep-ex]].
70. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker,”  
 JINST **9**, P08009 (2014) [arXiv:1404.7473 [hep-ex]].
71. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the cross section of high transverse momentum  $Z \rightarrow b\bar{b}$  production  
 in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector,”  
 Phys. Lett. B **738**, 25 (2014) [arXiv:1404.7042 [hep-ex]].
72. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  production with  $\sqrt{s} = 7$  TeV  $pp$  collisions at ATLAS,”  
 JHEP **1407**, 154 (2014) [arXiv:1404.7035 [hep-ex]].
73. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Muon reconstruction efficiency and momentum resolution of the ATLAS experiment  
 in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV in 2010,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 3034 (2014) [arXiv:1404.4562 [hep-ex]].
74. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for supersymmetry at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in final states with jets and two same-  
 sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1406**, 035 (2014) [arXiv:1404.2500 [hep-ex]].

75. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron reconstruction and identification efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2011 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2941 (2014) [arXiv:1404.2240 [hep-ex]].
76. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the low-mass Drell-Yan differential cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 112 (2014) [arXiv:1404.1212 [hep-ex]].
77. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the parity-violating asymmetry parameter  $\alpha_b$  and the helicity amplitudes for the decay  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi + \Lambda^0$  with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **89**, 092009 (2014) [arXiv:1404.1071 [hep-ex]].
78. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in events with a Z boson and missing transverse momentum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **90**, 012004 (2014) [arXiv:1404.0051 [hep-ex]].
79. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top quark decays  $t \rightarrow qH$  with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  using the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 008 (2014) [arXiv:1403.6293 [hep-ex]].
80. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of Four-Lepton Production at the Z Resonance in *pp* Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 231806 (2014) [arXiv:1403.5657 [hep-ex]].
81. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1405**, 071 (2014) [arXiv:1403.5294 [hep-ex]].
82. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in events with a Z boson, *b*-jets and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8$  TeV *pp* collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 2883 (2014) [arXiv:1403.5222 [hep-ex]].
83. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top-squark pair production in final states with two leptons in *pp* collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1406**, 124 (2014) [arXiv:1403.4853 [hep-ex]].
84. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-plane correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV lead-lead collisions

- with the ATLAS detector,”  
 Phys. Rev. C **90**, 024905 (2014) [arXiv:1403.0489 [hep-ex]].
85. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three lep-  
 tons and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$   $pp$  collisions with the ATLAS  
 detector,”  
 JHEP **1404**, 169 (2014) [arXiv:1402.7029 [hep-ex]].
  86. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the production of a  $W$  boson in association with a charm quark in  
 $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1405**, 068 (2014) [arXiv:1402.6263 [hep-ex]].
  87. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “The differential production cross section of the  $\phi(1020)$  meson in  $\sqrt{s} = 7$  TeV  $pp$   
 collisions measured with the ATLAS detector,”  
 Eur. Phys. J. C **74**, 2895 (2014) [arXiv:1402.6162 [hep-ex]].
  88. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for Invisible Decays of a Higgs Boson Produced in Association with a  $Z$   
 Boson in ATLAS,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 201802 (2014) [arXiv:1402.3244 [hep-ex]].
  89. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for Higgs boson decays to a photon and a  $Z$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$   
 and 8 TeV with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **732**, 8 (2014) [arXiv:1402.3051 [hep-ex]].
  90. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the electroweak production of dijets in association with a  $Z$ -boson  
 and distributions sensitive to vector boson fusion in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} =$   
 8 TeV using the ATLAS detector,”  
 JHEP **1404**, 031 (2014) [arXiv:1401.7610 [hep-ex]].
  91. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the production cross section of prompt  $J/\psi$  mesons in association  
 with a  $W^\pm$  boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,”  
 JHEP **1404**, 172 (2014) [arXiv:1401.2831 [hep-ex]].
  92. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of dijet cross sections in  $pp$  collisions at 7 TeV centre-of-mass energy  
 using the ATLAS detector,”  
 JHEP **1405**, 059 (2014) [arXiv:1312.3524 [hep-ex]].
  93. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for a multi-Higgs-boson cascade in  $W^+W^-b\bar{b}$  events with the ATLAS de-

- ector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,”  
 Phys. Rev. D **89**, 032002 (2014) [arXiv:1312.1956 [hep-ex]].
94. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Standalone vertex finding in the ATLAS muon spectrometer,”  
 JINST **9**, P02001 (2014) [arXiv:1311.7070 [physics.ins-det]].
  95. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the top quark pair production charge asymmetry in proton-proton  
 collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
 JHEP **1402**, 107 (2014) [arXiv:1311.6724 [hep-ex]].
  96. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for Quantum Black Hole Production in High-Invariant-Mass Lepton + Jet  
 Final States Using  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV and the ATLAS Detector,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 091804 (2014) [arXiv:1311.2006 [hep-ex]].
  97. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the inclusive isolated prompt photons cross section in  $pp$  collisions  
 at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector using  $4.6 \text{ fb}^{-1}$ ,”  
 Phys. Rev. D **89**, 052004 (2014) [arXiv:1311.1440 [hep-ex]].
  98. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurement of the mass difference between top and anti-top quarks in  $pp$  collisions  
 at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **728**, 363 (2014) [arXiv:1310.6527 [hep-ex]].
  99. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for dark matter in events with a hadronically decaying  $W$  or  $Z$  boson and  
 missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS  
 detector,”  
 Phys. Rev. Lett. **112**, 041802 (2014) [arXiv:1309.4017 [hep-ex]].
  100. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new phenomena in photon+jet events collected in proton-proton colli-  
 sions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,”  
 Phys. Lett. B **728**, 562 (2014) [arXiv:1309.3230 [hep-ex]].
  101. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing  
 transverse momentum at  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions using the ATLAS  
 experiment,”  
 JHEP **1310**, 130 (2013) [JHEP **1401**, 109 (2014)] [arXiv:1308.1841 [hep-ex]].
  102. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],  
 “Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with  
 the ATLAS detector at the LHC,”

Phys. Lett. B **726**, 88 (2013) [Phys. Lett. B **734**, 406 (2014)] [arXiv:1307.1427 [hep-ex]].

103. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of heavy-flavor quarks produced in association with top-quark pairs at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **89**, 072012 (2014) [arXiv:1304.6386 [hep-ex]].
104. K. Motohashi, M. Hagihawa, K. Hara, J. Usui *et al.*, “Evaluation of KEK n-in-p planar pixel sensor structures for very high radiation environments with testbeam”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A765, 125 (2014).
105. Y. Unno, K. Hara, M. Hagihawa *et al.*, “Development of n<sup>+</sup>-in-p large-area silicon microstrip sensors for very high radiation environments - ATLAS12 design and initial results”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A765, 80 (2014).

## (2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 受川史彦：宇宙史国際研究拠点，  
数理物質融合科学センター発足式（2014年9月1日），筑波大学。
2. 萩原睦人：ATLAS 検出器アップグレードに向けたシリコンマイクロストリップセンサーの放射線影響の評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
3. 臼井純哉：ATLAS 実験内部飛跡検出器のアップグレードに向けたプラナーピクセル検出器の性能評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
4. 瀧遼亮：LHC-ATLAS 実験における  $H \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$  崩壊チャンネルでの Heavy Higgs の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
5. 木内健司：LHC-ATLAS 実験における  $b$  クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
6. 大川英希：LHC-ATLAS 実験における  $ZH$  チャンネルを用いたヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
7. 飛田尚志：SOI ピクセル検出器の放射線損傷による回路特性の変動の評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。
8. 浅野麻莉：高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価  
日本物理学会 2014 年秋季大会（2014 年 9 月 18 日–21 日），佐賀大学本庄キャンパス。

9. 先崎蓮：ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための SOI-STJ 検出器の研究開発,  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
10. 森内航也：ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発 V,  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
11. 高橋和希：ミューオン透過法による大規模構造体内部撮像に用いるシンチレーター検出器  
日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日), 佐賀大学本庄キャンパス.
12. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ輻射崩壊探索実験に向けた SOI-STJ 一体型遠赤外光検出器開発,  
第 4 回可視赤外線観測装置技術ワークショップ (2014 年 12 月 3-4 日), 国立天文台三鷹キャンパス.
13. 先崎蓮：R&D status of the cold preamplifier,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
14. 奥平琢也：R&D status of the SOI-STJ detector,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
15. 武政健一: Development of STJ detector for cosmic background neutrino decay search,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014 (2014 年 12 月 21-23 日),  
山梨県富士吉田市富士カーム.
16. 受川史彦：素粒子構造部門の研究,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
17. 原和彦：ATLAS 実験検出器,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
18. 大川英希：Selected Highlights from Higgs Results at the LHC-ATLAS Experiment,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
19. 武内勇司：Search for neutrino radiative decay and the status of the far-infrared  
photon detector development,  
第 1 回 CiRfSE ワークショップ (2015 年 3 月 12-13 日), 筑波大学.
20. 金信弘：ニュートリノ物理のための半導体・超伝導複合遠赤外光子検出器,  
第 3 回 CRAVITY シンポジウム (2015 年 3 月 18 日), 産業技術総合研究所.
21. 飛田尚志: SOI ピクセル検出器の放射線損傷による回路特性の変動の評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
22. 萩原睦人: ATLAS 検出器アップグレードに向けたシリコンマイクロストリップセンサーの電荷収集効率の評価  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.

23. 臼井純哉: SLAC の電子ビームを用いた HL-LHC アトラス実験用プラナーピクセル検出器の評価  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
24. 浅野麻莉: 高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
25. 本多俊介: 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
26. 市村龍哉: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発,  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
27. 奥平琢也: ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発 VI,  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.
28. 高橋和希: ミューオン透過法による大規模構造体内部撮像に用いるシンチレーター検出器 (II)  
日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21–24 日), 早稲田大学早稲田キャンパス.

### (3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. S. Honda *et al.*, “Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
2. K. Kasahara *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Pre-amplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Neutrino Background”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
3. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search”,  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), June 2–6, 2014, Amsterdam, The Netherlands.
4. K. Hara *et al.*, “Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Devices”,  
VERTEX2014, September 15–19, 2014, Macha Lake, The Czech Republic.
5. H. Okawa, “Search for the Higgs Boson Decaying to Dark Matter at the LHC”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.

6. Y. Takeuchi, “Experimental search for the cosmic background neutrino decay in the cosmic far-infrared background”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
7. K. Kiuchi, “Search for the Standard Model Higgs boson decaying to a bottom-quark pair with the ATLAS detector”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
8. T. Okudaira, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector with SOI Preamplifier board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino”,  
Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), September 28–30, 2014, University of Tsukuba, Japan.
9. S. Kim, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search”,  
2nd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2014), November 5–8, 2014, Shanghai, China.
10. K. Hara *et al.*, “ Compensation of Radiation Effect in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensor”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2014, November 8–15, 2014, Seattle, USA.
11. K. Takemasa, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector Using Hafnium for Neutrino Decay Search”,  
IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2014, November 8–15, 2014, Seattle, USA.
12. K. Nagata, “Beyond-the-Standard-Model Higgs Physics using the ATLAS experiment”,  
10th Latin American Symposium on High Energy Physics (SILFAE), November 24–28, Medellin, Colombia.
13. H. Okawa, “Search for New Physics in the Higgs Sector at the LHC-ATLAS Experiment”,  
Seminar at the University of Science and Technology of China, Hefei, China, March 19, 2015.

#### (4) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. T. Okudaira, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector with SOI Preamplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino”,

IEEE nuclear science symposium and medical imaging conference 2014, Nov. 8–15, 2014, Seattle, USA.

## (5) 会議・研究会報告書

1. S. Honda, K. Hara, K. Tsuchida, M. Asano, N. Tobita, T. Maeda *et al.*,  
“Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors”,  
PoS (TIPP2014) 039, 2014.
2. T. Miyoshi, K. Hara, S. Honda *et al.*,  
“Monolithic pixel detectors fabricated with single and double SOI wafers”,  
PoS (TIPP2014) 044, 2014.
3. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search”,  
PoS (TIPP2014) 155, 2014.
4. K. Kasahara *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino”,  
PoS (TIPP2014) 074, 2014.
5. K. Hara, M. Asano, S. Honda, N. Tobita *et al.*,  
“Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device”,  
PoS (VERTEX2014) 033, 2014.

## (6) 学位論文

### 博士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻，2015年2月。

1. 木内 健司 : Search for the Standard Model Higgs boson decaying to a bottom-quark Pair with the ATLAS Detector (ATLAS 検出器を用いたボトム・クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索)

### 修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻，2015年2月。

1. 市村龍哉 : ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の研究開発
2. 臼井純哉 : HL-LHC での ATLAS 実験に用いる n-on-p 型プラナーピクセルセンサーのテストビームによる性能評価

3. 奥平琢也：ニュートリノ崩壊光探索のためのニオブとアルミニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の開発研究
4. 金丸昌弘：ニュートリノ崩壊探索ロケット実験の設計のためのシミュレーション解析
5. 萩原睦人：HL-LHC 用 ATLAS シリコンマイクロストリップセンサーの陽子照射による放射線耐性の評価
6. 本多俊介：2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の基礎特性および放射線耐性の研究
7. 本田卓也：ILC 用分割電磁カロリメータのための光検出器 MPPC の応答特性評価
8. 村雨梓：国際リニアコライダー計画に用いるシンチレータ電磁カロリメータのシミュレーションによる性能評価

### 【構成員の異動】

2014 年 8 月に大川英希が助教として着任。

### III 宇宙物理理論グループ

#### 1. メンバー

教授	梅村 雅之
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
助教	Alexander Wagner (国際テニユアトラック)
研究員	石山 智明 (HPCI 戦略プログラム)
	行方 大輔 (HPCI 戦略プログラム)
	三木 洋平 (CREST)
学生	大学院生 17名 学類生 7名

#### 2. 概要

本年度、当グループは、**数値シミュレーションによる研究**として、ガスの力学的摩擦による多重ブラックホールの合体過程の研究、Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性、アンドロメダ銀河における漂うブラックホールとダークマターハローの姿、アンドロメダ銀河の潮汐破壊を耐えた衛星銀河中心部に期待される観測的特徴、ダークマターハローと中心ブラックホールの重力場におけるポリトロピック球対称定常銀河風の遷音速解析、再結合放射を含めた輻射流体シミュレーションコードの開発、宇宙暗黒時代の構造形成、ダスト再放射を考慮した輻射流体計算コードの開発、**Jet-intracluster Medium Interaction in Hydra A: The Effect of Jet Precession**, 世界最大規模のダークマターシミュレーション、GPU を用いた重力多体系の数値シミュレーションの高速化、を推進した。さらに、**観測との共同研究**として、Ly $\alpha$  輝線銀河の速度構造研究で探る Ly $\alpha$  の放射機構の研究を行った。また、**宇宙・生命分野間連携**として、星間空間におけるアミノ酸生成過程の理論的研究、光合成光捕集機構の量子力学計算による太陽系外惑星のバイオマーカー・モデルの研究を推進した。

#### 3. 研究成果

##### 【1】 ガスの力学的摩擦による多重ブラックホールの合体過程の研究

銀河中心には  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$  の大質量ブラックホール(BH) が存在すると考えられているが、その質量の獲得過程や形成過程の正確なところは未だに解明されていない。その起源として初代星残余物の種 BH を仮定した場合、ガス降着のみでは観測されている高赤方偏移クェーサーの超巨大 BH を成長させることができないと見積られる。我々は、BH の成長のもう一つの可能性として、種 BH の合体過程を考えた。3 体より多い数の BH の合体過程の研究は、Tanikawa & Umemura (2011, 2014) で行われているが、力学的摩擦は銀河内に存在する恒星から受ける影響のみを考慮している。第一世代天体の形成時はガスが豊富にあり、ガスによる力学的摩擦の効果が有意に効く可能性がある。我々は、ガスによる力学的摩擦の影響を考慮し、10 体の BH の合体過程の研究を行った。特に、ガス密度と BH 密度に対する依存性に注目し、BH 合

体が起こる条件を導出した。シミュレーションの結果、ガスによる力学的摩擦を取り入れると、100 Myr で 10 個全ての BH が合体する広いパラメーター領域があることが分かった。合体の物理過程は、力学的摩擦のみで合体 (Type A) , 力学的摩擦と 3 体相互作用の相乗効果で合体 (Type B) , 3 体相互作用で合体 (Type C) , の 3 種類に分けられることが分かった。Tanikawa & Umemura (2011, 2014) の星による力学的摩擦を考慮した場合には、合体は 10 個中 4~6 個までであったが、本研究により、ガスによる力学的摩擦が全ての BH の合体を可能にすることが明らかとなった。

## 【2】 Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性

現在の標準的な構造形成理論である cold dark matter(CDM)モデルは宇宙の大規模構造の統計的性質を説明することに成功した反面、1Mpc 以下の小さなスケールの構造においていくつかの問題が指摘されている。例えば、dark matter halo(DMH)の中心質量密度が発散する cusp 構造を予言する CDM モデルに対し、中心質量密度が一定となる core 構造が多数観測されていること(Cusp-core 問題)や、質量の中心集中度が高い DMH を持つ大質量衛星銀河が見つからない(Too-big-to-fail 問題)等がある。本研究ではこれら二つの問題を、DMH とバリオンの力学的相互作用に起因した DMH の中心密度分布の進化過程に関わる問題として捉えて解析を行った。その結果、活発な星形成活動が発生する以前の原始銀河の DMH は cusp 構造を持っているが、銀河形成期に発生する周期的な超新星爆発フィードバックによって core 構造へと遷移する、cusp-core 遷移過程が重要な役割を果たすことを見出した。さらに、cusp-core 遷移過程の発生によって too-big-to-fail 問題が解決する可能性について議論した。

## 【3】 アンドロメダ銀河における、漂うブラックホールとダークマターハローの姿

近年、ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡に代表される大型望遠鏡を最大限活用した近傍宇宙の大規模探査により、現在も続く銀河進化の過程を垣間見ることができるようになってきた。近傍のアンドロメダ銀河においては、おびただしい数の暗い矮小銀河が発見されるとともに、それら矮小銀河の衝突によるものと思われるステラーストリームやステラージェル、あるいは銀河円盤上で見られるリング構造等、銀河衝突の痕跡が続々と明らかにされてきている。本研究では、銀河衝突の重力多体計算及び流体力学計算による銀河衝突過程のみならず、アンドロメダ銀河に付随するダークマターハローの構造や、銀河円盤の構造、銀河ハロー中を徘徊するブラックホールの存在可能性について議論した。特に、アンドロメダ銀河のダークマターハローに関する解析では、現在の標準理論として考えられているコールドダークマターモデルの予言するユニバーサル密度分布に従わない可能性を示唆しており、理論と観測の深刻な矛盾点について議論した。

## 【4】 アンドロメダ銀河の潮汐破壊を耐えた衛星銀河中心部に期待される観測的特徴

各銀河の中心に存在するブラックホールの質量は、銀河のバルジ(又は楕円銀河本体) の質量に比例しているが、その相関関係の起源は未解明である。銀河が衝突・合体する際に巨大ブラ

ックホールどうしも合体することが共進化の起源として有力であるものの、いまだ観測的に検証されていない。我々ははずば抜けて近いために過去の銀河衝突の履歴が詳細に明らかになっているアンドロメダ銀河に着目し、大規模数値シミュレーションと放射スペクトルの理論計算を基に、共進化のこの重要な過程の解明に取り組みつつある (Miki et al. 2014; Kawaguchi et al. 2014)。本研究では、アンドロメダ銀河との衝突の際に潮汐破壊された衛星銀河の中心部に期待される観測的特徴を調べた。衛星銀河の大部分は、潮汐力により散り散りになりアンドロメダストリームなどを形成している。一方、潮汐破壊を耐えて生き残った衛星銀河中心部は、中心に大質量ブラックホールを含む星団として、現在、アンドロメダ銀河円盤の外縁部に居ると考えられる。この残骸星団の質量は、主に両銀河の近心点距離で決まり、アンドロメダ銀河中心から約1kpc の位置を衛星銀河中心が通過したこの衝突では、衛星銀河の中心ブラックホール質量の約 1 割、すなわち合計約 $10^6$  太陽質量の星々が衛星銀河中心ブラックホールに引き連れられていると考えられる。星種族合成モデル(Fioc et al. 1997) を用いて年齢が10–100 億年の場合について星団の放射スペクトルを見積もると、例えばV バンドでは、 $L = 10^{(38.7-39.5)}$  [erg/s] と予想され、見かけの明るさは  $F = 10^{-(10.4-11.2)}$  [erg/s/cm<sup>2</sup>] (AB 等級で14–16mag) と期待される。

#### 【5】 ダークマターハローと中心ブラックホールの重力場におけるポリトロピック球対称定常銀河風の遷音速解析

銀河風は銀河進化に影響を与え、銀河間空間の重元素量を左右する重要な現象である。我々は、ダークマターハロー及び銀河中心ブラックホールの重力場中での球対称定常銀河風の加速過程を研究している。ここではポリトロピック銀河風モデルを用いて、銀河風としての遷音速解を、多様なパラメーター空間内でその解曲線のトポロジーによって系統的に分類している。本研究では、その結果を等温銀河風モデルの解析結果と比較し、温度変化が銀河風の加速過程に与える影響について議論した。さらに、ダークマターハローと中心ブラックホールから成る現実的な重力場に於いても、点源重力場でのParker 解同様に、遷音速流はエントロピー最大の解であり、自発的に実現し易いことを示した。また、冷却による比熱比の変化を想定した場合の解の振る舞いについて調べ、実際の銀河で観測されている温度・密度分布が、ポリトロピック銀河風モデルによって再現可能であるかを議論している。

#### 【6】 再結合放射を含めた輻射流体シミュレーションコードの開発

輻射輸送シミュレーションやそれを流体力学シミュレーションとカップルさせた輻射流体シミュレーションは、天体形成の数値シミュレーションで多く用いられるようになってきたが、電離領域からの再結合放射などの空間的に広がった光源からの輻射輸送は計算コストが膨大であるため、これまでは無視されることが多かった。我々は、輻射輸送計算を GPU やマルチコア・メニーコアアーキテクチャに基づくプロセッサで効率的に実行するアルゴリズムを開発し実装した。このコードは、点源からの輻射輸送を解く ARGOT 法と再結合放射などの広がった領域からの輻射輸送を解く ART法を GPU やマルチコアプロセッサにおいて実装したもので

あり、MPIによるノード並列化も行い高い並列化効率を達成した。このコードを用いて、これまで無視されてきた再結合放射が輻射流体シミュレーションに及ぼす効果を様々な初期条件で調べ、主に臨界 D-type の電離波面に於いて再結合放射が重要な役割を果たすことを見出した。

### 【7】 宇宙暗黒時代の構造形成

宇宙晴れあがり以降から最初の天体が形成されるまでの宇宙暗黒時代はこれまでの観測では手の届かない領域であったが、Square Kilometer Array に代表される中性水素の 21cm 線を観測する電波干渉計画によってこの時期の宇宙大規模構造形成の観測可能性が注目されている。特に近年注目を集めているのが、宇宙晴れあがり以前のダークマターとバリオンの運動の違いに起因するダークマターとバリオンの超音速な速度差で、この速度差によって密度ゆらぎの成長が抑制されることによって初期天体の形成時期や形成される天体の質量、更には宇宙の再電離過程にも影響を与え得る。この速度差が宇宙暗黒時代の大規模構造形成に与える影響について宇宙論的な数値流体シミュレーションを行い、相対速度の大きさに対してバリオンの密度ゆらぎパワースペクトルがどのように影響を受けるかを予言し、相対速度の関数としてフィッティング関数を与えた。

### 【8】 ダスト再放射を考慮した輻射流体計算コードの開発

活動銀河核(AGN)は銀河の形成・進化に多大な影響を与えてきたと目され、AGN の活動性の理解は銀河形成論において重要な課題の 1 つである。活動性を理解するためには、AGN 降着円盤と降着円盤へのガス供給過程に関する詳細な理解が必要不可欠である。本研究は後者に焦点を当て、ガス供給過程と密接に関係する AGN トーラス内縁部の構造・物理状態を輻射流体計算によって可能な限り第一原理的に解明することを目指している。本年度は、この計算の実施に必要な輻射流体計算コードの開発と予備計算を実施した。コード開発においては、トーラス内縁部を扱うのに必要な、(1)ガスの自己重力、(2)ガスの光電離・光解離反応、(3)ダストからの赤外線再放射を考慮した。この計算コードを用いてエディントン比 1、ブラックホール質量  $10^7[M_{\odot}]$  の場合の予備計算を実施したところ、(i)ダスト再放射による輻射圧はトーラス内縁部を膨らませアウトフロー率を数割上昇させること、(ii)アウトフロー率はエディントン質量降着率(変換効率 0.1)に匹敵しうることがわかった。

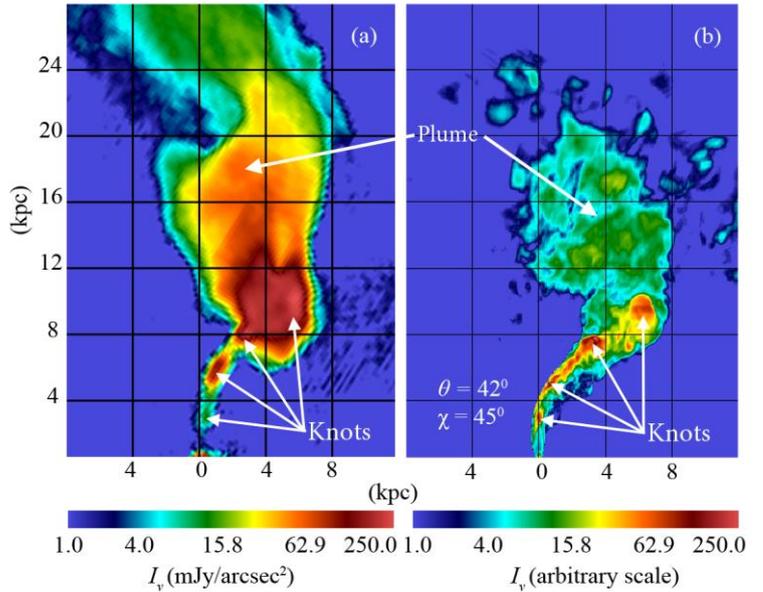
### 【9】 “Jet-intracluster Medium Interaction in Hydra A: The Effect of Jet Precession”

Using high-resolution 3-dimensional relativistic hydrodynamic simulations, we have succeeded in producing a most accurate model for the 30 kpc radio structure of the Hydra A source. The energetics of the jet have been narrowed down in previous work, and we use these parameters to perform a high-resolution simulation of a precessing jet, and find the best precession angle and precession period for Hydra A. We find that a precession period of  $\sim 1$  Myr and a precession angle of  $\sim 20$  degrees, the hydrodynamic

model reproduces, i) the curvature of the jet, ii) the correct number of bright knots within 20 kpc at approximately correct locations, and iii) the turbulent transition of the jet to a plume (See Figure 1). The Mach number of the advancing bow shock is 1.85 and is indicative of gentle cluster atmosphere heating during the early stages of the AGN's activity. The shocked gas is then effectively mixed with the turbulent jet plasma in the jet cocoon, preventing catastrophic cooling. We find a strong dependence of the radio morphology on viewing angle (See Figure 2), which is enhanced by different degrees of Doppler boosting and de-boosting of plasmons at different points along the precessing jet stream. The radio morphologies obtained from different viewing angles exhibit a range of jet curvatures and different orientations of jet lobes. In some instances, the radio morphology even resembles that of an X-shaped radio galaxy (Figure 2, panel d). The difficulty in comparing simulated to observed jets becomes clear: one must probe not only a range of jet parameters, but one must also sample along a cone of viewing directions in order to determine whether a model matches observations.

Figure 1 caption

Comparison of the Hydra A radio image (Panel a) with a good match synthetic data image from our high-resolution simulation (Panel b). The curvature, the location of the knots, the flaring region and the plume structure are well reproduced. The brightness contrast between diffuse plume and the knots, however, is not correctly reproduced. One possible explanation for this is that turbulent amplification of the magnetic field and associated re-acceleration of electrons increases the surface in the plume beyond the flaring zone.



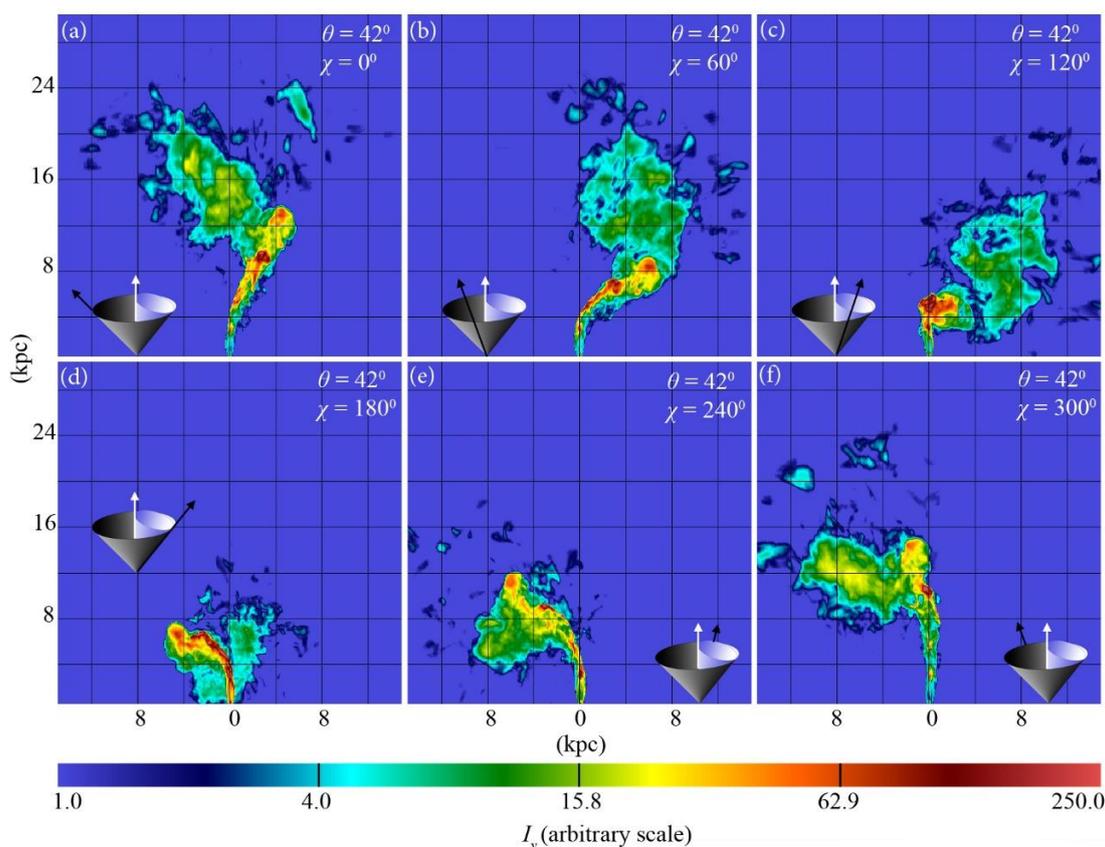


Figure 2 Caption

The Hydra A jet surface brightness viewed from different directions of a cone with known opening angle corresponding to the inclination angle of the jet with the line-of-sight. The source morphology varies drastically depending on viewing direction, an effect exacerbated by Doppler boosting and de-boosting.

### 【10】 世界最大規模のダークマターシミュレーション

理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」や、国立天文台の「アテルイ」を用いて、5500億ダークマター粒子の超大規模宇宙論的N体シミュレーションを行った。一片およそ50億光年の領域で初期宇宙から現在の宇宙までシミュレーションした。初期条件はPlanck衛星による、CMBの最新の観測結果に基づいている。小銀河スケールから宇宙の大規模構造まで分解されている。これほど大きい空間でのシミュレーションとしては世界最高の分解能であり、銀河スケールのハローの階層的形成を追うシミュレーションとしては世界最大である。

シミュレーション結果から、ハローを検出し、ハローの階層的構造形成史をモデル化した。データはおよそ1ペタバイトにもおよぶ。今回、最大規模のシミュレーションの他に、空間サイズやひとつのシミュレーションダークマター粒子の大きさが異なる複数のシミュレーションを行った。そうすることで、質量スケールに換算しておよそ8桁にもおよぶ範囲でのハロー

の構造形成史をモデル化した (Ishiyama et al. 2015, PASJ in press)。

シミュレーションではダークマター分布の重力的な進化のみ解き、ハローの階層的構造形成史をモデル化した。現在、シミュレーションから得られたハローの進化史の上で、準解析的銀河形成モデルという手法を用いてバリオン進化を解いている。そして我々が目にする銀河や活動銀河核などの大規模天体サーベイ観測と直接比較可能な、様々な天体の疑似カタログを整備し、公開していく予定である。

### 【1 1】 GPU を用いた重力多体系の数値シミュレーションの高速化

無衝突重力多体系の数値シミュレーションにおいて広く用いられている Tree 法を、GPU を用いて高速化した。ここでは、interaction list 方式と on-the-fly 方式の中間方式を採用し、warp 毎に interaction list を順次構築し、近ければセル or 粒子を距離判定リストに追加、遠ければセル群を計算リストに追加する。そして、計算リストのサイズが一定値よりも大きくなれば、重力計算を行う。これにより、性能低下の要因となる warp divergence は回避できるが、判定リストの正確なサイズは予測不可能なので、グローバルメモリへの退避も必要となる。加えて、block time step の採用や重力計算以外の主要な関数の GPU 化を進めることでさらなる高速化を進め、先行研究である Ogiya et al. (2013) や Watanabe & Nakasato (2014) に比べて 3-4 倍程度の高速化を達成した。

### 【1 2】 Ly $\alpha$ 輝線銀河の速度構造研究で探る Ly $\alpha$ の放射機構の研究 《観測との共同研究》

これまでの遠方銀河研究で、Ly $\alpha$  輝線銀河 (Ly $\alpha$  Emitter; LAE) は遠方星形成銀河における重要な銀河種族であることが認識されると共に、宇宙再電離を探るプローブとして用いられている。しかし、Ly $\alpha$  光子は星間物質内の中性水素ガスやダストにより散乱・吸収を受けるため、その放射機構は完全には理解されていない。さらに、遠方銀河に付随する中性水素ガスの分布、及び量は現在でも観測が難しい状況にある。LAE の Ly $\alpha$  光子放射機構を探るべく、我々はケック望遠鏡/LRIS、マゼラン望遠鏡/IMACS、すばる望遠鏡/FMOS を用いて合計約 30 個の  $z=2.2$  LAEs の可視/近赤外分光観測を行った。その中の 12 天体について Ly $\alpha$  輝線と星雲線 ([OIII]5007 など)の両方を検出した。星雲線で LAE の赤方偏移を決定し、そこからの Ly $\alpha$  輝線の速度差 (Ly $\alpha$  velocity offset) を求めた。その結果、Ly $\alpha$  velocity offset が測定された LAE サンプルを 2 倍以上に増やすことができ、これまで提案されていた Ly $\alpha$  等価幅と Ly $\alpha$  velocity offset の逆相関を高い有意性で確認することができた。さらに、我々の長時間分光によりこれまで検出が難しかった暗い紫外線連続光、及び多数の金属吸収線を 4 個の LAEs から検出することに成功した。吸収線の速度差を測ったところ、星雲線に対し  $\sim 200\text{-}300$  km/s で青方偏移していることが分かり、Lyman Break Galaxies と同様に強いアウトフローが見られることが明らかになった。我々はこれらの輝線/吸収線情報を用いて、Ly $\alpha$  等価幅・Ly $\alpha$  velocity offset 逆相関の起源を探ると共に、遠方銀河における Ly $\alpha$  放射と中性水素ガスの関係性を探究した。

### 【13】 星間空間におけるアミノ酸生成過程の理論的研究《宇宙・生命分野連携》

宇宙観測や模擬実験によって、有機物や高分子が星間ダスト表面などで生成されているということが明らかになってきている。観測ではアミノ酸前駆体（アミノアセトニトリル）が見つかっており、ALMA ではアミノ酸の検出も期待されている。また、地球に飛来した隕石からはアミノ酸やアミノ酸前駆体（ヒダントイン）が検出されている。本研究では、考えられる様々な反応経路の中でも最も一般的だと思われる生成過程について反応物および中間体の生成エネルギーを評価し、宇宙におけるアミノ酸生成の仕組みを探究した。手法は、密度汎関数法（第一原理計算）を用い、ヒダントインやアミノニトリルを経由する、グリシン及びアラニンの生成に対して高精度計算を行った。また、ダスト表面を想定するため、水溶液中での反応経路の解析を、Polarizable Continuum Model (PCM) による溶媒効果を考慮した計算を用いて行った。真空中においては、計算した全ての反応過程の中でグリシンが最も安定であり、過剰に安定な中間体は存在しなかった。アラニンについても同様の傾向が見られた。水溶液中でも反応過程の中でグリシンが最も安定であったが、ヒダントインが形成されにくい可能性があることがわかった。以上より、構成要素となる反応物があれば、グリシン、アラニンは容易に起こりうるということが明らかになった。さらに、今回計算した反応過程の遷移状態についても計算を行った結果、反応障壁が高く、これらを超えて反応が進むためには、UV 照射による光励起やラジカル形成、もしくはダスト衝突時の熱励起などの機構が必要であることがわかった。

### 【14】 光合成光捕集機構の量子力学計算による太陽系外惑星のバイオマーカー・モデルの研究 (小松氏博士論文) 《宇宙・生命分野連携》

太陽系外惑星の生命の重要な指標（バイオマーカー）の一つとして、光合成由来のスペクトルが考えられているが、太陽系とは異なる輻射環境下で、どのような光合成が可能であるかは明らかにされていない。我々は、光合成生物がどの程度効率的に光を吸収するかを量子化学計算し、これを惑星大気吸収の輻射輸送計算を用いて評価した。特に、今後の太陽系外惑星の観測では M 型星の周りの惑星がターゲットになるので、そのような長波長の光を多く含む環境における効率に焦点を当てて計算を行った。クロロフィル、バクテリオクロロフィルなどの光合成色素から始めて、これらの凝集体であるアンテナ部、光捕集複合体における吸収効率を評価した。また、輻射環境としては主星の寿命が長い FGKM 型星周りのハビタブルゾーンにある惑星を想定した。クロロフィルなどの光合成色素はソーレー帯、Q<sub>x</sub> 帯、Q<sub>y</sub> 帯の 3 つの主要な吸収帯を持ち、これらがどのように吸収効率に寄与しているか TDDFT（時間依存密度汎関数法）によって定量的に評価した。その結果、早期型星（F、G、K 型星）においてはソーレー帯が 4000 Å ブレーク（恒星の重金属によって引き起こされる 400 nm 前後での輻射スペクトルの急な変化）の長波長側、短波長側のどちらに位置するかによって顕著に吸収効率が変わることがわかった。バクテリオクロロフィルの場合、ソーレー帯は 400 nm より短波長側にあるので効率が小さくなり、クロロフィルは長波長側にあるので大きくなる。一方、晩期型の M 型星においてソーレー帯は吸収効率には寄与せず、代わりに Q<sub>y</sub> 帯が重要になる。バクテリオクロロフィルはクロロフィルより長波長側に Q<sub>y</sub> 帯があるのでより効率的に光を吸収できる。

続いてこれらの色素のうち、バクテリオクロロフィル a からなる紅色細菌の光捕集複合体 (LH2) の吸収効率を評価した。色素同士が双極子-双極子相互作用によって相互作用する、という近似モデルを用いて吸収スペクトルを算出した。さらに、ここでは惑星大気上端の放射スペクトルだけでなく、黒体放射スペクトルを用いて恒星の有効温度に依存してどのように吸収効率が変わるかを調べた。その結果、これらが最も効率的に吸収するのは、太陽の有効温度である 5778 K よりもかなり高温側であることがわかった。また、光捕集複合体においては励起エネルギー移動によって、効率的に必要な場所にエネルギーを引き渡すことができる。この過程を励起ダイナミクスモデルによって再現した。相互作用は上のモデルと同様に双極子-双極子相互作用を考慮した。その結果、LH2 の凝集体において色素を長波長側の光を吸収するものに変えると (850 nm → 870 nm)、エネルギー移動の速度が 2 倍になることがわかった。

これまでは惑星大気上端 (TOA) における放射や黒体放射の環境を考慮してきたが、実際に惑星において生物が存在している環境を想定するには地表における吸収効率を評価する必要がある。地球の場合は、TOA と地表での吸収効率は大きくは変わらなかった。また、ソーレー帯がほぼ 400 nm にあるため、どちらの場合もこの吸収帯からの寄与は無視できなかった。さらに、異なる主星を持つ惑星大気の効果を取り入れた上で効率を比較するために、M 型星、G 型星(太陽)周りの惑星において放射輸送計算を行った。惑星大気の状態としては、酸化型、還元型、地球に似た大気の 3 つを想定した。M 型星の場合は G 型星と比較すると、大気の状態によって大きく吸収効率に差が出るということがわかった。これは、ソーレー帯が M 型星の放射スペクトルとほとんど重なっていないことに由来する。また、いずれの場合においても Qy 帯において水蒸気の影響を大きく受けることがわかった。さらに、M 型星における効率的な光合成の条件を探ることに焦点を当てて、色素の構造、アンテナの配置、溶媒などの条件を変えて、吸収スペクトルの長波長化、M 型星における効率化の程度を評価した。その結果、色素の中心金属を Pd に交換すると金属なしの場合 (H2) と比較して 120 nm 程長波長化することがわかった。

#### 4. 教育

##### 【学位論文】

<博士論文>

##### 1. 小松 勇

Absorption efficiencies of antenna complexes in photosynthetic organisms exposed to the photoenvironment of extrasolar planets

(太陽系外惑星の光環境にさらされた光合成生物のアンテナ複合体の吸収効率)

##### 2. 田中 賢

A new ray-tracing scheme for radiation hydrodynamic simulations on highly parallel architectures

(並列プロセッサに最適化されたレイトレーシング法による放射流体シミュレーション)

##### 3. Mohammad Ali Nawaz

(The Australian National University, Research School of Astronomy and Astrophysics)  
Interaction of Jets with the Intracluster Medium". (Thesis submitted)

<修士論文>

1. 小野間 章友  
バリオンとダークマターの相対速度が及ぼす初期構造形成への影響
2. 渡邊 歩  
宇宙大規模構造における高温水素ライマンアルファ吸収体の物理的性質
3. 加藤 一輝  
Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性
4. 村田 貴紀  
銀河形成初期のアウトフローと銀河形状
5. 山崎 健太郎  
ブラックホール降着円盤における輻射抵抗による磁気回転不安定性について

<学士論文>

1. 石原 駿  
系外惑星の大気吸収による放射スペクトルと生命活動の指標について
2. 荻野 孝浩  
銀河風と銀河間物質との相互作用に関する遷音速解析
3. 久喜 奈保子  
原始銀河における Lyman  $\alpha$  光子の脱出確率について
4. 小山 亮平  
銀河の clustering 解析
5. 佐々木 さゆり  
宇宙大規模構造形成シミュレーション
6. 保科 さや香  
中心星輻射圧効果を入れた原始惑星系円盤ダストの軌道運動について
7. 今 友宏  
ポルトロープ近似によるダークマターハローへの降着流の遷音速解析

**【集中講義】**

- ・吉川 耕司  
「宇宙論と銀河団」 (2014年7月15日～7月17日, 北海道大学大学院理学研究院物理学部門)

## 5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

### 【受賞】

1. 平成 26 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 石山 智明, 高精度大規模計算によるダークマター微細構造の研究, 平成 26 年度
2. 平成 26 年度筑波大学若手教員特別奨励賞, 石山 智明, 平成 26 年度

### 【外部資金】

#### <代表者>

- ・基盤研究 (C) : 森 正夫 (代表者) (繰越)  
「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」 (78 万円)
- ・基盤研究 (C) : 森 正夫 (代表者) (継続)  
「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」 (150 万円)
- ・日本学術振興会特別研究員 (DC2) : 小松 勇 (代表者) (新規)  
「光合成光捕集機構の量子化学計算による太陽系外惑星のバイオマーカー・モデルの構築」 (100 万円)
- ・科研費若手研究 (B) : 石山智明 (代表者) 2012-2014 年 (継続)  
「銀河系内のダークマター微細構造の解明およびダークマター検出への応用」 350 万 (3 年総額, 直接経費)
- ・科研費若手研究 (B) : 行方大輔 (代表者) 2013-2015 年 (継続)  
「マルチグループ輻射流体計算による AGN トーラスから降着円盤へのガス供給過程の解明」 (403 万円)
- ・日本学術振興会特別研究員 (DC1) : 桐原崇亘 (代表者) (新規)  
「大規模数値シミュレーションを用いた局所銀河群形成過程の解明」 (100 万円)
- ・日本学術振興会特別研究員 (DC1) : 鈴木裕行 (代表者) (新規)  
「大質量星の紫外線輻射輸送と超新星爆発の共存輻射流体モデル構築による銀河形成の研究」 (100 万円)

#### <分担者>

- ・基盤研究 (A) : 梅村雅之 (分担者) (代表者: 大内正巳) (継続)  
「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」 (1 万円)
- ・基盤研究 (A) : 森 正夫 (分担者) (代表者: 大内正巳) (継続)  
「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」 (398 万円)
- ・挑戦的萌芽研究: 梅村雅之 (分担者) (代表者: 高橋芳太)  
「6次元光子ボルツマン方程式による一般相対論的輻射流体シミュレーション」 (10 万円)
- ・戦略的創造研究推進事業 CREST: 梅村雅之 (分担者) (代表者: 朴泰祐)

「ポストペタスケール時代に向けた演算加速機構・通信機構統合環境の研究開発」(1,565万円)

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

- 1) Bedorf, J., Gaburov, E., Fujii, S. M., Nitadori, K., Ishiyama, T., Portegies Zwart, S., 2014, “24.77 Pflops on a Gravitational Tree-Code to Simulate the Milky Way Galaxy with 18600 GPUs”, SC '14 Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 54-65
- 2) Enoki, M., Ishiyama, T., Kobayashi, M.A.R., Nagashima, M., 2014, “Anti-hierarchical evolution of the AGN space density in a hierarchical universe”, *The Astrophysical Journal*, 794, 69-76
- 3) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2014, “Transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole and its application to the Sombrero galaxy”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 1177-1188
- 4) Ishiyama, T., 2014, “Hierarchical Formation of Dark Matter Halos and the Free Streaming Scale”, *The Astrophysical Journal*, 788, 27-39
- 5) Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., 2014, “Relics of Galaxy Merging: Observational Predictions for a Wandering Massive Black Hole and Accompanying Star Cluster in the Halo of M31”, *Astrophysical Journal Letters*, 789, L13-17
- 6) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., 2014, “Puzzling outer-density profile of the dark matter halo in the Andromeda galaxy”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, L106
- 7) Konno, A., Ouchi, M., Ono, Y., Shimasaku, K., Shibuya, T., Furusawa, H., Nakajima, K., Naito, Y., Momose, R., Yuma, S., Iye, M., 2014, “Accelerated Evolution of Ly $\alpha$  Luminosity Function at  $z \gtrsim 7$  Revealed by the Subaru Ultra-Deep Survey for Ly $\alpha$  Emitters at  $z=7.3$ ”, *The Astrophysical Journal*, 797, Issue 1, article id. 16, 15 pp.
- 8) Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Saito, Y., 2014, “Hunting a Wandering Supermassive Black Hole in the M31 Halo Hermitage”, *The Astrophysical Journal*, 783, 87-95
- 9) Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M., 2014, “Diffuse Ly $\alpha$  haloes around galaxies at  $z = 2.2-6.6$ : implications for galaxy formation and cosmic reionization”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442, 110-120

- 10) Namekata, D., Umemura, M., Hasegawa, K., 2014, “On the evolution of gas clouds exposed to AGN radiation. I. Three-dimensional radiation hydrodynamic simulations”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443, 2018
- 11) Nawaz, M. A. , Wagner, A. Y. , Bicknell, G. V. , Sutherland, R. S., McNamara, B. R. , 2014, “Jet-intracluster medium interaction in Hydra A - I. Estimates of jet velocity from inner knots”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 1600~1614
- 12) Ogiya, G., Mori, M., Ishiyama, T., Burkert, A., 2014, “The connection between the cusp-to-core transformation and observational universalities of DM haloes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 440, L71-L75
- 13) Ogiya, G., Mori, M., 2014, “The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback: Effects of Oscillation”, *The Astrophysical Journal*, Volume 793, article id. 46, 12 pp
- 14) Ogiya, G., Burkert, A., 2015, “Re-examining the too-big-to-fail problem for dark matter haloes with central density cores”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 2363.
- 15) Potter, T. M., Staveley-Smith, L., Reville, B., Ng, C.-Y., Bicknell, G.V., Sutherland R. S., Wagner, A. Y., 2014 “Multi-dimensional Simulations of the Expanding Supernova Remnant of SN 1987A”, *The Astrophysical Journal*, 794, 174-199
- 16) Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Yuma, S., Hashimoto, T., Shimasaku, K., Mori, M., Umemura, M., 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly $\alpha$  Emission? I. Demographics of Ly $\alpha$  Emitter Structures”, *The Astrophysical Journal*, 785, 64-76
- 17) Shibuya, T., Ouchi, M., Nakajima, K., Hashimoto, T., Ono, Y., Rauch, M., Gauthier, J., Shimasaku, K., Goto, R., Mori, M., Umemura, M., 2014, “What is the Physical Origin of Strong Ly $\alpha$  Emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Ly $\alpha$  Emitters”, *The Astrophysical Journal*, 788, 74-84
- 18) Susa, H., Hasegawa, K., Tominaga, N., 2014, “The mass spectrum of the first stars”, *The Astrophysical Journal*, 792, 32-48
- 19) Tanikawa, A., Umemura, M., 2014, “Merger criteria of multiple massive black holes and the impact on the host galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*”, 440, 652-662
- 20) Toshikawa, J., Kashikawa, N., Overzier, R., Shibuya, T., Ishikawa, S., Ota, K., Shimasaku, K., Tanaka, M., Hayashi, M., Niino, Y., Onoue, M., 2014, “A First Site of Galaxy Cluster Formation: Complete Spectroscopy of a Protocluster at  $z=6.01$ ”, *The Astrophysical Journal*, 792, Issue 1, article id. 15, 15 pp.

## B) 査読無し論文

- 21) Bicknell, G. V., McNamara, B. R., Nawaz, M. A., Sutherland, R. S., Umemura, M., Wagner, A. Y., 2014, "AGN feedback by relativistic jets", Proceedings of the International Astronomical Union, 10, S313, p101-107.
- 22) Bicknell, G. V., Nawaz, M. A., Wagner, A. Y., Umemura, M., McNamara, M. A., Sutherland, R. S., "Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei", 2014, JPS Conference Proceedings, 1, 1, 5098 pp.
- 23) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2014, "A New Concept of Transonic Galactic Outflows in a Cold Dark Matter Halo with a Central Super-Massive Black Hole", JPSCP, 2, 7
- 24) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2014, "Transonic galactic outflows and their influences to the chemical evolution of galaxies and intergalactic space", AIPC, 1594, 82-87
- 25) Komatsu, Y., Umemura, M.; Shoji, M.; Shiraishi, K., Kayanuma, M., Yabana, K., 2014, "Toward understanding as photosynthetic biosignatures: light harvesting and energy transfer calculation", Search for Life Beyond the Solar System. Exoplanets, Biosignatures & Instruments, 2014ebi.conf.1.3K
- 26) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M., Yabana, K., Shiraishi, K. 2014, "Toward extending photosynthetic biosignatures: quantum dynamics calculation of light harvesting complexes", 40th COSPAR Scientific Assembly, Abstract F3.4-8-14. 40, 1561
- 27) Potter, T. M., Staveley-Smith, L., Kirk, J., Reville, B., Bicknell, G. V., Sutherland, R. S., Wagner, A. Y., Zanardo, G., 2014, "Three-dimensional simulations of the expanding remnant of SN 1987A", Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 296, 330-331
- 28) Susa, H., Hasegawa, K., Tominaga, N., 2014, "On the IMF of first stars", AIP Conference Proceedings, 1594, 105-108

## (2) 国際会議発表

### A) 招待講演

- 1) Wagner, A. Y., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J. 「The Inner Workings of Mechanical AGN Feedback」 ASTRON Colloquium (2015年2月12日, ASTRON, Dwingeloo, Netherlands)

### B) 一般講演

- 1) Umemura, M., "HPC at CCS", CCS-LBNL Collaborative Workshop (April 10-11, 2014, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Japan)

- 2) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M., Yabana, K., Shiraishi, K., “Light absorption and energy transfer in photosynthesis: Toward extending our current biosignatures”, The Japan Geoscience Union Meeting 2014, (Apr. 28- May 2, 2014, Pacifico Yokohama, Kanazawa)
- 3) Kidachi, K., Umemura, M., Shoji, M., Komatsu, Y., Kayanuma, M., Yabana, K., Shiraishi, K., “Theoretical investigation of amino acid formations on interstellar dust”, (poster), The Japan Geoscience Union Meeting 2014, (Apr. 28- May 2, 2014, Pacifico Yokohama, Kanazawa)
- 4) Ishiyama, T. “Hierarchical Formation of Dark Matter Halos and the Free Streaming Scale”, IAUS308: The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web(Jun. 23-28, 2014, Tallinn, Estonia)
- 5) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M., Yabana, K., Shiraishi, K., “Toward extending our current biosignatures: Light absorption and energy transfer calculation in photosystem”, Origins2014, (Jul. 6-11, 2014, the Nara-ken New Public Hall, Nara)
- 6) Kidachi, K., Umemura, M., Shoji, M., Komatsu, Y., Kayanuma, M., Yabana, K., Shiraishi, K., “Theoretical investigation of alanine formation on interstellar dust”, (poster), Origins2014, (Jul. 6-11, 2014, the Nara-ken New Public Hall, Nara)
- 7) Suzuki, H., Umemura, M. “The effect of internal and background UV radiation on the galaxy formation”, (poster), The physics of first star and first galaxy formation, (Jul. 9-14, 2014, Edinburgh, Scotland, UK)
- 8) Ogiya, G., Mori, M., “Solving the core-cusp problem through resonances between dark matter particles and density waves of interstellar gas”, (poster), IAU Symposium 311 Galaxy Masses as Constraints of Formation Models (Jul. 21-25, 2014, Oxford, UK)
- 9) Ogiya G., “The link among density structures, scaling laws and the too-big-to-fail problem of CDM halos”, (poster), 11th Potsdam Thinkshop: Satellite galaxies and dwarfs in the local group (Aug. 25-29, 2014, Potsdam, Germany)
- 10) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “ Puzzling Outer Density Profile of the Dark Matter Halo in the Andromeda Galaxy”, (poster), Satellite galaxies and dwarfs in the local group, (Aug. 25-29, 2014, Potsdam, Germany)
- 11) Umemura, M., Takahashi, R. “The Cutting-edge of Radiation Hydrodynamics”, The 6th East-Asian Numerical Astrophysics Meeting (Sep.15-19, 2014, Suwon, Korea)
- 12) Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Saito, Y., “Hunting a Wandering Supermassive Black Hole in M31 Halo Hermitage using GPU Cluster”, The 6th East-Asian Numerical Astrophysics Meeting (Sep.15-19, 2014, Suwon, Korea)
- 13) Kirihara, T., Miki, Y., Mori M., “A new puzzle of the Cold Dark Matter Prediction in the Outer Density Profile of the Andromeda Galaxy”, (poster), Evolving Galaxies in Evolving Environments, (Sep. 15-19, 2014, Bologna, Italy)

- 14) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “Transonic solutions of isothermal galactic outflows in gravitational potential of a dark matter halo and a super massive black hole”, Accretion and Outflows throughout the scales from young stellar objects to AGNs (Oct.1-3, 2014, Lyon, France)
  - 15) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, “photosynthesis on exoplanets: Light absorption model”, (Oct. 13-16, 2014, The 14th European Astrobiology Meeting, Edinburgh, Scotland)
  - 16) Ishiyama, T. “Structures of Dark Matter Halos Near the Free Streaming Scale and Their Impact on Indirect Detections”, (poster), Fifth International Fermi Symposium (Oct. 20-24, 2014, Nagoya, Japan)
  - 17) Umemura, M., Miki, Y., “Development of Applications with GPU/TCA ~Research and Development on Unified Environment of Accelerated Computing and Interconnection for Post-Petascale Era~, (poster), JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (Dec. 2-4, 2014, Kobe, Japan)
  - 18) Wagner, A. Y., Umemura, M., Bicknell, G. V. 「Types of AGN Feedback」 AGN Feedback Mini-workshop (Dec.12, 2014, Research School of Astronomy and Astrophysics, Canberra, Australia.)
  - 19) Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., “Relics of Galaxy Merging: Optical Emission from a Star Cluster Trailing a Wandering Massive Black Hole in the M31 Halo”, (poster), Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset (Dec.18-20, 2014, Taipei, Taiwan)
  - 20) Shibuya, T., Ouchi, M., Harikane, Y., “Size Evolution at  $z=0-10$ ”, Getting a Grip on Galactic Girths (Feb.2-6, 2015, IPMU, Kashiwa, Japan)
  - 21) Kawaguchi, T., Saito, Y., Miki, Y., Mori, M., “Relics of Galaxy Merging: Observational Predictions for a Wandering Massive Black Hole and Accompanying Star Cluster in the M31 Halo”, (poster), 2015 Aspen Winter Conference -- Black Holes in Dense Star Clusters (Jan.17-22, 2015, Aspen, USA)
  - 22) Kidachi, K., Umemura, M., Shoji, M., Komatsu, Y., Kayanuma, M., Shigeta, Y., “Glycine formation pathway via hydantoin in the interstellar medium”, (poster), Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites, (Mar. 5-7, 2015, Tokyo Institute of Technology, Japan)
- (3) 国内学会・研究会発表
- A) 招待講演
    - 1) 森正夫, 「Research Activities of Astrophysics at CCS」, CCS – LBNL Collaborative Workshop (2014年4月10~11日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)

- 2) 石山智明, 「大規模シミュレーションと大規模データ」, 第 27 回 理論懇シンポジウム (2014 年 12 月 24 日～26 日, 国立天文台, 三鷹市)

## B) その他の発表

- 1) 梅村雅之, 「活動銀河核のサイエンスー現状と展望ー」, 活動銀河核ワークショップ ～2020 年代への展望～ (2014 年 4 月 23～24 日, 国立天文台, 三鷹市)
- 2) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「球対称定常銀河風モデルによる遷音速解析」, 「次世代大規模探索とシミュレーションで挑む宇宙再電離」ミーティング (2014 年 5 月 29 日～30 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)
- 3) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「球対称定常銀河風モデルによる遷音速解析」, 銀河進化研究会 (2014 年 6 月 4 日～6 日, 国立天文台, 東京都三鷹市)
- 4) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 「Puzzling outer-density profile of the dark matter halo in the Andromeda galaxy」, 銀河進化研究会 (2014 年 6 月 4 日～6 日, 国立天文台, 三鷹市)
- 5) 森正夫, 桐原崇亘, 三木洋平, 川口俊宏, 濟藤祐理子, 「アンドロメダ銀河における, さすらいのブラックホールとダークマターハローの姿」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 6) 川口俊宏, 濟藤祐理子, 三木洋平, 森正夫, 「アンドロメダ銀河の潮汐破壊を耐えきった衛星銀河中心部に期待される観測的特徴」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 7) 扇谷豪, Andreas Burkert 「Re-examining the Too-Big-To-Fail Problem for Dark Matter Halos with Central Density Cores」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 8) 石山智明, 「New Numerical Galaxy Catalog ( $v^2GC$ ) Model . II. 超大規模宇宙論的 N 体シミュレーション」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 9) 扇谷豪, Andreas Burkert, 「Re-examining the Too-Big-To-Fail Problem for Dark Matter Halos with Central Density Cores」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 10) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ダークマターハローと中心ブラックホールの重力場におけるポリトロピック球対称定常銀河風の遷音速解析」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 11) 木立佳里, 梅村雅之, 庄司光男, 小松勇, 栢沼愛, 矢花一浩, 白石賢二, 「星間ダストにおけるアミノ酸生成過程の理論的研究」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日, 山形大学, 山形市)
- 12) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ポリトロピック球対称定常銀河風モデルによる遷音速解析と実現性の考察」, 流体力学会 2014 年会 (2014 年 9 月 15 日～17 日, 東北大学, 仙台市)
- 13) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携拠点 Computational Astrobiology (CAB)ー計算科学の

- 手法を用いた異分野間連携」, 自然科学研究機構新分野創成センター宇宙における生命研究分野プロジェクト&JAXA 地球周回軌道でのアストロバイオロジー実験 WG 合同研究会 &第7回アストロバイオロジーワークショップ Part2 (2014年11月29日, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎市)
- 14) 小松勇, 「太陽系外惑星における光合成モデル」, 自然科学研究機構新分野創成センター宇宙における生命研究分野プロジェクト&JAXA 地球周回軌道でのアストロバイオロジー実験 WG 合同研究会&第7回アストロバイオロジーワークショップ Part2 (2014年11月29日, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎市)
  - 15) 木立佳里, 梅村雅之, 庄司光男, 小松勇, 栢沼愛, 重田育照, 「星間ダスト上でのアラニン形成に関する理論的考察」, 自然科学研究機構新分野創成センター宇宙における生命研究分野プロジェクト&JAXA 地球周回軌道でのアストロバイオロジー実験 WG 合同研究会&第7回アストロバイオロジーワークショップ Part2 (2014年11月29日, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎市)
  - 16) 長谷川賢二「大規模再電離シミュレーションの為にサブグリッドモデルの開発」, 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 17) 行方大輔, 「ダストからの赤外線放射を考慮した輻射流体計算コードの開発」,(ポスター), 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 18) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ポリトロピック球対称定常銀河風モデルによる遷音速解析とその応用」, 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 19) 加藤一輝, 森正夫, 扇谷豪, 「Cold dark matter halo における Cusp/Core 問題と Too-Big-To-Fail 問題の関連性」, 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 20) 村田貴紀, 「銀河形成初期のアウトフローと銀河形状」, 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 21) 木立佳里, 「量子化学計算による宇宙でのアミノ酸生成過程の研究」第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」(2014年12月24日~26日, 国立天文台, 三鷹市)
  - 22) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学の取り組み Computational Astrobiology (CAB) – 計算科学の手法を用いた異分野間連携」, 「自然科学における階層と全体」シンポジウム (2015年1月19日~20日, 桑山ビル8階 (名古屋駅前), 名古屋市)
  - 23) 長谷川賢二「再電離シミュレーションコードの開発とそれを用いた再電離期における 21cm 線分布の計算」, 初代星・初代銀河研究会 (2015年1月19日~21日, 東北大学, 仙台市)
  - 24) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「3次元輻射流体力学による星間輻射場中での球状星団形成モデルの研究」, 初代星・初代銀河研究会 (2015年1月19日~21日, 東北大学, 仙

台市)

- 25) 鈴木裕行, 長谷川賢二, 梅村雅之, Semelin, B., 「non-grid based Lya 輻射輸送コードの開発」, (ポスター), 初代星・初代銀河研究会(2015年1月19日~21日, 東北大学, 仙台市)
- 26) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 「Puzzling outer-density profile of the dark matter halo in the Andromeda galaxy」, 初代星・初代銀河研究会 (2015年1月19日~21日, 東北大学片平キャンパス, 仙台市)
- 27) 石山智明, 「New Numerical Galaxy Catalog (v<sup>2</sup>GC) Model における超大規模宇宙論的 N 体シミュレーション」, 平成 26 年度 CfCA ユーザーズミーティング (2015年1月20日~21日, 国立天文台, 三鷹市)
- 28) 行方大輔, 「ダスト再放射を考慮した輻射流体計算コードの開発」, (ポスター), 平成 26 年度 CfCA ユーザーズミーティング (2015年1月20日~21日, 国立天文台, 三鷹市)
- 29) 長谷川賢二, 「輻射流体的フィードバックを考慮した新しい再電離シミュレーション」, SKA-Japan ワークショップ 2015 (2015年3月3日~5日, 国立天文台, 三鷹市)
- 30) 行方大輔, 「ダスト再放射を考慮した輻射流体計算コードの開発」, HPCI 戦略プログラム分野 5 全体シンポジウム (2015年3月11日~12日, 紀伊フォーラム, 東京都)
- 31) 長谷川賢二, 「大規模再電離シミュレーションの為にサブグリッドモデルの開発」, 日本天文学会 2015 年春季年会 (2015年3月18日~21日, 大阪大学, 豊中市)
- 32) 加藤一輝, 森正夫, 扇谷豪, 「Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性」, 日本天文学会 2015 年春季年会 (2015年3月18日~21日, 大阪大学, 豊中市)
- 33) 森正夫, 「ダークマターの構造と銀河進化」, 研究会「新世紀における 銀河宇宙観測の方向」 (2015年3月31日~4月2日, KKR 熱海, 熱海市)

#### (4) 著書, 解説記事等

##### 【著書】

シリーズ<宇宙物理学の基礎> : 宇宙流体力学の基礎  
福江純, 和田桂一, 梅村雅之著, 日本評論社 (2014)

##### 【翻訳】

森正夫, 「銀河を操るダークウェブ」, 日経サイエンス 2014 年 10 月号, 8 月 25 日

##### 【解説記事】

情報処理 “「京の威力で宇宙の正体に迫る」ーダークマターの超大規模シミュレーション”, 石山智明 (情報処理学会, 2014 年 8 月)

## 7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

### 【異分野間連携】

- 1) 星間アミノ酸生成の研究 (梅村, 木立, 小松)

宇宙・生命分野間連携により，星間空間におけるアミノ酸前駆体ならびにアミノ酸の生成過程についての量子力学計算を進めた。

2) 系外惑星における光合成アンテナ機構の研究 (小松, 梅村, 石原)

宇宙・生命分野間連携により，系外惑星の大気吸収効果を入れた光合成光捕集機構について量子化学計算を進めた。

【国際連携】

・ Masayuki Umemura

CCS-LBNL Collaborative Workshop, April 10th - 11th, 2014

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

・ Masao Mori, Collaboration with Prof. Andreas Burkert, "Supernova feedbacks and structure of cold dark matter halo", (2014年9月30日～10月6日, Ludwig Maximilians Universität München, Germany)

・ Alexander Wagner, 国際テニユアトラック

- a) Collaboration with Prof. Joseph Silk (Institut d'Astrophysique de Paris) and Prof. Colin Norman (Johns Hopkins University, Baltimore MD) on AGN-pressure Induced Star Formation in Disk Galaxies.
- b) Collaboration with Raffaella Morganti and Tom Oosterloo (ASTRON, Netherlands), Kalliopi Dasyra and Françoise Combes (Observatoire de Paris), Geoffrey Bicknell and Dipanjan Mukherjee (RSAA, ANU, Canberra, Australia), on Multiphase AGN-driven Outflows.
- c) Collaboration with Christoph Federrath and Roland Crocker (RSAA, ANU, Canberra, Australia) on simulations and interpretations of the Fermi Bubble.

8. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

1) 「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」ミーティング

2014年5月29日～30日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市

2) 宇宙物理理論研究室発足20周年記念式典 (2014年9月27日, つくば研究支援センター)

交流会 (2014年9月28日, 筑波大学計算科学研究センター)

<http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/Astro/conferences/ccs/ja/2014/09/27/twenty-years/>



3) 「天体形成研究会」

2014 年 10 月 17 日 ～18 日，筑波大学計算科学研究センター，つくば市

<http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/Astro/conferences/ccs/ja/2014/10/17/tentaikaisei/>

4) 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第2回ワークショップ

2014 年 11 月 3 日 ～4 日，筑波大学計算科学研究センター，つくば市

<http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/Astro/conferences/ccs/ja/2014/11/03/smbh-liason-workshop/>

5) 「初代星・初代銀河研究会」

2015 年 1 月 19 日～21 日，東北大学，仙台市

9. 管理・運営

組織運営や支援業務の委員・役員の実績

・梅村雅之

計算科学研究センター センター長

計算科学研究センター 運営委員会委員長

計算科学研究センター 人事委員会委員長

計算科学研究センター 宇宙・原子核物理研究部門主任

計算科学研究センター 運営協議会委員

計算科学研究センター 研究企画室委員

物理学域 運営委員会委員

物理学域 宇宙物理理論グループ長

・森正夫

筑波大学計算科学研究センター・共同研究委員会学内委員

数理物質科学研究科学生相談室員  
物理学域図書委員会委員  
計算基礎科学連携拠点企画チーム

## 10. 社会貢献・国際貢献

森正夫，出前講義，「宇宙物理学入門」，茨城県立並木中等教育学校，2014年6月18日

## 11. その他

【海外長期滞在】

・扇谷豪

Ludwig-Maximilians-Universität München, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics  
滞在 (2014年4月 – 2015年3月)

## IV. 宇宙観測グループ

教授	中井直正、久野成夫
講師	瀬田益道
助教	永井 誠
研究員	金子紘之、長崎岳人、Dragan SALAK
大学院生	11名（数理工学科学研究科後期課程2名、前期課程8名、教育研究科1名）
卒研究生	3名

南極望遠鏡の推進のための戦略的人員配置として教授1名が配置され、4月1日付けで国立天文台野辺山宇宙電波観測所より久野成夫が着任した。3月31日で講師の瀬田益道が関西学院大学工学部に転出し、助教の永井誠が任期を全うした。研究員の金子紘之は国立天文台野辺山宇宙電波観測所へ、長崎岳人は高エネルギー加速器研究機構へ、Dragan SALAKは関西学院大学工学部へ転出した。

国土地理院つくば32m鏡は種々の不具合の修理が終了し、VLBIおよび単一鏡観測を再開した。南極天文学の推進においては、南極望遠鏡の技術開発を継続するとともに、10mテラヘルツ望遠鏡の設置場所をドームふじ基地から既存の越冬基地があるドームCに候補地を変更した。また30m級テラヘルツ望遠鏡計画の本格的な検討を開始した。

国立天文台野辺山45m電波望遠鏡、アルマ、VLA等の既存の共同利用望遠鏡にも観測提案を行い、系外銀河や銀河系星形成領域等の観測を行った。

### 【1】国土地理院つくば32m鏡の電波望遠鏡の開発整備と観測

#### (1) 観測システムの開発整備

- アンテナの雨除けカバーの保守点検を10月に行った。カバーの取り付け金具がかなりさびていて締まらないので交換の必要があり、来年度に実施することとした。
- 2年に一度実施している受信機の冷凍機クライオスタットの保守を夏に実施した。
- 受信機の冷凍機のコンプレッサが1月に故障したので修理した。
- 受信機関係の小部品の修理交換やデータ取得用のパソコンの交換を行った。
- 4月にアンテナの性能評価を行い、大きな不都合がないことを確認したが、開口能率は1割程度低下していることがわかった。
- アンモニアの $\text{NH}_3$  (J,K)=(4,4)近くの周波数(24.1GHz付近)にアンテナ外から非常に強い混信が入ってきた。方向を調べたところ東京を含む関東方面から来ていることがわかった。電波天文の保護周波数から少し外れているために放射を止めるように直接的には言えないが、国立天文台電波専門委員会周波数保護小委員会に報告し、放射源の検討をすることにした。天体からの $\text{NH}_3$  (J,K)=(4,4)輝線が狭い場合は影響を受けないが、天の川の銀河面掃天観測のようなスペクトル線が広い場合は観測に多大な影響がある。

#### (2) 観測

(VLBI観測)

- 銀河系(天の川銀河)の中心核にある巨大ブラックホールにガスが落下することが外国の赤外線観測から予言され、そのときに中心核が赤外線、電波、X線等で明るく輝くと期

待された。そのため一昨年から全世界的に銀河系中心核の明るさのモニターが行われている。つくば32m鏡を含む国内VLBI網でも昨年に引き続き夏までK帯でモニター観測を実施した。残念ながらフレアーは起きず、ガスが銀河系中心核には落下していないことがわかった。各種研究会で報告するとともに論文として出版した。

○従来、X帯(8GHz)の大学連携VLBIは国土地理院が実施していたが、本年度から筑波大学が担当することになり、K帯(22GHz)と合わせて大学連携VLBI観測に係るつくば32mアンテナの運用は全て筑波大学が行った。

(単一鏡観測)

○天の川銀河(銀河系)のアンモニア反転遷移6本 $\text{NH}_3$  (J,K)=(1,1)-(6,6)の掃天観測のうち、銀緯 $b=0$ 度に沿って観測を継続している。特に銀河系中心に近いところは強く受かっている。

○オリオン分子の分子雲コア約80個の励起温度をアンモニア $\text{NH}_3$  (J,K)=(1,1)-(6,6)の観測から測定している。分子雲コアから星が誕生するためにはガスの乱流が減少して音速のみによる圧力となって内部圧力が弱くなり収縮して星が生まれるのではないかと推測している。その仮説を証明するためには温度の精密な測定が必要であり、アンモニア観測による励起温度の測定は最も適している。

○系外銀河 NGC 3079 で発見したアンモニア $\text{NH}_3$  (J,K)=(1,1),(2,2)の吸収線の観測結果を、米国の大電波干渉計(VLA)の詳細観測とともに論文として出版した。

## 【2】南極天文学の推進

### (1) 南極望遠鏡の開発

○30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡

チリでの500GHz帯の試験運用で、指向性に改善の余地があることが判明していた。30cm鏡に、新たに230GHzの常温受信機を搭載し、国立天文台野辺山宇宙電波観測所で指向性の改善を目指して、月、太陽、オリオンKLの観測を行った。その観測及び解析の結果、望遠鏡の設置時の水平面に対する設置精度が想定以上に指向精度に影響を及ぼしていることが分かった。今後は、設置精度を高めることで指向性を改善する。

○10m テラヘルツ望遠鏡

昨年度までに、主鏡・副鏡に回転双曲面を用いたRitchey-Chrétien望遠鏡(RC)とし、RCによってできた焦点面から超伝導電波カメラまで電波を導くための広視野伝送光学系(鏡4枚と誘電体レンズ1枚)の設計解を得ていた。しかし、望遠鏡構造と視野の端での回折の影響により、この伝送光学系は視野1度の確保が難しい可能性のあることがわかってきた。今年度、主鏡・副鏡のRCは変更せずに、焦点面を中心部と外周部に分割し、それぞれに対して誘電体レンズ2枚からなる伝送光学系の検討を始めた(図1)。このような光学系を検討することで、望遠鏡光学系の簡素化と光学素子の小型化を期待できる。

電波カメラ用リレー光学系の反射鏡群の構造設計を行った。最短波長 $200\mu\text{m}$ で観測するためには主鏡副鏡を含む全反射鏡を合わせた

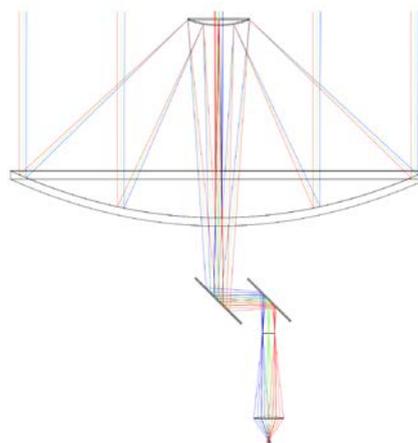


図1. 視野中心部の伝送光学系の例

鏡面精度は誤差  $20\mu\text{m}$  以下でなければならない。そのうち電波カメラ用リレー光学系の反射鏡4枚の合算精度は誤差  $10\mu\text{m}$  以下にする必要があるため、各反射鏡の重力変形と熱変形を有限要素法で解析し、軽量化をはかりつつ鏡面精度を維持する構造を決定して、必要鏡面精度と重量を達成する設計を得た。

当該望遠鏡の受信電波の強度を正確に決定する方法（強度較正法）を考案した。大気の光学的厚みの大きなサブミリ・テラヘルツ波帯では従来の1温度較正法では測定電波強度の誤差が大きいため2温度較正法を提案した。較正に必要な大気の光学的厚み $\tau$ はラジオメータを用いて測定し、その測定周波数の $\tau$ から大気モデルを用いたシミュレーションにより望遠鏡による観測周波数での $\tau$ を推定することとした。決定精度はサブミリ波帯で誤差5%以下と仕様値を満たし、テラヘルツ波帯でも誤差8%以下とすることができた。

制御系について仕様検討と基本設計を行なった。制御ソフトウェアについて、保守性・柔軟性・拡張性を確保するため、機器毎にTCP/IPを介して制御可能なライブラリと全体を集約するデータベースを置く構成を提案した。ドームふじ基地の既存のインフラを想定して検討したところ、日本からの遠隔操作を含めて、必要な機能を実現できることがわかった。ただし、取得される全データの転送だけは既存の衛星回線では不可能で、記憶媒体によって輸送する必要がある。

#### ○30m級テラヘルツ望遠鏡

天文分野の次期大型計画の候補として、南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画の検討を開始した。関連する他の大口径単一鏡計画関係者とも協力し、南極大口径単一鏡でテラヘルツ帯の観測を行うことによって推進できるサイエンスについての検討を開始した。

### (2) 超伝導電波カメラの開発

南極望遠鏡による広視野観測を実現するために、超伝導電波カメラの開発を進めている。望遠鏡焦点面とカメラ焦点面を結合するために、誘電体レンズ2枚を用いた冷却光学系を用いる。この光学系と超伝導カメラを組み合わせ、0.1Kにてビームパターンの測定を行った。測定のダイナミックレンジは約20dBであり、ビームパターンの形状は円対称となることを確認した。さらに、焦点面に投影されたビーム位置はシミュレーションにおける設計値と一致することを確認した。また、これらの技術をもとに、野辺山45m電波望遠鏡に搭載し試験観測を行うための90/150-GHz帯ミリ波超伝導カメラの開発および光学設計を進めた。

### (3) 人員体制の強化と概算要求等

南極望遠鏡の推進のための戦略的人員配置として教授1名が配置され、4月1日付けで国立天文台野辺山宇宙電波観測所より久野成夫が着任した。概算要求は文部科学省に事前説明を行ったが、ドームふじ基地の新しい建物等が建設される見込みが立たず、当該基地に建設することを断念した。そのため、越冬できる既存の基地に建設することとし、ドームCにあるフランス・イタリアのコンコルディア基地を有力候補地としてフランス極地研究所と協議を開始した。

## 【3】銀河の観測的研究

(1) 近傍渦巻銀河であるM33を野辺山45m電波望遠鏡でCO(J=1-0)、ASTEでCO(J=3-2)輝線のマッピング観測結果から銀河の分子ガス雲の物理状態と星形成活動の関係を調査した。銀河の中で最も活発に星形成活動を行っているNGC 604領域では星形成率と分子ガ

質量の比から定義される星形成効率が銀河円盤の他の領域と比較して1桁程度高いことが明らかになった。CO(J=3-2)/CO(J=1-0)比と文献値からの分子ガス密度見積りなどから、NGC 604 ではより重い星が選択的に作られ、かつ高密度なガスが多いことがこの性質を生み出していることが分かった。NGC 604 は近傍の渦巻銀河で経験的に知られる星形成と分子ガスの相関関係を満たさず(図 2)、むしろ遠方の激しく星形成活動を行っている銀河に近い性質を持つため、本研究は構造を分解できない遠方銀河の激しい星形成活動の原因解明にも示唆を与えるものである。

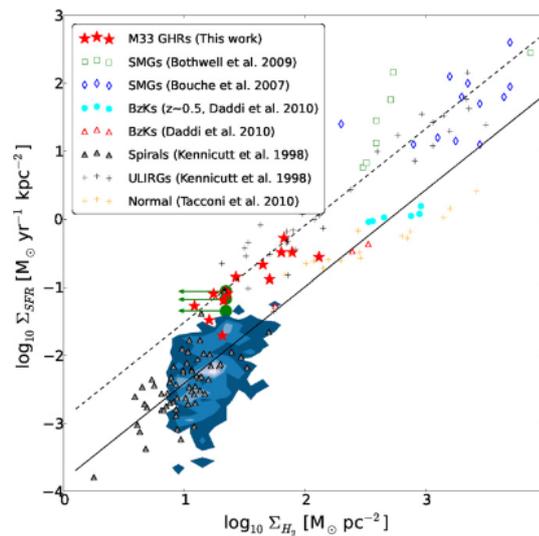


図 2. さまざまな銀河種族の分子ガスと星形成の関係、赤星が NGC 604 領域

(2) 系外銀河 NGC 3079 はその中心から数 kpc に渡るスーパーバブルを生じる。NGC 3079 中心の主たるエネルギー源を探るために、つくば 32m 望遠鏡と VLA を用いたアンモニア分子観測を行った。VLA 観測の空間分解能は 0.09"に

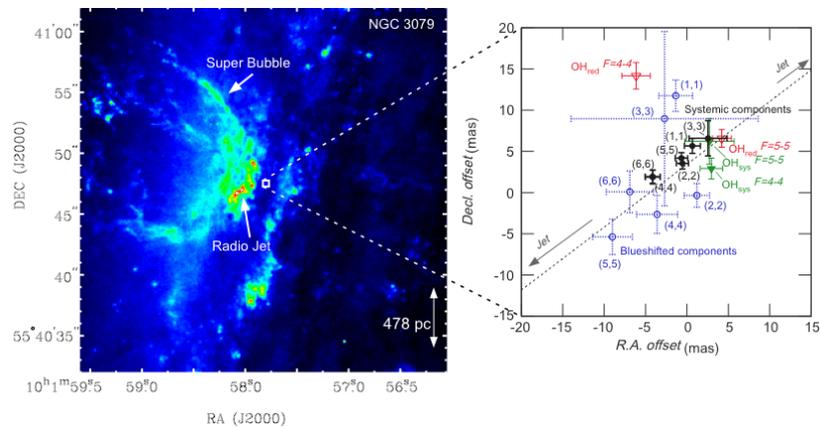


図 3. NGC 3079 中心付近の H $\alpha$  スーパーバブル (左) と中心核のアンモニア分子の分布 (右)。

達し、アンモニアの(J, K) = (1, 1) – (6, 6) 遷移が二つの速度成分

(システム速度成分と青方偏移成分)で検出された。これらの輝線強度比から導出される温度と柱密度は、これまでに報告されている他の近傍銀河に比べて高い。アンモニアのピーク位置を求めた結果、分布が NGC 3079 の AGN ジェットに沿っていることが明らかになった。これらは AGN ジェットが中心領域ガスの加熱に大きく寄与していることを示唆している。

(3) 爆発的星形成が起きている NGC 1808 銀河の分子ガスの分布とその物理状態を調べるために  $^{12}\text{CO}(J=3-2)$  と  $^{13}\text{CO}(J=3-2)$  の観測を行った。CO ガスが棒状など銀河中心以外にも広がっていることがわかった。CO ガスの位置速度データは分子雲の不規則的な運動を示している。これは、分子ガスの一部が銀河中心から噴出されている可能性を示唆している。また、検出された輝線のデータと文献の CO(1-0) と CO(2-1) のデータを用いて物理状態の解析を行った。その結果、銀河中心の分子ガスの温度は 35K、密度は  $10^{3.5} \text{ cm}^{-3}$  程度、やや高温・高密度ガスを示唆している。

<論 文>

(査読論文)

1. Baldi, Ranieri D.; Giroletti, Marcello; Capetti, Alessandro; Giovannini, Gabriele; Casasola, Viviana; Pérez-Torres, Miguel A.; Kuno, Nario, “Molecular gas and nuclear activity in early-type galaxies: any link with radio loudness?”, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 574, id.A65, 8 pp. (2015).
2. Hirota, Akihiko; Kuno, Nario; Baba, Junichi; Egusa, Fumi; Habe, Asao; Muraoka, Kazuyuki; Tanaka, Ayako; Nakanishi, Hiroyuki; Kawabe, Ryohei, “Wide-field  $^{12}\text{CO}$  (J = 1-0) imaging of the nearby barred galaxy M 83 with NMA and Nobeyama 45 m telescope: Molecular gas kinematics and star formation along the bar”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 66, id.46, 22 pp. (2014).
3. Imada, Hiroaki; Nagai, Makoto; Kino, Masaru; Seta, Masumichi; Ishii, Shun; Nakai, Naomasa, “Condition of Optical Systems Independent of frequency for Wide Field-of-View Radio Telescope”, *IEEE Transaction on Terahertz and Technology*, Volume 5, No. 1, 7 pp (2015).
4. Kamenno, Seiji; Mizuno, Izumi; Nakamura, Fumitaka; Kuroo, Makoto; Kano, Amane; Kawaguchi, Noriyuki; Shibata, Katsunori M.; Kuno, Nario; Takano, Shuro; Kuji, Seisuke, “The software-based polarization spectrometer PolariS”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 9153, id. 91532D 6 pp. (2014).
5. Martín, S.; Kohno, K.; Izumi, T.; Krips, M.; Meier, D. S.; Aladro, R.; Matsushita, S.; Takano, S.; Turner, J. L.; Espada, D.; Nakajima, T.; Terashima, Y.; Fathi, K.; Hsieh, P.-Y.; Imanishi, M.; Lundgren, A.; Nakai, N.; Schinnerer, E.; Sheth, K.; Wiklind, T., “Multimolecule ALMA observations toward the Seyfert 1 galaxy NGC 1097”, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 573, id.A116, 13 pp. (2015).
6. Matsumura, T.; Akiba, Y.; Borrill, J.; Chinone, Y.; Dobbs, M.; Fuke, H.; Ghribi, A.; Hasegawa, M.; Hattori, K.; Hattori, M.; Hazumi, M.; Holzapfel, W.; Inoue, Y.; Ishidoshiro, K.; Ishino, H.; Ishitsuka, H.; Karatsu, K.; Katayama, N.; Kawano, I.; Kibayashi, A.; Kibe, Y.; Kimura, K.; Kimura, N.; Koga, K.; Kozu, M.; Komatsu, E.; Lee, A.; Matsuhara, H.; Mima, S.; Mitsuda, K.; Mizukami, K.; Morii, H.; Morishima, T.; Murayama, S.; Nagai, M.; Nagata, R.; Nakamura, S.; Naruse, M.; Natsume, K.; Nishibori, T.; Nishino, H.; Noda, A.; Noguchi, T.; Ogawa, H.; Oguri, S.; Ohta, I.; Otani, C.; Richards, P.; Sakai, S.; Sato, N.; Sato, Y.; Sekimoto, Y.; Shimizu, A.; Shinozaki, K.; Sugita, H.; Suzuki, T.; Suzuki, A.; Tajima, O.; Takada, S.; Takakura, S.; Takei, Y.; Tomaru, T.; Uzawa, Y.; Wada, T.; Watanabe, H.; Yoshida, M.; Yamasaki, N.; Yoshida, T.; Yotsumoto, K., “Mission Design of LiteBIRD”, *Journal of Low Temperature Physics*, Volume 176, Issue 5-6, pp. 733-740 (2014).
7. Miura, Rie E.; Kohno, Kotaro; Tosaki, Tomoka; Espada, Daniel; Hirota, Akihiko; Komugi, Shinya; Okumura, Sachiko K.; Kuno, Nario; Muraoka, Kazuyuki; Onodera, Sachiko; Nakanishi, Kouichiro; Sawada, Tsuyoshi; Kaneko, Hiroyuki; Minamidani, Tetsuhiro; Fujii, Kosuke; Kawabe, Ryohei, “Enhancement of CO(3-2)/CO(1-0) Ratios and Star Formation Efficiencies in Supergiant H II Regions”, *The Astrophysical Journal*, Volume 788, article id. 167, 7 pp. (2014).
8. Miyamoto, Yusuke; Nakai, Naomasa; Kuno, Nario, “Influence of shear motion on

- evolution of molecular clouds in the spiral galaxy M51”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, id.36, 18 pp. (2014).
9. Miyamoto, Yusuke; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Salak, Dragan; Hagiwara, Kenzaburo; Nagai, Makoto; Ishii, Shun; Yamauchi, Aya, “Hot ammonia in the center of the Seyfert 2 galaxy NGC 3079”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 67, id.5, 15 pp. (2015).
  10. Mizuno, Izumi; Kamenno, Seiji; Kano, Amane; Kuroo, Makoto; Nakamura, Fumitaka; Kawaguchi, Noriyuki; Shibata, Katsunori M.; Kuji, Seisuke; Kuno, Nario, “Software Polarization Spectrometer "PolariS"”, Journal of Astronomical Instrumentation, Volume 3, id. 1450010, 16 pp. (2014).
  11. Morokuma-Matsui, Kana; Sorai, Kazuo; Watanabe, Yoshimasa; Kuno, Nario, “Stacking analysis of  $^{12}\text{CO}$  and  $^{13}\text{CO}$  spectra of NGC 3627: Existence of non-optically thick  $^{12}\text{CO}$  emission?”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 67, id.2, 17 pp. (2015).
  12. Nakamura, Fumitaka; Sugitani, Koji; Tanaka, Tomohiro; Nishitani, Hiroyuki; Dobashi, Kazuhito; Shimoikura, Tomomi; Shimajiri, Yoshito; Kawabe, Ryohei; Yonekura, Yoshinori; Mizuno, Izumi; Kimura, Kimihiko; Tokuda, Kazuki; Kozu, Minato; Okada, Nozomi; Hasegawa, Yutaka; Ogawa, Hideo; Kamenno, Seiji; Shinnaga, Hiroko; Momose, Munetake; Nakajima, Taku; Onishi, Toshikazu; Maezawa, Hiroyuki; Hirota, Tomoya; Takano, Shuro; Iono, Daisuke; Kuno, Nario; Yamamoto, Satoshi, “Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 791, Issue 2, article id. L23, 5 pp. (2014).
  13. Natale, G.; Foyle, K.; Wilson, C. D.; Kuno, N., “A multiwavelength analysis of the clumpy FIR-bright sources in M33”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 441, Issue 1, p.224-242. (2014).
  14. Pan, Hsi-An; Kuno, Nario; Hirota, Akihiko, “Environmental dependence of star formation law in the disk and center of IC 342”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, id.27, 16 pp. (2014).
  15. Tanaka, Ayako; Nakanishi, Hiroyuki; Kuno, Nario; Hirota, Akihiko, “Phase transition between atomic and molecular hydrogen in nearby spiral galaxies”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, id.66 23 pp. (2014).
  16. Tsuboi, Masato; Asaki, Yoshiharu; Kameya, Osamu; Yonekura, Yoshinori; Miyamoto, Yusuke; Kaneko, Hiroyuki; Seta, Masumichi; Nakai, Naomasa; Takaba, Hiroshi; Wakamatsu, Ken-ichi; Miyoshi, Makoto; Fukuzaki, Yoshihiro; Uehara, Kenta; Sekido, Mamoru, “No Microwave Flare of Sagittarius A\* around the G2 Periastron Passing”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 798, article id. L6, 4 pp. (2015).
  17. Tsuzuki, Toshihiro; Nitta, Tom; Imada, Hiroaki; Seta, Masumichi; Nakai, Naomasa; Sekiguchi, Shigeyuki; Sekimoto, Yutaro, “Design of wide-field Nasmyth optical system for a submillimeter camera”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, vol. 1(2), 025002 (2015).
  18. Salak, Dragan; Nakai, Naomasa; Kitamoto, Shoko, “CO ( $J = 3 \rightarrow 2$ ) observations of the starburst galaxy NGC 1808 with ASTE”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, id.96, 15 pp. (2014).

(国際研究集会集録等)

1. Imada, H.; Nagai, M.; Seta, M.; Kino, M.; Ishii, S.; Nakai, N., “Condition of Optical Systems Independent of Frequency for Wide Filed-of-View Radio Telescopes”, Proceedings of 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, p. 155 (2014).
2. Ishii, S.; Seta, M.; Nagasaki, T.; Nakai, N.; Nagai, M.; Miyamoto, Y.; Imada, H.; Doihata, K.; Saito, K.; Sekimoto, Y., “Development of a 30-cm submillimeter-wave telescope for the operation at Dome Fuji in Antarctica”, Proceedings of the SPIE, Volume 9145, id. 914535, 8 pp. (2014).
3. Kamizuka, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Imada, H.; Ohsawa, R.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Okada, K.; Uchiyama, M.; Wada, T.; Nakagawa, T.; Nakamura, T.; Sakon, I.; Onaka, T., “Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure”, Proceedings of the SPIE, Volume 9151, 91515G (2014).
4. Matsuo, T.; Murakami, N.; Kotani, T.; Kawahara, H.; Natsume, N.; Kino, M.; Kurita, M.; Imada, H.; Iribe, M.; Nishida, H.; Kida, M.; Kitou, H.; Ishikawa, K.; Uda, Y.; Tokoro, H.; Nagata, T.; Iwamuro, F.; Miura, N.; Itoh, Y.; Shibai, H.; Tamura, M.; TMT/SEIT members, “High contrast planet imager for Kyoto 4m segmented telescope”, Proceedings of the SPIE, Volume 9147, 91471V (2014).
5. Miyamoto, Y., Nakai N., and Kuno, N., "The Influence of Shear Motion on Evolution of Giant Molecular Associations", Structure and Dynamics of Disk Galaxies, Proceedings of the Conference held 12-16 August, 2013 at the Winthrop Rockefeller Institute, Petit Jean Mountain, Arkansas, USA. Edited by M.S. Seigar and P. Treuthardt. ASP Conference Series, 480, 259 (2014).
6. Morokuma, Kana; Baba, Junichi; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario, “Gas accretion history of galaxies at  $z \sim 0 - 2$ : Comparison of the observational data of molecular gas with the mass evolution model of galaxies”, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 309, pp. 332-332 (2015).
7. Tsuboi, M.; Asaki, Y.; Yonekura, Y.; Miyamoto, Y.; Kaneko, H.; Seta, M.; Nakai, N.; Kameya, O.; Miyoshi, M.; Takaba, H.; Wakamatsu, K.; Fukuzaki, Y.; Morimitsu, T.; Uehara, K.; Sekido, M.; Oka, T.; Takekawa, S.; Omodaka, T.; Handa, T.; Takumi, A., “Daily monitor of Sagittarius A\* at 22 GHz with the Japanese VLBI Network”, Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 303, pp. 382-384 (2014).
8. Tsuboi, M.; Asaki, Y.; Yonekura, Y.; Miyamoto, Y.; Kaneko, H.; Seta, M.; Nakai, N.; Kameya, O.; Miyoshi, M.; Takaba, H.; Wakamatsu, K.; Fukuzaki, Y.; Uehara, K.; Sekido, M., “Sgr A\* at 22 GHz around the G2 peri-center passing with Japanese VLBI Network”, The Astronomer's Telegram, #6083 (2014).
9. Tsuzuki, Toshihiro; Nitta, Tom; Imada, Hiroaki; Seta, Masumichi; Nakai, Naomasa; Seki-guchi, Sigeyuki; Sekimoto, Yutarou, “Design of wide-field Nasmyth optics for a submillimeter camera”, Proceedings of the SPIE, Volume 9153, id. 91532U, 6 pp. (2014).

<学会発表>

1. 藤田真司, 久野成夫(筑波大学), 梅本智文, 西村淳, 南谷哲宏(NAOJ), 濤崎智佳(上越教育大学), 松尾光洋(鹿児島大学), 小野寺幸子, 津田裕也(明星大学), 亀谷和久(東京理科大学), 大橋聡史

- (東大/NAOJ), 銀河面サーベイチーム、「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: W51 領域」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
2. 今田大皓 (筑波大学), 松尾太郎, 木野勝, 山本広大 (京都大学)、「点回折干渉計に用いるピンホール付きビームスプリッタの電磁波解析」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  3. 上塚貴史, 宮田隆志, 酒向重行, 大澤亮, 浅野健太朗, 内山瑞穂, 岡田一志, 内山允史, 毛利清, 尾中敬, 左近樹 (東京大学), 今田大皓 (筑波大学), 中川貴雄, 和田武彦 (JAXA)、「モスアイ構造を用いた長波長中間赤外線高効率光学素子の開発」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  4. 田中邦彦, 岡朋治, 竹川俊也 (慶應大), 亀谷和久 (東京理科大), 永井誠 (筑波大)、「銀河系中心分子層中の衝突分子雲候補天体CO-0.30-0.07」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  5. 山本広大, 松尾太郎, 木野 勝 (京都大), 今田大皓 (筑波大)、「位相振幅同時計測方式波面センサの開発 2」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月19日、大阪大学
  6. 羽澄昌史, 小栗秀悟, 木村誠宏, 佐藤伸明, 鈴木敏一, 田島治, 茅根裕司, 都丸隆行, 永田竜, 長谷川雅也, 服部香里, 森井秀樹, 山口博史, 吉田光宏 (KEK), 秋葉祥希, 石塚光, 井上優貴, 瀬川優子, 渡辺広記 (総研大), 高倉理 (大阪大, 宇都宮真, 河野功, 坂井真一郎, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 杉田寛之, 竹井洋, 西城邦俊, 西堀俊幸, 野田篤司, 福家英之, 松原英雄, 松村知岳, 満田和久, 山崎典子, 吉田哲也, 四元和彦, 和田武彦 (JAXA), 石野宏和, 樹林敦子, 岐部佳朗, 山田要介 (岡山大), William Holzapfel, Adrian Lee, Paul Richards, Aritoki Suzuki, Yasuto Hori (UC Berkeley), Matt Dobbs (McGill U.), Julian Borrill (LBNL), 永井誠 (筑波大), 片山伸彦, 西野玄記 (Kavli IPMU), 中村正吾, 夏目浩太, 水上邦義, 入江郁也, 藤野琢郎, 山下徹 (横浜国大), 井上将徳, 岡田望, 小川英夫, 木村公洋, 高津湊 (大阪府大), 高田卓 (核融合研), 小松英一郎 (MPA), 石徹白晃治, 服部誠, 森嶋隆裕 (東北大), 大田泉 (甲南大), 成瀬雅人 (埼玉大), 並河俊弥 (Stanford U.), 鹿島伸悟, 唐津謙一, 関本裕太郎, 野口卓 (国立天文台), 鶴澤佳徳 (NICT), 大谷知行, 古賀健祐, 美馬覚 (理研)、「LiteBIRD計画の現状」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月19日、大阪大学
  7. 西村淳, 梅本智文, 南谷哲宏 (NAOJ), 濤崎智佳 (上越教育大), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 松尾光洋 (鹿児島大), 津田裕也 (明星大), 大橋聡史 (東大/NAOJ), 銀河面サーベイチーム、「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: M 17 Cloud A における分子雲フィラメントの解析」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  8. 津田裕也, 小野寺幸子 (明星大), 祖父江義明 (東京大), 梅本智文, 西村淳, 南谷哲宏 (NAOJ), 濤崎 智佳 (上越教育大), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 松尾光洋 (鹿児島大), 大橋聡史 (東京大/NAOJ), 亀谷和久 (東京理科大), 銀河面サーベイチーム、「NRO銀河面サーベイプロジェクト: 分子雲における熱的不安定性による分子ガスのシェル状構造の考察」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  9. 松尾光洋, 中西裕之 (鹿児島大), 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳 (NAOJ), 濤崎智佳 (上越教育大), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 津田裕也 (明星大), 亀谷和久 (東京理科大), 大橋聡史 (東大/NAOJ), 銀河面サーベイチーム、「NRO銀河面サーベイプロジェクト: 銀河系外縁部」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月20日、大阪大学
  10. 宮本祐介 (茨城大学), 中井直正, 瀬田益道, 久野成夫, Salak Dragan, 永井誠 (筑波大学), 山内彩 (国立天文台), 石井峻 (東京大学), 米倉覚則 (茨城大学)、「近傍銀河NGC 3079 中心領域のアンモニア分子吸収線観測2」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  11. Izumi, T., Kohno, K., Tamura, Y., Ikarashi, S., Umehata, H., Taniguchi, A. (UTokyo),

- Takano, S., Imanishi, M., Hatsukade, B., Iono, D., Nakanishi, K., Hattori, T., Ishizuki, S., Espada, D. (NAOJ/JAO), Doi, A. (ISAS), Nakai, N. (Univ. Tsukuba), Nakajima, T. (Nagoya Univ.), Nomura, H. (Tokyo Tech), Terashima Y. (Ehime Univ.), Tosaki, T. (Joetsu Univ. of Education), Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P.-Y. (ASIAA), and NGC 1097/7469 team, 「Submillimeter Observations of Dense Molecular Gas in the Nearby Active Galaxies for a Robust Energy Diagnostics」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
12. 中西康一郎(国立天文台), 徂徠和夫(北海道大), 中井直正, 久野成夫(筑波大), 松林和也(京都大), 菅井肇(IPMU), 高野秀路(国立天文台), 河野孝太郎(東京大), 中島拓(名古屋大), 「Millimeter Hydrogen Recombination Line in the Center of NGC 253」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  13. 金子紘之、久野成夫(筑波大学)、斎藤貴之(東京工業大学)、 「銀河衝突における巨大分子雲衝突」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  14. 小林和貴, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 永井誠, 今田大皓, 北本翔子, 朝倉健(筑波大学), 石井峻(東京大学), 「南極10m級テラヘルツ望遠鏡の強度較正法」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  15. 北本翔子、中井直正、久野成夫、瀬田益道、今田大皓、朝倉健(筑波大学)、 「南極10m級テラヘルツ望遠鏡の電波カメラ系反射鏡群の構造設計」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  16. 今田大皓, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 永井誠(筑波大学), 都築俊宏, 新田冬夢, 関本裕太郎(国立天文台), 北本翔子, 小林和貴, 朝倉健(筑波大学), ほか(南極天文コンソーシアム), 「南極10mテラヘルツ望遠鏡広視野光学系の基本設計(2)」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  17. 諸隈 佳菜 (NRO), 馬場 淳一 (東京工業大学), 徂徠 和夫 (北海道大学), 久野 成夫 (筑波大学), 「4000 Å ブレイクの強さと星質量に対する分子ガスの割合との関係」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  18. 廣田晶彦(国立天文台チリ観測所), 江草英実 (ISAS/JAXA), 村岡和幸 (大阪府立大学), 馬場淳一 (ELSI/東京工業大学), 久野成夫 (筑波大学), 「近傍銀河M83のALMA+45mによる12CO (1-0)輝線の広域観測」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  19. 永井誠, 今田大皓(筑波大学), 石井峻(東京大学), 「望遠鏡の指向方向較正におけるずれの扱いについて」、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18日、大阪大学
  20. 藤沢健太(山口大学), ほか大学VLBI 連携研究グループ, 「大学VLBI 連携の活動報告」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
  21. 金子紘之、中井直正、瀬田直道、永井誠(筑波大学)、ほか筑波大学32m 運用メンバー, 「つくば32m 電波望遠鏡を用いた筑波大学による運用と観測成果」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
  22. 宮本祐介(茨城大学), 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, Salak Dragan, 他(筑波大学), 山内彩(国立天文台), 米倉覚則(茨城大学), 「大学VLBI 連携を用いた近傍銀河AGNのアンモニア吸収線観測計画(3)」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月13日、山形大学
  23. 荒井均(国立天文台)、永井誠、中井直正、瀬田益道、藤田真司、他宇宙観測グループ(筑波大学), 「国土地理院つくば32m 電波望遠鏡によるアンモニア分子反転遷移輝線の銀河系中心領域広域サーベイ観測III」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月13日、山形大学
  24. Y. Asaki, M. Tsuboi (ISAS/JAXA), Y. Yonekura, Y. Miyamoto (Ibaraki Univ.), H. Kaneko, M. Seta, N. Nakai (Univ. of Tsukuba), O. Kameya, M. Miyoshi (NAOJ), H.

- Takaba, K. Wakamatsu (Gifu Univ.), Y. Fukuzaki (GSI), K. Uehara (Univ. of Tokyo), M. Sekido (NICT), T. Oka, S. Takekawa (Keio Univ.) A. Takumi (The Open University of Japan), S. Horiuchi (CSIRO), R. Dodson (Univ. of Western Australia), “Sgr A\* at 22 GHz around the G2 peri-center passing with Japanese VLBI Network”, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月13日、山形大学
25. M. Tsuboi, Y. Asaki (ISAS/JAXA), Y. Yonekura, Y. Miyamoto(Ibaraki Univ.), H. Kaneko, M. Seta, N. Nakai (Univ. of Tsukuba), O. Kameya, M. Miyoshi (NAOJ), H. Takaba, K. Wakamatsu (Gifu Univ.), Y. Fukuzaki (GSI), K. Uehara (Univ. of Tokyo), and M. Sekido(NICT), 「No Microwave Flare of Sgr A\* around the G2 Periastron Passing」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
26. 永井誠, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 藤田真司, 今田大皓, 金子紘之, 長崎岳人, Dragan SALAK(筑波大学), 石井峻(東京大学), 荒井均, 新田冬夢(国立天文台), 宮本祐介(茨城大学), 関本裕太郎(国立天文台), ほか(南極天文コンソーシアム), 「南極10mテラヘルツ望遠鏡制御系の基本設計」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
27. 長崎岳人, 瀬田益道, 中井直正, 久野成夫, 永井誠(筑波大学), 石井峻(東京大学), 「つくば市の冬季における 220 GHz 帯大気透過率の測定」, 日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 12 日、山形大学
28. 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 永井誠, 金子紘之, 長崎岳人, Dragan SALAK, 今田大皓, 藤田真司, 北本翔子, 小林和貴, 朝倉健, 田中伊織(筑波大学), 関本裕太郎, 野口卓, 松尾宏, 新田冬夢(国立天文台), 宮本祐介(茨城大学), 石井峻(東京大学), ほか南極天文コンソーシアム, 「南極30mテラヘルツ望遠鏡計画1」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
29. 瀬田益道, 中井直正(筑波大), 石井峻(東京大), 本山秀明(極地研), 南極天文コンソーシアム, 「南極ドームふじ基地の大気透過率の日変化」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
30. 新田冬夢, 関本裕太郎, 唐津謙一, 三ツ井健司, 岡田則夫, 野口卓, 松尾宏(国立天文台), 関口繁之, 関根正和, 岡田隆, Shibo Shu(東京大学), 成瀬雅人(埼玉大学), 今田大皓, 瀬田益道, 久野成夫, 中井直正(筑波大学), 「野辺山45m 電波望遠鏡搭載に向けた220-GHz 帯超伝導カメラの開発」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
31. 金子紘之, 久野成夫(筑波大学), 斎藤貴之(東京工業大学), 「ALMAで探る銀河衝突による活発な星形成活動」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
32. 山本広大, 松尾太郎, 木野 勝(京都大), 今田大皓(筑波大), 「極限補償光学装置のための位相振幅同時計測方式波面センサの開発」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11日、山形大学
33. 南谷哲宏, 岩下浩幸, 宮澤千栄子, 西谷洋之, 諸隈佳菜, 西村淳, 梅本智文, 松本尚子, 中村 文隆, 神澤富雄, 高野秀路, 齋藤正雄(NAOJ), 石田裕之, 長谷 川豊, 武田美保, 高橋諒, 木 村公洋, 村岡和幸, 小川英夫(大阪府立大), 中島 拓, 服部有祐, 鳥居和史, 立原研悟(名大), 金子紘之, 久野成夫, Dragan SALAK, 長崎岳人, 藤田真司(筑波大), 宮本祐介(茨城大), 徂徠和夫, 梅井 迪子, 岸田望美(北大), 松尾光洋(鹿児島大), 津田裕也, 小野寺幸子(明星 大), 原千穂美, 加藤裕太, 大橋聡, 桑原翔(東大/NAOJ), 濤崎智佳, 小林幸 典(上越教育大), 「野辺山45m鏡搭載 新マルチビーム受信機「FOREST」の開発進捗8」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
34. 徳田一起, 長谷川豊, 大崎茂樹, 岡田望, 切通僚介, 上月雄人, 原田遼平, 松本貴雄, 森岡祐貴, 阿部 安宏, 木村公洋, 村岡和幸, 前澤裕之, 大西利和, 小川英夫(大阪府立大学), 西村淳

- (国立天文台), 澤村将太郎, 土橋一仁 (東京学芸大), 中島拓 (名古屋大), 久野成夫 (筑波大学), 1.85m 鏡グループ, 「1.85m 電波望遠鏡プロジェクトの開発進捗 (VIII)」, 日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
35. 水野 いづみ (鹿児島大学/国立天文台), 亀野 誠二, 中村 文隆, 楠野 こずえ, 新永 浩子, 高野 秀路 (国立天文台), 土橋 一仁, 下井倉 ともみ, 落合 哲, 米谷 夏樹 (東京学芸大), 米倉 覚則 (茨城大), 小川 英夫, 岡田 望, 徳田 一起, 長谷川 豊, 阿部 安宏, 木村 公洋 (大阪府立大), 谷口 琴美 (東邦 大), 中島 拓 (名古屋大), 久野 成夫 (筑波大), Z45 受信機開発チーム, 「野辺山45m鏡における40 GHz帯偏波計測システム」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
36. 亀野誠二, 水野いづみ, 中村文隆, 新永浩子, 高野秀路, 楠野こずえ (国立天文台)、土橋一仁, 下井倉ともみ, 落合哲 (東京学芸大)、米倉覚則 (茨城大)、小川英夫, 岡田望, 徳田一起, 長谷川豊, 阿部安宏, 木村公洋 (大阪府立大)、谷口琴美 (東邦大)、中島拓 (名古屋大), 久野成夫 (筑波大), Z45 受信機開発チーム, 「野辺山40 GHz帯偏波システムによるゼーマン効果計測性能評価」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
37. 村岡和幸, 武田美保 (大阪府立大学), 金子紘之, 久野成夫 (筑波大学), 中西康一郎 (NAOJ), 河野孝太郎 (東京大学), 濤崎智佳 (上越教育大学), 徂徠和夫 (北海道大学), 「ASTEによる渦巻銀河NGC 628のCO(J=3-2)輝線広域観測」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11日、山形大学
38. 諸隈 佳菜 (NRO), 徂徠 和夫 (北海道大学), 渡邊 祥正 (東京大学), 久野 成夫 (筑波大学), 「NGC 3627の12COと13CO輝線のスタッキング解析: 光学的に厚くない12CO成分存在の可能性」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11日、山形大学
39. 金子紘之、久野成夫 (筑波大学)、斎藤貴之 (東京工業大学)、 「ALMAで探る銀河衝突による活発な星形成活動」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11日、山形大学
40. 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳, 水野範和, 本間希樹, 松本尚子, 廣田明彦, 諸隈佳菜, 新永浩子, Chibueze, J. (国立天文台), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 半田利弘, 面高俊宏, 中西裕之, 松尾光洋, 河野樹人, 小澤武揚 (鹿児島大), 大西利和, 徳田一起, 高橋諒 (大阪府大), 濤崎智佳, 小林幸典 (上越教育大), 小野寺幸子, 津田裕也 (明星大), 立原研悟, 鳥居和史, 服部有祐 (名古屋大), 樋口あや (茨城大), 亀谷和久 (東京理科大), 大橋聡史, 桑原翔, 祖父江義明 (東京大), 坪井昌人 (ISAS), 「NRO銀河面サーベイプロジェクト: 2013年度進捗」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
41. 西村淳, 梅本智文, 南谷哲宏, 松本尚子 (NAOJ), 松尾光洋 (鹿児島大), 津田裕也, 小野寺幸子 (明星大), 濤崎智佳, 小林幸典 (上越教育大), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 高橋諒 (大阪府立大), 大橋聡, 桑原翔 (東大/NAOJ), 服部有祐, 鳥居和史, 立原研悟 (名大), 銀河面サーベイチーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: データ解析と評価 (1)」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学
42. 濤崎智佳, 小林幸典 (上越教育大学), 西村淳, 梅本智文, 南谷哲宏, 松本尚子 (NAOJ), 松尾光洋 (鹿児島大), 久野成夫, 藤田真司 (筑波大), 津田裕也, 小野寺幸子 (明星大), 高橋諒 (大阪府立大), 大橋聡史, 桑原翔 (東大/NAOJ), 服部有祐, 鳥居和史, 立原研悟 (名大), 銀河面サーベイチーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: M17 領域」、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月12日、山形大学

## <学位論文>

(修士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 北本翔子

「南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡の電波カメラ系反射鏡群の構造設計」

2. 小林和貴

「南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡の強度較正法に関する研究」

(卒業論文)

理工学群・物理学類

1. 栗木美香

「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡 230GHz 帯受信機による観測」

2. 吉田正樹

「南極望遠鏡の主鏡面における着霜対策の研究」

### <外部資金>

1. 科学研究費補助金(基盤研究 A) : 中井直正(研究代表者)、瀬田益道、永井誠  
「大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測」  
(交付額 1690 万円)(1/5 年)
2. 日本学術振興会「研究成果の社会還元・普及事業(ひらめき・ときめきサイエンス)」 :  
中井直正(実施代表者)、瀬田益道、永井誠  
(交付額 40 万 3 千円)
3. 国立極地研究所平成 26 年度研究プロジェクト : 中井直正(研究代表者)、瀬田益道、他  
「ドームふじ基地における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓」  
(交付額 185 万円)
4. 国立極地研究所南極観測事業費(一般研究観測) : 中井直正(研究代表者)、市川隆、瀬田益道、高遠徳尚、他  
「南極からの赤外線・テラヘルツ天文学の開発」  
(交付額 436 万円 5 千円)(2/3 年)
5. 自然科学研究機構国立天文台 : 中井直正(研究代表者)  
「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明」  
(交付額 550 万 7 千円)
6. 自然科学研究機構国立天文台委託研究 : 久野成夫(研究代表者)  
「野辺山 45m 鏡および筑波大 30cm 鏡による銀河面サーベイ観測の推進」  
(交付額 455 万円)

### <共同研究・受託研究>

1. 「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究」  
大学共同利用機関法人自然科学研究機構(2014 年 4 月 1 日~2015 年 3 月 31 日)

## V. 原子核理論グループ

### メンバー

教授	矢花一浩、中務 孝
准教授	寺崎 順 (HPCI 戦略プログラム)
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生 (国際テニユアトラック)
研究員	温 凱 (数理物質系物理学域)
学生	大学院生 6 名、学類生 2 名

### 1. 概要

核子（陽子・中性子）の多体系である原子核の構造・反応・応答などの多核子量子ダイナミクスの研究を推進している。安定線（ハイゼンベルグの谷）から離れた放射性アイソトープの原子核の構造と反応、エキゾチックな励起状態の性質、様々な集団運動の発現機構など、未解決の謎の解明に取り組んでいる。原子核の研究は、フェルミ粒子の量子多体系計算という観点で、物質科学や光科学、冷却原子系の物理と密接なつながりをもつ。また、クォーク・グルーオンのダイナミクスを記述する格子 QCD に基づく核力の計算、軽い原子核の直接計算などが進展する中、素粒子物理学との連携も重要性が増している。ニュートリノの解明に向けたニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測実験や、素粒子標準模型のテストに関わる実験などにも原子核理論の精密計算が不可欠とされている。また、元素の起源や星の構造にも原子核の性質は深く関わり、宇宙物理学とも密接に関係している。本部門・原子核物理分野のメンバーは、このような幅広い課題に取り組み、分野の枠を超えた研究を推進している。

### 2. 研究成果

#### 【 1 】 高強度パルス光と誘電体の相互作用の解明

高強度で極めて短いパルスレーザーと物質の相互作用に関する研究は、光科学のフロンティアの一つとして急速に進展している。光の瞬間的な最大強度が  $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$  程度を越えると物質は瞬時にプラズマ化され、物質を非熱的に加工する手段として注目されている。一方この光破壊に近い強度では光と物質の相互作用に著しい非線形性が生じる。我々は、このような極限的なパルス光と物質の相互作用を記述する理論と計算法の開発に取り組んでいる。

我々のアプローチの根幹をなすのは、結晶の単位セルに、空間的に一様で時間とともに変化する電場が印加されたときの電子ダイナミクスに対する時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) に基づく第一原理計算である。実時間・実空間法を用いて TDDFT の基礎方程式である時間依存コーン・シャム方程式を解くことにより、空間的にはナノメートル以下、時間的にはフェムト秒以下の微視的な解像度で光と物質の相互作用を記述し理解することが可能になる。

この単位セル計算は、与えられた光電場に対して結晶中に生じる電流密度（そして電流密度を時間で積分した分極密度）を得ることができることから、電場と分極を結び付ける数値的な

構成方程式とみなすことができる。我々はこの観点から、巨視的マクスウェル方程式と微視的TDDFT計算をマルチスケール手法で結びつけ、高強度なパルス光が物質中を伝播する様子を記述する新奇なシミュレーション法 (Maxwell + TDDFT マルチスケールシミュレーション法) の開発に成功している。このシミュレーションは、京コンピュータ程度の今日利用可能な最大規模の計算機を用いてのみ実行可能であり、高強度パルス光と物質の相互作用を自在に記述する手法として注目を集めている。

以下、この課題に関係した今年度の研究の中から特筆すべきものを紹介する。

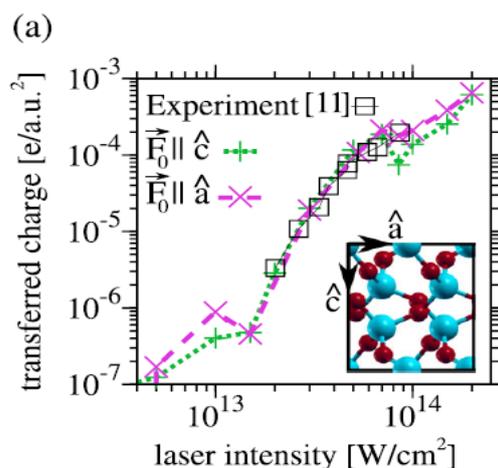
(1) レーザー光によるシリコン結晶バンドギャップ変化の実時間観測 (矢花、佐藤 (筑波大 院 生)、M. Schultze 他 (カリフォルニア大))

半導体物質中の電子は光が照射されると、一部の電子が光エネルギーを吸収し、バンドギャップを越えて束縛から解放されることにより、物質中を移動できるようになる。カリフォルニア大の実験グループは、この電子の移動する過程を典型的な半導体物質であるシリコン結晶で、アト秒パルス光を用いた実時間観測することに成功した。実験では非常に短くて強い可視領域のパルス光を照射し電子の励起を引き起こし、続いてさらに短い数十アト秒のX線パルスを照射して、可視パルス光によって電子が励起する過程のスナップショットを撮影している。この実験で、シリコンのバンドギャップが光の照射後450アト秒以下の極めて短い時間で変化することが明らかになった。我々は、TDDFTによる電子ダイナミクスシミュレーションを行うことで、電子励起のメカニズムの解明に取り組み、実験に相当する条件下で量子トンネル過程による励起が主要であることを示した。また、アト秒パルスによる内殻励起を調べるために必要となる波動関数情報を提供した。

(2) 高強度パルス光を照射したガラス表面に生じる超高速電流の第一原理計算 (矢花、トン (計 科 せ)、佐藤、G. Wachter 他 (ウィーン工科大))

高強度なパルス光と物質の相互作用は、素過程に対する興味とともに、光の振動数をクロックとして動作する新奇なデバイス原理の開拓という観点から興味を持たれている。我々は、最近マックスプランク量子光学研究所の実験グループが観測した、高強度パルス光を照射したガラスの表面に超高速電流が生成される現象の解明を目指して、 $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>結晶に対して時間依存密度汎関数理論に基づく第一原理電子ダイナミクス計算を遂行した。

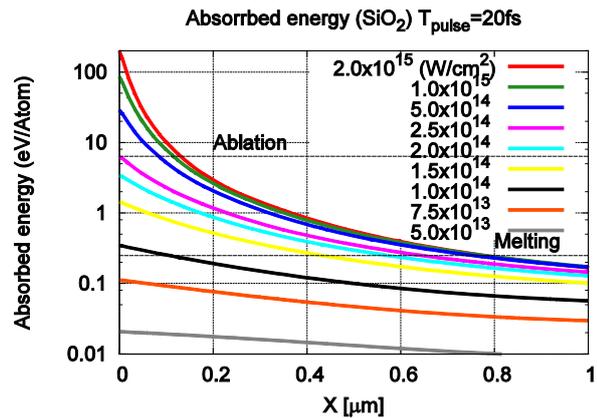
上図は、パルス光の強度を横軸に、生じた電流により移動した電荷 (分極) を縦軸に示している。図の右端は、誘電体に不可逆な壊変をもたらす強度に近いが、その直前の強度のパルス光の照射により、光の強度とともに指数関数的に増大する電流の発生が確かめられ、測定値を



良く再現している。計算によれば、移行電荷は結晶軸と光の偏光方向の角度に敏感に依存しており、電流の発生が電子構造の非等方性に強く依存していることを示唆している。また測定値はパルス光の絶対位相に敏感に依存するが、計算においても同様の依存性が確認された。

(3) フェムト秒レーザーによる光破壊の閾値強度とアブレーション深度の第一原理計算 (矢花、乙部 (原研)、篠原、佐藤、李 (APRI、韓国)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

高強度なパルス光を透明な誘電体に照射すると、ある強度から物質に不可逆な変化が起き、さらに強度を増すと物質表面から原子が飛散するアブレーションが起こる。フェムト秒程度の非常に短いパルス光を用いると、これらの光ダメージは、レーザーの強度を忠実に反映して局所的に進行し、光ダメージに熱拡散の様相が見られないことが知られており、非熱的レーザー加工法として注目されている。



Maxwell+TDDFT マルチスケールシミュレーション法を用いると、高強度パルス光が透明な誘電体に照射した際の、光から電子へのエネルギー移行を第一原理計算により求めることができる。上図は、京コンピュータを用い、 $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> に対して計算を行った結果であり、横軸が物質表面からの深度、縦軸が1原子あたりの電子励起エネルギーを示している。電子励起エネルギーが物質の結合エネルギーを上回れば、アブレーション等の不可逆変化が起こると考えられることから、計算により物質の光破壊が起こる閾値強度やアブレーション深度を見積もることが可能となると考えられる。計算の結果、レーザーダメージの閾値強度は2倍程度以下の精度で測定値を再現し、アブレーション深度に関しては測定値である100-150nmの値を高い精度で再現することを確かめている。

## 【2】時間依存 Hartree-Fock 法による核子移行過程の記述 (矢花、関澤)

多核子移行反応は、核子多体系に発現する非平衡量子輸送過程としてその反応機構に興味を持たれており、また近年、多核子移行反応を用いこれまでに生成されたことのない不安定原子核を生成する可能性が盛んに議論されている。我々は、多核子移行反応の微視的反応機構を明らかにすると共に、不安定核の生成方法を予言することを目指し研究を進めてきた。昨年度までに、TDHF 法に粒子数射影法を組み合わせることにより、起こる確率の大きい移行反応過程の断面積を定量的に記述できることを明らかにした。しかし、移行する核子数が大きく、起こる確率の小さい移行反応過程については、実験値を過小評価するという問題に直面した。そこで本年度には、この実験値と食い違いを解消することを試みた。相違の原因として、励起した原

子核からの核子放出による脱励起（核子蒸発）の効果が考えられる。核子蒸発過程は、我々の数値シミュレーションで扱う時間スケールより遥かに長い時間スケールで起こる現象であり、TDHF 計算とは別に統計模型を用いた計算を行う必要がある。統計模型を利用するために、我々は粒子数射影法を応用し、生成された原子核の励起エネルギーを評価する方法を開発した。そして、核子蒸発の効果を取り入れた断面積を評価し、実験値との比較を行った。その結果、核子蒸発の効果が実験値との相違を改善することを確認したが、効果は不十分であった。このことは、TDHF 計算で扱えていない相関の影響を示唆している。

### 【 3 】 正準基底時間依存ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論による多核子ダイナミクス計算（中務、江幡（北大）、稲倉（京大））

原子核理論分野で発展が目覚ましい3次元実空間表示の時間依存ハートレーフォック法に対して、計算コストの増加をミニマムに抑えた上で、核子対凝縮と超流動ダイナミクスを扱えるように拡張した理論を、2010年に我々が提唱した。このときの論文に対して、第一著者である江幡氏（当時筑波大学大学院生・理化学研究所 JRA）が、本年度の日本物理学会若手奨励賞を受賞した。この方法を線形応答領域に応用し、原子核の応答関数の系統的計算を行い、軽い原子核から希土類領域の重い原子核まで、中性子分離エネルギーが2MeV以上のアイソトープについて電気双極子(E1)強度分布を調査した。その結果、中性子過剰核の広い領域において低エネルギーのE1ピーク（ピグミー共鳴）が現れ、その出現のメカニズムに中性子の殻効果が重要であることが分かった。また、通常、E1強度のほとんどは巨大共鳴状態に集中するため、低エネルギー領域のE1強度は大幅に弱められていることが知られているが、非常に中性子過剰な重い原子核の励起エネルギー5 MeV以下には、このE1抑制が働かない新種のピグミー共鳴が現れることを予言した。さらに、これらのピグミー共鳴の性質と中性子星の構造を決定する状態方程式との関係を精査した。

また、同じ計算手法を用いた核融合反応計算を開始し、軽い原子核に限定的ではあるが、対相関の影響に関して興味深い結果を得た。衝突エネルギーを同じにして、対相関を入れた計算と無視した計算とを比べると、対相関によって核融合が阻害されるケースがあることが分かった。さらにこの効果を確認するため、研究を続行中である。

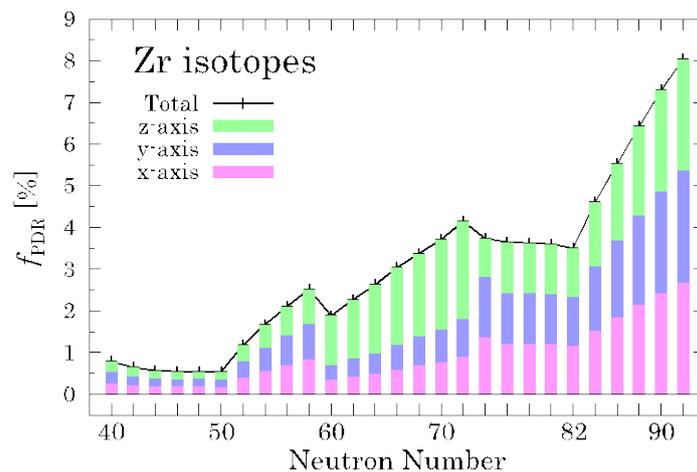


図1：Zr アイソトープの低エネルギーE1強度の割合。特定の中性子数 N=50, 60, 72, 82 で傾きが突然変化する。

#### 【 4 】大振幅集団運動理論を用いた核反応ダイナミクスの記述 (温、中務)

線形領域を超える大振幅集団運動を扱う理論として、断熱近似型の理論が提案されているが、そのうちの 하나가、2000年に提案された断熱自己無撞着集団座標法(Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate Method: ASCC法)である。この理論では、少数自由度の集団空間(座標)の自己無撞着な抽出が可能であり、特に、過去の断熱時間依存平均場理論では不可能であった一意的な抽出ができる点が優れている。この理論に基づいて、低エネルギーの多核子反応ダイナミクスを記述することを目指した研究を開始した。まず、テストとして、比較的簡単なBKN相互作用と呼ばれる有効相互作用を用いて、3次元座標表示のTDHFを基礎にしたコード開発を行い、2つのアルファ粒子の散乱・融合のミクロな機構を明らかにすることにした。拘束演算子を局所調和方程式と呼ばれる式から求め、それを拘束条件付き平均場計算に応用する。これを自己無撞着に計算し、核反応の集団運動を支配するポテンシャルと質量パラメータを求める。これまでに、このようにして自己無撞着に決めた質量が遠方で換算質量に一致すること、また2つのアルファ粒子が接触した後は換算質量が大きくなり、反応速度が弱められることなどが分かっている。

#### 【 5 】アイソスピン不変なエネルギー汎関数による原子核密度汎関数計算 (中務、佐藤(理研)、Dobaczewski (ワルシャワ大)、Satula (ワルシャワ大))

現在主流となっている原子核のエネルギー密度汎関数は、Skyrme形式、Gogny形式、共変形式(相対的)の3つに大別されるが、どれも陽子と中性子の密度( $\rho_p, \rho_n$ )の汎関数としてエネルギーが与えられている。しかし、陽子や中性子はアイソスピンの第3成分の固有状態であり、アイソスピン空間における回転に対して不変ではなく、一般にはアイソスピンが任意の方向を向いた状態、すなわち陽子と中性子が混合した状態に拡張する必要がある。これを実行するため、陽子・中性子を区別せずに「核子」として扱う新しいKohn-Sham方程式と、それに対応する非対角要素( $\rho_{pn}, \rho_{np}$ )を含むエネルギー汎関数を構築し、その計算コード開発を実施した。

アイソスピン不変に拡張することによる新しいパラメータの導入はなく、これまでのエネルギー汎関数のパラメータセットをそのまま利用することができる。計算コードは、ポーランド・ワルシャワ大学のグループを中心に開発されているHFODDにこの拡張を適用することにした。この研究はワルシャワ大学との共同研究で進められている。

この拡張による大きなメリットとして、荷電類似状態(アイソバリックアナログ状態)と呼ばれる状態が、自然かつ簡便な形で表現できることがあげられる。図には、質量数A=54のアイソスピンT=1の状態が示されている。左端の点(T=-1)が $^{54}\text{Ni}$ に、右端(T=+1)が $^{54}\text{Fe}$ 、真ん中(T=0)が $^{54}\text{Co}$ に対応する。この真ん中の $^{54}\text{Co}$ の状態は従来の密度汎関数で記述することが困難であった。さらに、パラメータフリーの計算で実験と非常によい一致を得ている。

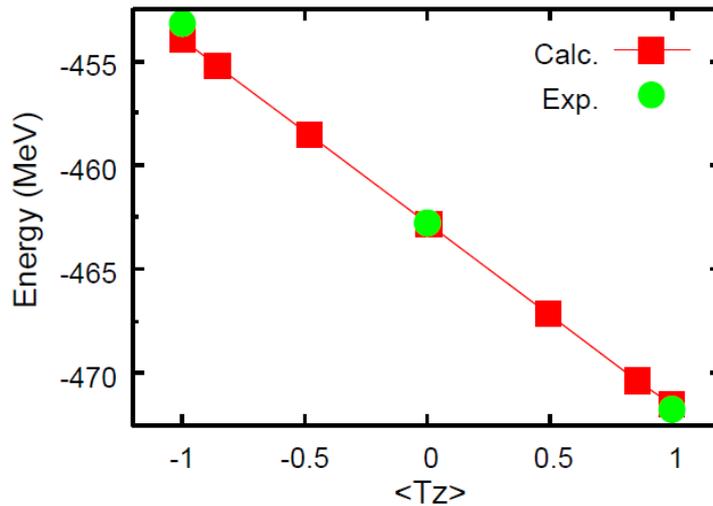


図2：A=54の同重体におけるアイソスピン T=1 三重項状態のエネルギー（左から Ni, Co, Fe に対応）。

#### 【 6 】 原子核の二重ベータ崩壊の原子核行列要素（寺崎）

寺崎は四年前に赴任して以来ニュートリノレス二重ベータ崩壊の理論的研究を実施している。その中心的内容は、準粒子乱雑位相近似を用いたその崩壊の原子核行列要素の計算である。その崩壊が観測された場合にニュートリノの質量スケールを決定するために必要な原子核行列要素の信頼できる数値を出すことが目標である。2014年度は、 $^{150}\text{Nd}$  から  $^{150}\text{Sm}$  へのニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素を準粒子乱雑位相近似 (QRPA) を用いて求め、その計算に関する論文を出版した。その計算過程で、始状態と終状態から求めた QRPA 励起状態の重複を求める必要があるが、ここで QRPA 基底状態の規格化因子の積が約 2 であり、原子核行列要素を 1/2 倍する効果があることを初めて見出した。このことは、今まで原子核行列要素を小さくするために用いられていた現象論的相互作用の方法の見直しの必要性を示しており、同じ課題を研究している研究者への影響は大きい。今までより理論的整合性の高い計算を提示したことで、信頼性の高い原子核行列要素を求めるという目標に近づいた。

#### 【 7 】 有限振幅法を用いた和則計算（日野原、Kortelainen (Univ. Jyväskylä), Nazarewicz (Michigan State Univ.), Olsen (Michigan State Univ.))

和則は巨大共鳴などの線形応答に対する情報と関連する扱いやすい量であるため、原子核エネルギー密度汎関数の未知の結合定数を決定する際に、ダイナミクスを代表する量として有用であると考えられる。しかしながら乱雑位相近似 (QRPA) を用いて和則を計算すると、大次元の行列の対角化とそのすべての解が必要となり、さらに計算量による制限のため行列の次元を減らす近似が必須である。全自由度を扱うことが出来る有限振幅法を用い、複素エネルギー平面で励起状態に対応する極をすべて囲む複素積分を行うことによって、和則を効率よく計算する定式化を行った。全自由度が扱える小さな模型空間において QRPA の行列対角化による解と一

致することを数値的に確認し、さらに和則を与える Thouless 定理や絶縁定理の密度汎関数理論での有効性を、現実的な場合において数値的に示した。有限振幅法による本定式化はこれらの定理が使えない場合においても有効であり、複素積分の並列化によって和則を効率よく正確に計算することが可能となった。

#### 【 8 】 二重ベータ崩壊の核行列要素 (陽子-中性子対振幅の量子ゆらぎを取り込んだ核行列要素の計算 (日野原、Engel (Univ. North Carolina)))

二重ベータ崩壊の核行列要素はアイソスカラー型の陽子-中性子対相関力によって抑制されることが乱雑位相近似 (QRPA) 計算によって知られているが、この陽子-中性子対相関力は基底状態に質的な影響を与えないため、その強さについてはよくわかっていない。QRPA 計算は相転移を記述出来ないため、基底状態の四重極変形ゆらぎが大きく変形共存や変形転移状態にある場合や、アイソスカラー対凝縮相への転移状態近傍にある場合は近似が破綻する。この QRPA の問題を回避し核行列要素の相互作用依存性を明らかにするために、四重極変形度と陽子-中性子対振幅を拘束した変分によってこれらの量子ゆらぎの大きい状態をも含んだ基底を生成し、量子数射影後に重ねあわせることで、崩壊の始状態と終状態を構築した (生成座標法)。特に陽子-中性子対を自由度に取り込んだ生成座標法はこれまでに行われたことのないユニークなものである。第一の計算例として、二主殻模型空間で  $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$  の二重ベータ崩壊の核行列要素を評価した。生成座標法では殻模型計算より広い一粒子模型空間を用いることが出来、さらに二準粒子励起に制限される QRPA よりも豊富な多体相関を取り込むことが出来るため、適切な有効相互作用を用いることで、将来的には殻模型計算と QRPA のどちらにも含まれていない効果を議論することが期待できる。もう一つの将来計画は Skyrme 型の原子核密度汎関数に基づいて陽子-中性子対の自由度を入れた生成座標法計算を行うことで、 $\beta$  崩壊などの関連する物理量も含めた荷電交換過程の系統的な計算へと発展させることである。

#### 【 9 】 Gogny-TDHFB による $^{20}\text{O}-^{20}\text{O}$ 正面衝突の計算 (橋本)

原子核の振る舞いを研究するうえで、時間依存平均場の方法は定性的にも定量的にも極めて有用な枠組みとなっている。原子核の基底状態近傍の状態においては対相関が重要な働きをすることが知られているので、中性子過剰核の性質を理解する目的で、TDHF の枠組みを拡張して対相関を扱えるようにした時間依存ハートレーフォックボゴリュボフ (TDHFB) の実用的な数値計算が行われるようになってきた。橋本は、調和振動子基底と空間格子としての Lagrange 格子点を組み合わせた基底を利用し、Gogny 力を用いた TDHFB を解く、という数値計算の方法を整備してきた。今年度は、 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$  の衝突に応用した。ちなみに、TDHF+BCS の形式での原子核衝突の計算は存在するが、TDHFB 方程式を直接解いて原子核衝突を計算する試みは、現時点では極めて少ない。計算に必要な格子空間の選定は初期条件の設定と関係し、そのための試行錯誤に計算時間と労力を割く必要があった。実際の計算は、クーロン障壁頂上付近の軌道を 3 本 (3 個の初期エネルギー) 設定し、2.1 fm 離れた点から計算を開始した。この一連の計算により、① 障壁より上のエネルギーの軌道では融合が起こり、核子の移行量

の期待値を計算できた。② 障壁より下の軌道において、対相関の働く中性子側では、陽子側の約10倍の移行数があり、これは $^{20}\text{O}$ の中性子数・陽子数比である1.5よりずっと多いことがわかる。さらに、③ 障壁よりも上のエネルギーを持つ2本の軌道から、巨視的な摩擦係数を計算することができた。摩擦係数は、融合の初期に急速に増加することが示された。今後、これらの量の初期エネルギー依存性を系統的に調べていく。

**【 10 】 Energy dependence of the nucleus-nucleus potential and the friction parameter in fusion reactions** (温、坂田(茨城大)、Li(CIAE)、Wu(CIAE)、Zhang(CIAE)、Zhou(CAS))

Applying a macroscopic reduction procedure to the improved quantum molecular dynamics (ImQMD) model, the energy dependences of the nucleus-nucleus potential, the friction parameter, and the random force characterizing a one-dimensional Langevin-type description of the heavy-ion fusion process are investigated. Systematic calculations with the ImQMD model show that the fluctuation-dissipation relation found in symmetric head-on fusion reactions at energies just above the Coulomb barrier fades out when the incident energy increases. It turns out that this dynamical change with increasing incident energy is caused by a specific behavior of the friction parameter which directly depends on the microscopic dynamical process, i.e., on how the collective energy of the relative motion is transferred into the intrinsic excitation energy. It is shown microscopically that the energy dissipation in the fusion process is governed by two mechanisms: One is caused by the nucleon exchanges between two fusing nuclei, and the other is due to a rearrangement of nucleons in the intrinsic system. The former mechanism monotonically increases the dissipative energy and shows a weak dependence on the incident energy, while the latter depends on both the relative distance between two fusing nuclei and the incident energy. It is shown that the latter mechanism is responsible for the energy dependence of the fusion potential and explains the fading out of the fluctuation-dissipation relation.

### 3. 教育

1. 五嶋祐希、修士(理学)、“Gogny力を用いたHFBによる質量数 $A \leq 50$ 領域における中性子過剰原子核の構造”
2. 関澤一之、博士(理学)、“Multinucleon transfer reactions and quasifission processes in time-dependent Hartree-Fock theory”

### 4. 受賞、外部資金、知的財産権等

#### 受賞

1. 日本物理学会若手奨励賞、江幡修一郎、“Canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory and linear response calculations”、2015年3月21日

2. 筑波大学数理物質科学研究科長賞、関澤一之、「Multinucleon transfer reactions and quasifission processes in time-dependent Hartree-Fock theory」、2015年3月25日
3. The Award for Best Project of the 2014 TALENT Course #5 “Theory for Exploring Nuclear Structure Experiments”、関澤一之、2015年12月
4. 「京」を中核とするHPCIシステム利用課題 優秀成果賞、橋本幸男、関澤一之、矢花一浩、2014年10月

## 外部資金

1. 科学研究費補助金・基盤研究(B)、矢花一浩(代表)、2011-2014年度、総額19500千円(2014年度3250千円)、課題名「固体中のフェムト・アト秒電子ダイナミクスに対する第一原理計算」
2. 科学研究費補助金・新学術領域研究(研究領域提案型)公募研究、矢花一浩(代表)、2013-2014年度、総額3900千円(2014年度1950千円)、課題名「光と電子のダイナミクスを記述する第一原理マルチスケールシミュレーション法の開発」
3. 日本学術振興会二国間交流事業オープンパートナーシップ共同研究(アメリカ合衆国)、矢花一浩(代表)、2013-2015年度、4960千円(2014年度2320千円)、課題名「超高速電子ダイナミクスに対する第一原理計算アプローチ」
4. 株式会社IHIとの共同研究、矢花一浩(代表)、研究題目「時間依存第一原理解析によるフェムト秒レーザと物質との相互作用に関する研究」、2013年度より継続、2014年度研究経費1000千円
5. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)、中務孝、代表、2013年から継続、5,500,000円、「原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明」
6. 科研費・新学術領域研究(研究領域提案型)、中務孝、分担、2012年から継続1,000,000円、「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」
7. 学振・二国間交流事業(オープンパートナー)、中務孝、代表、2014年、2,484,000円、セミナー「計算核物理学の進展と展望」
8. JST ImPACT「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」、中務孝(研究開発責任者)、矢花一浩、橋本幸男(研究開発参加者)、2014年、3,000,000円「核構造計算による核反応モデルの高精度化」
9. 科研費 平成26年度基盤研究C、寺崎順、研究代表者、2014年度採択、交付額(直接経費)1,300千円、課題名 QRPAを用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算

## 5. 研究業績

- (1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. M. Schultze, K. Ramasesha, C.D. Pemmaraju, S.A. Sato, D. Whitmore, A. Gandman, J.S. Prell, L.J. Borja, D. Prendergast, K. Yabana, D.M. Neumark, S.R. Leone, "Attosecond band-gap dynamics in silicon", *Science* 346, 1348-1352 (2014).
2. S.A. Sato, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana, "Dielectric response of laser-excited silicon at finite electron temperature", *Phys. Rev. B* 90, 174303 (8 pages) (2014).
3. G. Wächter, C. Lemell, J. Burgdoerfer, S.A. Sato, X.-M. Tong, K. Yabana, "Ab Initio Simulation of Electrical Currents Induced by Ultrafast Laser Excitation of Dielectric Materials", *Phys. Rev. Lett.* 113, 087401 (5 pages) (2014).
4. S.A. Sato, K. Yabana, "Efficient basis expansion for describing linear and nonlinear electron dynamics in crystalline solids", *Phys. Rev. B* 89, 224305 (11 pages) (2014).
5. M. Noda, K. Ishimura, K. Nobusada, K. Yabana, T. Boku, "Massively-parallel electron dynamics calculations in real-time and real-space: Toward applications to nanostructures of more than ten-nanometers in size", *J. Comput. Phys.* 265, 145-155 (2014).
6. K. Sekizawa, K. Yabana, "Particle-number projection method in time-dependent Hartree-Fock theory: Properties of reaction products", *Phys. Rev. C* 90, 064614 (2014).
7. T. Inakura, W. Horiuchi, Y. Suzuki, and T. Nakatsukasa, "Mean-field analysis of ground state and low-lying electric dipole strength in  $^{22}\text{C}$ ", *Phys. Rev. C* 89, 064316 (2014).
8. S. Ebata, T. Nakatsukasa, and T. Inakura, "Systematic investigation of low-lying dipole modes using the canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory", *Phys. Rev. C* 90, 024303 (2014).
9. M. Matsuo, N. Hinohara, K. Sato, K. Matsuyanagi, T. Nakatsukasa, and K. Yoshida, "Quadrupole shape dynamics from the viewpoint of a theory of large-amplitude collective motion", *Phys. Scr.* 89, 054020 (2014).
10. T. Nakatsukasa, "Finite amplitude method in linear response TDDFT calculations", *J. Phys. Conf. Ser.* 533, 012054 (2014).
11. J. Sheikh, N. Hinohara, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, W. Nazarewicz, K. Sato, "Isospin invariant Skyrme density functional approach with axial symmetry", *Phys. Rev. C* 89, 054317 (2014)
12. J. Terasaki, "Many-body correlations of quasiparticle random-phase approximation in nuclear matrix

elements of neutrinoless double- $\beta$  decay”, Physical Review C, **91**, 034318 (2015).

13. J. Terasaki,  
“Relation between pairing gaps and transition probabilities in  $^{132,136}\text{Te}$ ”, Journal of Physics:Conference Series **533**, 012059 (2014).
14. Nobuo Hinohara and Jonathan Engel,  
“Proton-neutron pairing amplitudes as a generator coordinate for double-beta decay”, Phys. Rev. C90, 031301(R) (2014).

B) 査読無し論文

1. H.Z.Liang, J. Meng, T. Nakatsukasa, Z. M. Niu, P. Ring, X. Roca-Maza, N. Van Giai, P. W. Zhao, “Nuclear charge-exchange excitations in localized covariant density functional theory”, EPJ Web Conf. 66, 02064 (2014)
2. S.Ebata, T.Nakatsukasa,  
“Pairing effects in nuclear fusion reaction, J. Phys. Soc. Conf. Proc. 1, 013038 (2014)
3. K. Sekizawa, K. Yabana,  
"Strong Orientation Dependence of Multinucleon Transfer Processes in  $^{238}\text{U}+^{124}\text{Sn}$  Reaction", 2nd Conf. on Advances in Radioactive Isotope Science, JPS Conference Proceedings Vol. 6 (in press).
4. K. Sekizawa, K. Yabana,  
"Time-dependent Hartree-Fock calculations for multi-nucleon transfer processes: Effects of particle evaporation on production cross sections", VI Int. Conf. Fusion14, EPJ Web of Conference 86, 00043 (2015).

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. K. Yabana,  
"Imaginary time formalism of triple-alpha reaction", PKU-CUSTIPEN Nuclear Reaction Workshop "Reactions and Spectroscopy of Unstable Nuclei", Peking Univ., China, Aug. 11-14, 2014.
2. K. Yabana,  
"Cluster Structure of Light Nuclei Superposing Multiple Slater Determinants", Int. Conf. Nuclear Theory in the Supercomputing Era -2014 (NTSE-2014), Pacific National Univ. Khabarovsk, Russia, June 23-27, 2014.
3. T. Nakatsukasa,  
“Mean-field calculations for IoI”, RIBF Discussion Plus!: Island of Inversion, Wako, Japan, Apr. 25, 2014.
4. T. Nakatsukasa,  
“Nuclear response and equation of state”, APCTP Workshop on the intersection of cold-atomic and

- nuclear physics, Pohang, Korea, May 12-13, 2014.
5. T. Nakatsukasa,  
 “Nuclear structure studies with energy density functionals”, International workshop on Progress in nuclear shell-model calculations in CNS-RIKEN collaboration, Wako, Japan, Nov. 26-28, 2014.
  6. T. Nakatsukasa,  
 “Isospin invariant energy density functional and isobaric analogue states”, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, Ho Chi Minh City, Vietnam, Nov. 3-8, 2014.
  7. T. Nakatsukasa,  
 “Time-dependent density functional calculation of nuclear response functions”, International Conference: Nuclear Theory in the Supercomputing Era – 2014, Khabarovsk, Russia, June 23-27, 2014.
  8. T. Nakatsukasa,  
 “Time-dependent approaches to nuclear many-body dynamics”, International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations, Tokyo, Japan, Feb. 18-21, 2015.
  9. J. Terasaki,  
 “Effects of QRPA correlations on nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay through overlap matrix”, International Conference on Nuclear Theory in the Supercomputing Era (NTSE2014), Khabarovsk, Russia, June 23–27, 2014.
  10. J. Terasaki,  
 “Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of  $0\nu\beta\beta$  decay”, EMMI Rapid Reaction Task Force on Nuclear Matrix Elements, Darmstadt, Germany, November 10–21, 2014.
  11. J. Terasaki,  
 “Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of  $0\nu\beta\beta$  decay”, Double-beta-decay meeting, Chapel Hill, USA, March 9 and 10, 2015.
  12. N. Hinohara,  
 “Finite-amplitude method for low-lying collective modes and QRPA sum rules”, ICNT workshop “Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenge”, RIKEN, Wako, Japan, Jun. 9-13, 2014.
  13. N. Hinohara  
 “Role of Fluctuations of collective coordinates in nuclear matrix elements”, Mini-collaboration meeting on double-beta decay, Univ. of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA, Mar. 9-10, 2015.
- B) 一般講演
1. K. Yabana, "Progress in first-principles electron dynamics calculations", LAP Annual Meeting, Frauenchiemsee, Germany, Sept. 22-26, 2014.
  2. K. Yabana, "Time-resolved dynamical Franz-Keldysh effect", Seminar at Vienna Tech., Sept. 29, 2014.

3. K. Yabana, "Time-dependent density functional theory of high-intensity, short-pulse laser irradiation on dielectrics", Seminar at POSTECH, Nov. 10, 2014.
4. K. Yabana, T. Akahori, Y. Funaki, "Imaginary time approach for reaction rate of triple-alpha process", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Oct. 7-11, 2014.
5. J. Terasaki, "Effects of QRPA correlations on nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay through overlap matrix", Neutrino Nuclear Responses for Neutrino Studies in Nuclei (NNR14), Ibaraki, Japan, November 5–6, 2014.
6. J. Terasaki, "Effect of QRPA correlations on nuclear matrix element of neutrinoless double-beta decay through overlap of QRPA states", 4th joint meeting of the APS division of nuclear physics and the PSJ, Waikoloa, USA, Oct.7–11, 2014.
7. N. Hinohara and J. Engel, "Effect of Fluctuations of Quadrupole Deformation and Neutron-Proton Correlations on Double Beta Decay Nuclear Matrix Element", 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), Univ. of Tokyo, Jun. 1-6, 2014.
8. N. Hinohara, M. Kortelainen, W. Nazarewicz, and E. Olsen, "Low-energy Collective Modes and Sum Rules with the Complex-energy Finite-amplitude Method", (poster presentation), 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), Univ. of Tokyo, Jun. 1-6, 2014
9. N. Hinohara, "QRPA calculations using the complex-energy finite amplitude method", NUCLEI SciDAC collaboration meeting, Santa Fe, NM, USA, Jun. 15-19, 2014.
10. N. Hinohara, M. Kortelainen, W. Nazarewicz, and E. Olsen, "Finite-amplitude method for discrete collective excited states and sum rules", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (HAWAII2014), Waikoloa Village, HI, USA, Oct. 7-11, 2014.
11. Shunsuke A. Sato, Kazuhiro Yabana, Yasushi Shinohara, Kyung-Min Lee, Tomohito Otobe, George F. Bertsch, "First-principles calculation for electron dynamics in dielectrics induced by intense laser pulses", APS March Meeting 2015, San Antonio, Texas, March 2–6, 2015
12. T. Akahori, Y. Funaki, K. Yabana, " $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$  reaction rate in imaginary time theory", 3rd Int. Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" SOTANCP3, Kanto Gakuin Univ, Yokohama, May 26-30, 2014.
13. K. Sekizawa, K. Yabana, "Transfer dynamics in the TDHF theory deduced from particle-number projection method", ECT\* Workshop on "From nuclear structure to particle-transfer reactions and

- back II", ECT\*, Trento, Italy, Nov. 10-14, 2014.
14. K. Sekizawa, K. Yabana, "Strong orientation dependence of multinucleon transfer processes in  $^{238}\text{U}+^{124}\text{Sn}$  reaction", The 4<sup>th</sup> Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the APS and the JPS, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Oct. 7-11, 2014.
  15. K. Sekizawa, K. Yabana, "Time-dependent Hartree-Fock Calculation for Multinucleon Transfer Processes", The 2nd conference on Advances in Radioactive Isotope Science "ARIS2014", ITO International Research Center, Tokyo, Japan, 1-6 June, 2014

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 矢花一浩、"トリプルアルファ反応率の量子力学計算"、第27回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」、国立天文台三鷹キャンパス、2014年12月24-26日
2. 矢花一浩、"透明材料におけるアブレーション初期過程の第一原理計算"、第15回光量子科学研究シンポジウム、原研関西光科学研究所、2014年11月13-14日
3. 中務 孝、"原子核密度汎関数理論の概要"、サマースクール「クォークから超新星爆発まで」、京都大学基礎物理学研究所、京都、2014年7月24日

B) その他の発表

1. 矢花一浩、"光駆動電子ダイナミクスの第一原理計算"、「限界光駆動系のコンセプトとめざす学理」研究会、京大化研、2014年8月22日
2. 矢花一浩、"超高速光電子ダイナミクスの第一原理計算"、「先端物質科学と限界光駆動」、京大吉田キャンパス北部構内益川ホール、2015年1月10-11日
3. 矢花一浩、"フェムト秒レーザーと物質の相互作用に対する第一原理量子ダイナミクス計算"、京大工学部三浦研セミナー、2015年1月15日
4. 矢花一浩、"量子多体問題と密度汎関数理論の考え方"、サマースクール「クォークから超新星爆まで」-基礎物理の理想への挑戦-、京大基研、2014年7月24日
5. 中務 孝、"核構造計算による核反応モデルの高精度化"、ImPACT 藤田プログラム全体会議、JST別館、東京、2015年3月26日
6. K. Sekizawa, K. Yabana, "Time-dependent Hartree-Fock calculations for multi-nucleon transfer and quasi-fission processes", A seminar at the ANU, Australian National University, Canberra, Australia, July 21, 2014.
7. K. Sekizawa, K. Yabana, "Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes", 262th Sendai Nuclear Science Colloquium, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan, April 15, 2014.

8. 関澤一之、矢花一浩、“射影演算子を用いた核子移行 TDHF 波動関数の分析 II”、日本物理学会 第 70 回年会、早稲田大学、東京都新宿区、2015 年 3 月 21 日-24 日
9. 関澤一之、矢花一浩、“原子核ダイナミクスの微視的シミュレーション”、第 6 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム -HA-PACS と COMA による計算科学の発展と、分野融合への取り組み-、筑波大学大学会館 国際会議室、茨城県つくば市、2014 年 10 月 21 日 (火) - 22 日 (水)
10. 橋本幸男、“ラグランジュ格子を用いた Gogny-TDHF による  $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$  の計算”、日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21 日-24 日、早稲田大学早稲田キャンパス)
11. 佐藤 駿丞, 李畊旻, 篠原康, 乙部智仁, 矢花一浩, ”レーザー加工における初期過程の第一原理的解析”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2014 年 9 月 17 日-20 日
12. 佐藤 駿丞, 矢花一浩, 篠原康, 乙部智仁, 李畊旻, G. F. Bertsch, “第一原理計算によるレーザー損傷閾値及び深さの解析”, 第 6 2 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015 年 3 月 11 日-14 日
13. 佐藤 駿丞, 矢花一浩, 篠原康, 乙部智仁, 李畊旻, G. F. Bertsch, “レーザー損傷閾値及びアブレーション深さの第一原理的解析”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 21 日-24 日
14. 橋本幸男、矢花一浩、関澤一之、“密度汎関数理論に基づく原子核ダイナミクスの研究”、第 1 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会、コクヨホール、東京都港区、2014 年 10 月 31 日 (金)

(4) 著書、解説記事等

- 1) K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, J.-I. Iwata, G.F. Bertsch, "First-Principles Calculations for Laser Induced Electron Dynamics in Solids - Time-Dependent Density-Functional Theory for laser matter interactions", *Advances in Multi-Photon Processes and Spectroscopy*, Vol. 21, pp. 209-244, Eds. S.H. Lin, A.A. Villaeys, Y. Fujimura, World Scientific (2014).
- 2) 日野原 伸生, “ノースカロライナ大学チャペルヒル校 (海外通信)”, 原子核研究、第 59 巻 1 号 (2014 年 9 月発行) pp. 14-15.

6. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

【国際連携】

1. 米国との間で、超高速電子ダイナミクスに対する第一原理計算アプローチをテーマとする共同研究を平成 25 年度より推進している。米国はバンダービルト大学及びワシントン大学 (米国側代表はバンダービルト大学の K. Varga 准教授)、日本側は筑波大学の他、分子

- 科学研究所、日本原子力研究開発機構（日本側代表は矢花）が参加している。
2. アト秒科学に関し、マックスプランク量子光学研究所の実験グループ (F. Krausz 教授、M. Schultze 研究員、他)、チューリッヒ工科大学の実験グループ (U. Keller 教授、他) と国際共同研究を推進 (矢花)。
  3. ウィーン工科大学の理論グループ (J. Burgdoerfer 教授、及びそのグループメンバー) と、実時間電子ダイナミクス計算コード ARTED を用いた国際共同研究を推進 (矢花)。
  4. 筑波大学計算科学研究センター量子物性部門とともに宇宙・原子核物理研究部門にも所属し、両分野において時間依存密度汎関数理論に基づく実時間・実空間解法を用いた多フェルミオン系ダイナミクスの研究を推進 (矢花)。
  5. 筑波大学計算科学研究センター高性能計算システム研究部門の朴、及び大学院生の廣川と、実時間電子ダイナミクス計算コード ARTED のメニーコアシステムを用いた加速に関して共同研究 (矢花)。
  6. 日本学術振興会二国間交流事業オープンパートナー・セミナー (代表：中務) の支援により、米国ロスアラモス国立研究所の Joe Carlson 氏を中心とする理論核物理研究者等とハワイにおいて共同セミナーを開催した (2014 年 10 月) (中務)。
  7. ポーランド・ワルシャワ大学の原子核理論グループと共同で、オープンソースコード HFODD をアイソスピン不変なエネルギー密度汎関数へ適用する拡張に取り組んでいる (中務)。
  8. 韓国・APCTP およびイタリア・トレント大学の冷却原子系理論グループと、1 次元周期ポテンシャル中のフェルミ粒子系の超流動状態に関する共同研究を行っている (中務)。
  9. 米国ノースカロライナ大学の Engel 教授と二重ベータ崩壊の核行列要素に関する共同研究 (日野原)。
  10. 米国ミシガン州立大学 Nazarewicz 教授およびフィンランド・ユバスキュラ大学の Kortelainen 研究員と原子核密度汎関数の諸問題に関する共同研究 (日野原)

## 7. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 国際会議 2nd International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (Tokyo, June 1-6, 2014) の組織委員を務めた (中務)。
2. 国際 ICNT ワークショップ Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges (RIKEN, June 9-13, 2014) の組織委員長を務めた (中務)。
3. HPCI 戦略プログラム 5 共催の国際ワークショップ Advances and perspectives in computational nuclear physics (Waikoloa, HI, USA, Oct. 5-7, 2014) の組織委員長を務めた (中務)。
4. 第 13 回国際サマースクール CNSSS14 (RIKEN, Aug. 21-27, 2014) の組織委員を務めた (中務)。

## 8. 管理・運営

矢花一浩

物理学専攻・物理学域

物理学専攻長、物理学域長、カリキュラム委員会委員、学生支援対応チーム

数理物質系・数理物質科学研究科

系長室員、運営委員会委員、広報委員長、人事委員会委員、施設安全管理委員会委員、  
大学教員業績評価委員会委員、情報環境委員会委員

計算科学研究センター

共同研究担当主幹、量子物性研究部門長、運営委員会委員、運営協議会委員、人事委員会委員、共同研究委員長、共同研究運用委員長、先端計算科学推進室長、研究企画室委員

学外

核理論委員会委員、KEK 大型シミュレーション研究推進委員会委員、日本原子力研究開発機構客員研究員

中務孝

計算科学研究センター 宇宙・原子核物理研究部門 原子核物理分野リーダー

計算科学研究センター 運営委員会委員

計算科学研究センター 共同研究委員会委員

数理物質系物理学域 運営委員会委員

数理物質系物理学域 原子核理論グループ長

数理物質系物理学域 図書委員長

理化学研究所・中務原子核理論研究室 准主任研究員（兼務）

京都大学・基礎物理学研究所 運営協議会委員

核理論委員会委員

日本物理学会 第 67-70 期代議員

理化学研究所 RI ビームファクトリー 国際プログラム諮問委員会 (NP-PAC) 委員

雑誌「原子核研究」編集委員

寺崎 順

文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」中の計算機ユーザーのプログラミング支援活動において連絡係を務めた。

## 9. 社会貢献・国際貢献

矢花一浩

Associate Editor for European Physical Journal A

中務 孝

理化学研究所一般公開(2014. 4. 19)において講演「量子力学と原子核」

カナダ・TRIUMF 国際プログラム諮問委員会 (SAP-EEC) 委員

Editor for Journal of Physical Society of Japan  
Editor for International Journal of Modern Physics E

## 10. その他

海外長期滞在

- 1) 日野原 伸生, Univ. North Carolina at Chapel Hill, NC, USA, 2014年6月  
20日～2014年8月25日
- 2) 日野原 伸生, National Superconducting Cyclotron Laboratory,  
Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, 2014年8月27日～2015年  
3月31日(次年度に継続)

## VI. 原子核実験グループ

教授	小沢顕、三明康郎
准教授	新井一郎、江角晋一、笹公和
講師	中條達也
助教	長江大輔、Oliver Busch、益井宙、森口哲朗
技術職員	加藤純雄
博士研究員	池田義雅、轟木貴人、新井田貴文
大学院生	阿部康志 (D3)、石橋陽子 (D3)、佐野 正人 (D3)、Jihyun Bhom (D3)、 福岡翔太 (D3)、水野三四郎 (D3)、木村創大 (D2)、中込宇宙 (D2)、 渡邊大介 (D2)、小林大洋 (D1)、田中直斗 (D1)、向井もも (D1)、 横山広樹 (D1)、新井郁也 (M2)、泉 大希 (M2)、佐藤 航 (M2)、 沢畑克樹 (M2)、野中俊宏 (M2)、細川律也 (M2)、青山 遼 (M1)、 市川ゆきな (M1)、塩谷知弘 (M1)、杉浦哲郎 (M1)、平野勝大 (M1)、 山本大貴 (M1)、李 準一 (M1)

### 【1】低エネルギー原子核実験グループ

(新井一郎、小沢顕、笹公和、長江大輔、森口哲朗)

#### (1-1) 稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成 16 年 4 月以来、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして稀少 RI リング (Rare-RI Ring) の R&D を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置され、理化学研究所の予算により、平成 24 年 4 月より製作が始まっている。

平成 26 年度は、キッカー磁石の最大 rigidity を 6 Tm にするために、キッカー磁石 3 台を新たに増設するとともに、個別入射のための同軸管の開発と製作を行った。さらに、 $^{241}\text{Am}$  からの 粒子を蓄積するための整備を行い、粒子の蓄積実験を行った。蓄積実験では、(i) 線源をリング内において 1 周させた場合と、(ii) 入射ラインの入り口に置き、入射ライン中に置かれた検出器の信号によりキッカーを励磁し、入射させるテストも行った。(ii) は、個別入射のテストもかねている。(i) の実験では、トリムコイルにより等時性磁場を変化させた。観測された 粒子の全飛行時間は、約  $4.6 \mu\text{s}$  であり、稀少 RI リングの周長を考慮すれば、粒子のエネルギーとコンシステントである。さらに、10 本のトリムコイルを調整し等時性磁場の形成を行った。結果を図 1 に示した。最適な等時性磁場で飛行時間の広がり是最小になる。図 1 で時間広がり最小のパラメーターは 粒子のエネルギーから計算されるパラメーターと一致した。時間広がり、最小で約  $1.7\text{ns}$  であり、 $\sim 10^{-4}$  の等時性磁場が形成できていることが確認できた。さらに、(ii) の実験では、キッカーのタイミングを調整することにより 粒子を個別に蓄積することに成功し、蓄積後キッカー磁石を励磁することにより、取り出しも可能であることが示された。 粒子は、最大 10 周蓄積させることができた。

平成 26 年度 6 月には、2Tm の陽子ビームの蓄積を行う予定であったが、加速器の故障によりキャンセルとなった。平成 27 年 6 月には、 $^{78}\text{Kr}$  ビームの蓄積実験 (マシンスタディ) が予定されている。デグレーダーなどで 170 A MeV まで減速させた  $^{78}\text{Kr}$  を個別入射により、蓄積リングに蓄積するとともに、BigRIPS から入射ラインまでのビーム光学系の確認、さらに  $^{78}\text{Kr}$  ビームに対する等時性磁場の確認などを行う予定である。

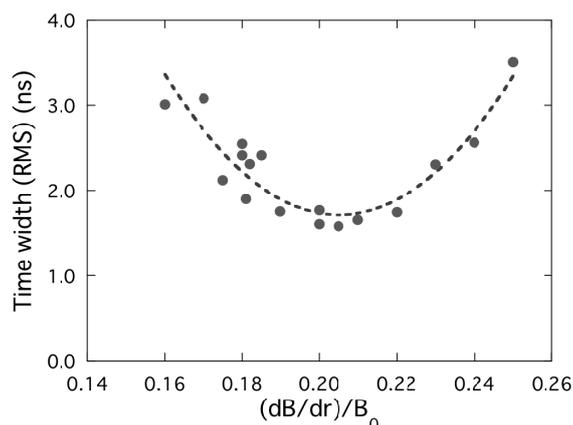


図 1: 粒子による稀少 RI リングの等時性磁場の調整結果。横軸は等時性磁場パラメータを示す。粒子のエネルギーから計算した最適値は 0.205 である。

### (1-2) 飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでは飛行時間の測定により不安定核の質量測定を行う。精密質量測定を行うためには非常に精度良く飛行時間を測定する検出器が必要であり、現在開発中である。検出器に求められる条件は 1)100ps 以下の時間分解能、2) 高い検出効率、3) 電荷変化が起こらない、4) アクセプタンスが非常に大きいことである。

検出器はアルミナイズドマイラー膜とマイクロチャンネルプレート (MCP) を組み合わせたものである。ビームがアルミナイズドマイラー膜を通過したときに発生する二次電子を電場と磁場を用いて MCP へと誘導し、信号を読み出す。この方法では、従来、放出する二次電子は位置や角度、初期エネルギーによらず等時性を持って MCP に到達する、と考えられていたが、最近、我々は、初期エネルギーの違いを小さくするには、電場を大きくすることが重要であることに気づいた。平成 26 年度は電場を大きくし、時間分解能を改善することを目標とした。また、これまでは電子は水平方向の移動を考えていたが、移動方向を垂直方向に変更したことで膜と MCP の中心間距離を 140mm から 75mm に縮めた。電場を大きくすることで必要な磁場も大きくなるので、これまではコイルに電流を流すことで磁場を生成していたが、永久磁石を用いることにした。印可する電場は、約 460 V/mm となり、これまでの検出器の 3 倍以上である。永久磁石により発生する磁場は、約 150 G である。放射線医学総合研究所の HIMAC において <sup>84</sup>Kr ビームを用いた性能評価では、予備的な値ながら、時間分解能  $\sigma \sim 60$ ps を得るとともに、検出効率として約 55 %を得た。時間分解能は目標値を達成した。現在は、試作機のため、MCP の有効径は 14mm である。今後は、検出効率の向上に努めるとともに、実機に向けて大型化を進める。

### (1-3) 不安定核の核モーメント測定

我々のグループでは平成 24 年度より大阪大学核物理研究センター (RCNP) で磁気双極子モーメント測定実験および符号を実験的に測定する  $\beta$ -NMR 法の開発を進めている。不安定核の磁気モーメント測定には  $\beta$ -NMR 法が有用である。しかし従来の  $\beta$ -NMR 法では右回転、左回転の磁場が合わさった振動磁場を用いているため、どちらの回転磁場が NMR に寄与したか判別することが出来ず、得られるのはその絶対値のみである。符号決定のためには回転磁場が必要であり、これまでに陽子の磁気

モーメントの符号 (正) 測定で回転磁場を用いて正の符号を確認することが出来ている。

平成 26 年度は (1) $^{40}\text{Sc}$  の核磁気モーメント測定及び (2) $^{20}\text{F}$  の核磁気モーメントの符号測定の原理実証実験を行った。以下、簡単に実験内容と結果について記述する。

(1) 不安定核  $^{40}\text{Sc}$  は二重閉殻で非常に安定な  $^{40}\text{Ca}$  の近傍に位置し、その核構造は興味深い。しかしながら  $^{40}\text{Sc}$  の核磁気モーメントは未知であり、平成 22 年度まで UTTAC で測定を行ってきたが値を決定するには至っていない。今回は  $^{41}\text{Sc}$  核での偏極保持実績のある CaO 標的、これまで使用してきた  $\text{CaF}_2$  標的の 2 種類で測定を行った。しかしながら、平成 26 年度の測定では、有意な共鳴は得ることはできなかった。

(2) 平成 25 年度も不安定核を用いた磁気モーメント符号測定は行ったが右回転、左回転の双方で共鳴が観測された。平成 26 年度は、これは回転磁場の制御が不十分だったためと考え、Phase shifter を用いた回転制御から、任意波形発生器の 2ch を同期して位相差をずらす方法に変え、核磁気モーメントの符号が既知である  $^{20}\text{F}$  に対して測定を行った。しかし、符号に関して有意な差を得ることが出来ず、RF 制御の改善が必要である。

#### (1-4) 不安定核の荷電核半径測定

不安定核ビームを用いた様々な実験により、安定核には見られない不安定核特有の性質があることが分かってきた。その一つとして挙げられるのがスキン構造である。スキン構造とは、不安定核の表面に陽子もしくは中性子が層のように分布する構造である。安定核では陽子と中性子は一様に分布するため、このような構造は見られない。不安定核のスキン構造を理解するには、原子核内の陽子と中性子の分布をそれぞれ独立に導出することが重要である。不安定核では、これまで、陽子分布を反映する荷電核半径が、optical isotope shift の実験によって測定されてきたが、適用できる原子番号に制限がある。最近、Glauber model 計算を用いて不安定核の荷電変換断面積 ( $\sigma_{cc}$ ) の測定から平均二乗根陽子半径を導出する方法が開発された。しかしながら、この方法では、補正項 (correction factor) (E) が必要とされ、この補正項は、荷電変換断面積と平均二乗根荷電核半径が既知である  $^{28}\text{Si}$  から与えられていた [1]。この後の研究では、Ca 同位体の荷電変換断面積の測定から  $0.95 < N/Z < 1.3$  の範囲に補正項 (E, N/Z) が拡張された [2]。

平成 26 年度は、標的中心で約 300 MeV/nucleon の  $^{34} - ^{36}\text{Ar}$  の荷電変換断面積、部分荷電変換断面積、チャージピックアップ反応断面積を測定した。また、荷電変換断面積とすでに測定されている平均二乗根荷電核半径から Glauber model 計算を用いて平均二乗根陽子半径を導出するために  $0.89 < N/Z < 1$  の N/Z 補正項を導出した。同様に、標的中心で約 265 MeV/nucleon の  $^{25} - ^{28}\text{Si}$  の荷電変換断面積、部分荷電変換断面積、チャージピックアップ反応断面積を測定し、Ar 同位体と Ca 同位体において導入した N/Z 補正項から Si 同位体での N/Z 補正項を推定し、それを用いて Glauber model 計算から  $^{25} - ^{28}\text{Si}$  の平均二乗根陽子半径を導出した。本研究で導出された  $^{25} - ^{28}\text{Si}$  の平均二乗根陽子半径を図 2 に示す。導出された平均二乗根陽子半径は相対論的平均場理論から求めた計算値と良く一致している。

チャージピックアップ反応断面積の研究は、安定核においてよく研究されており、入射核と標的核の質量数を用いた半経験的な式が与えられている [3]。我々は、陽子過剰核でのチャージピックアップ反応断面積がどのような振る舞いをするのかを調査し、測定された陽子過剰 Si、Ar 同位体のチャージピックアップ反応断面積を、安定核において与えられた半経験的な式で得られる値と比較した。その結果、陽子過剰側不安定核では、安定核で得られた半経験式から予想される断面積とよく一致することがわかった。

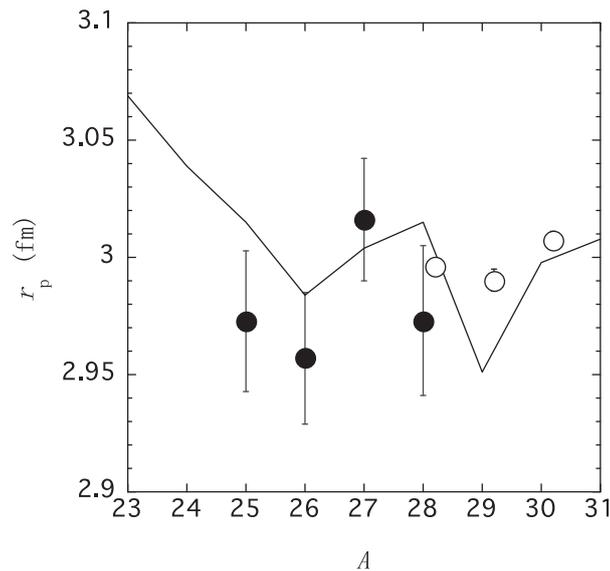


図 2: Si 同位体の平均二乗根陽子半径 ( $r_p$ )。黒丸は、今回の研究で得られた実験値。白丸は、過去の optical isotope shift の実験によって得られた実験値。実線は、相対論的平均場理論から求めた計算値。

#### (1-5) KISS の開発状況

**KISS のオンライン/オフライン試験結果** : 平成 26 年度の 7 月と 9 月のオンライン試験では、本実験の反応系 ( $^{136}\text{Xe}$ (ビーム)+ $^{198}\text{Pt}$ (標的)) を用いて、Pt と Ir の同位体の引出し及び寿命測定を行った。この試験では、弾性散乱による  $^{198}\text{Pt}$  と多核子移行反応生成物をガスセル中で停止・中性化させ、レーザーによって元素選択的に再イオン化した核種を引き出した。以下に実験項目と結果を示す。(a) 弾性散乱による  $^{198}\text{Pt}$  の引出効率は、 $^{198}\text{PtAr}_2$  のイオンに対して 0.2% だった。(b)  $^{198}\text{PtAr}_2$  の選択度 (レーザー ON/OFF での目的質量数のイオン収量の比) は 300 だった。(c)  $^{198}\text{Pt}$  が分子状イオンとして検出される割合は、Pt : PtH<sub>2</sub> : PtH<sub>2</sub>O : PtAr<sub>2</sub> = 1 : 1 : 1 : 6 だった。(d) 核反応により生成された  $^{199}\text{Pt}$  の検出と、寿命測定による核種同定を行った。

引出効率は 1% 以上を期待していたが、1/10 になっている原因として、ガスセル直後の SPIG でガスセルから断熱膨張して出てくるイオンをうまく捕えられていないこと、分子状イオンの形成により見かけの効率が落ちていることが考えられる。そこで、口径の大きい SPIG と小さい SPIG を連ねた二段 SPIG を導入した。これにより、SPIG 接続部分にかけた DC 電圧によって分子イオンを加速し、アルゴンガスと衝突させることで単一イオンへ解離することに成功した。

**リファレンスセルの改良と Ta イオン化経路探索** : KISS 計画で  $\beta$  崩壊核分光を予定している Ta(Z=73)、W(Z=74)、Re(Z=75)、Os(Z=76)、Ir(Z=77)、Pt(Z=78) の高効率な二段階レーザー共鳴イオン化の経路を確立する必要がある。平成 26 年度は製作したイオン化経路探索を恒常的に行える実験装置 (リファレンスセル) を、同位体分離ができるように改良した。これはイオン化経路探索に加えて、レーザー共鳴準位の同位体シフトなどに関する系統的データ取得のためである。目標の質量分解能は 400 で、共鳴イオン化されたイオンの飛行時間の違いで質量分離する。加速電極を二段線形加速式にすることで、最大で質量分解能 250 を達成できた。

改良リファレンスセルを用いて、Ta( $^{181}\text{Ta}$  : NA = 99.988%) の AIS 探索を行い、見つかった 2 つの AIS について強度依存性を測定した。真空中でのイオン化効率などを見積もるために、現在解析中である。

**線テレスコープ** : ガスセルから引き出された短寿命核イオンの寿命測定に用いる検出器、線テ

レスコープの開発・改良を行った。最初に作製した3組の線レスコープは全立体角の90%を覆うように配置されており、各レスコープは0.5 mm厚と1 mm厚のプラスチックシンチレータから構成されている。薄いシンチレータの採用は低エネルギー線にも感度を持たせるためである。線レスコープの検出効率は $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対して55.4%、バックグラウンドレート(BGレート)は5 cpsであった。BGレートを減らすため宇宙線に対する veto カウンターとPbシールドを設置し、これによりBGレートを1.2 cpsまで抑えた。

低収量の短寿命核の寿命測定のためさらに1桁のBGレート低減と検出効率の向上を目指しプラスチックシンチレータの厚さおよび形状を変更した。大きな変更点として一層目の面積を以前の約1/3にし、厚さを0.5 mmから1 mmに変更した。二層目については厚さを1 mmから2 mmに変更している。シンチレータの厚さの変更は低エネルギー線への若干の感度低下を招くが、シンチレーション光のシンチレータ内での減衰を抑制することで検出効率の改善を目指している。一層目のサイズ変更はレスコープが見込む立体角を線源領域に可能な限り限定することでBGレートの低減を図っている。そのため改良したレスコープの覆う立体角は全立体角の75%となった。 veto カウンターとPbシールドを設置した状態で改良後のBGレートを測定したところ0.09 cpsまで減らすことができ当初の目標を達成できた。シンチレータ上での線源照射位置を限定して測定したエネルギースペクトルからは、極端な光減衰による影響は見られなかった。検出効率については今後測定を行う。

#### (1-6) 筑波大学6 MV AMSシステムのPHITSコードを用いた性能評価

筑波大学では2015年度より6 MV タンデム加速器の稼働開始が予定されている。これまでは12 MV タンデム加速器を用いて加速器質量分析法(Accelerator Mass Spectrometry)による宇宙線生成核種の検出に取り組んできた。しかし、加速器の更新に伴いターミナルの最大電圧が半分の6 MVに低下することになる。本研究では、加速電圧が低いためにその検出が難しい $^{36}\text{Cl}$ -AMS測定条件の最適化について、粒子・重イオン輸送計算コードPHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)を用いておこなった。

同重体の分離測定を行うガス検出器は複数の電極から構成され、各部位におけるエネルギー損失を測定し阻止能の差を利用して同重体の分離識別を行っている。筑波大学6 MV タンデム加速器のAMSシステムでは、5枚電極型のE-Eガス検出器を用いる。E-Eガス検出器の入射窓には $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜(厚さ150 nm、密度 $3.4\text{g}/\text{cm}^3$ )を用いて、封入ガスはP10ガス(Ar 90%+CH<sub>4</sub> 10%)とした。46.9 MeV(1.33 MeV/u)の $^{36}\text{Cl}$ と $^{36}\text{S}$ がE-Eガス検出器に入射した場合のシミュレーションでは、ガス圧が42 Torrの時に最も同重体の分離識別が良いことが分かった。PHITSコードによる計算で得た $^{36}\text{Cl}$ のAMS測定におけるエネルギー損失スペクトルを図3に示す。

PHITSコードを用いた計算により、筑波大学6 MV タンデム加速器を用いた宇宙線生成核種 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{129}\text{I}$ 等のAMS測定について、過去の太陽活動や地球磁場強度変動を推測するのに必要な $10^{-14}$ 以下の同位体比の検出が可能となる測定条件を得た。

#### (1-7) 福島第一原発事故起源ヨウ素129の環境移行研究

福島第一原子力発電所(FDNPP)事故によって2011年3月12 - 21日にかけて放出された汚染気塊を介して、放射性ヨウ素などの核分裂生成物質が福島県の地表面へ多量に沈着した。文部科学省の空間線量率分布図を基にすると、FDNPPから北西方向に汚染が顕著に認められている。放射性ヨウ素129( $^{129}\text{I}$ )は、人為起源として再処理施設、大気核実験、および原子力発電所事故から環境中に放出され、天然起源としては宇宙線による大気中の $^{129}\text{Xe}$ の核破砕反応と地殻中の $^{238}\text{U}$ の自発核分裂によって生成される。 $^{129}\text{I}$ は放射線エネルギーとしては低い、長半減期核種(半減期:1,570万年)であるためFDNPP事故によって放出された放射性核種のトレーサーとして利用できる。本研究では、帰還困難区域に指定されている大熊町北部において、FDNPP事故起源 $^{129}\text{I}$ の土壤中における沈着量

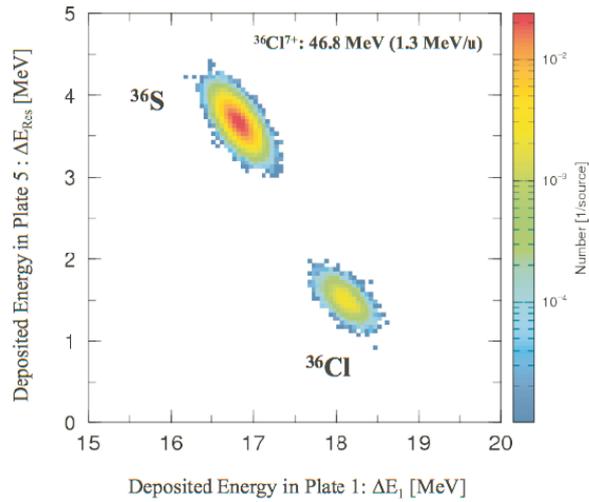


図 3: PHITS コードにより計算した  $^{36}\text{Cl}$ -AMS の E-E ガス検出器による 2 次元スペクトル図。46.8 MeV の  $^{36}\text{Cl}^{7+}$  が入射した場合、P10 ガス圧の最適値は 42 Torr となった。計算での入射粒子数は、 $^{36}\text{Cl} : ^{36}\text{S} = 10,000 : 10,000,000$  である。第 1 電極の損失エネルギーを横軸 ( $E_1$ ) にとり、縦軸は第 5 電極での残留エネルギー ( $E_{Res}$ ) とした。

と浸透を正確に評価することを目的とし、事故前後にほぼ同じ地点で採取した土壌コア中の  $^{129}\text{I}$  濃度の深度分布を比較した。試料は、FDNPP から西へ 4.2 km 地点の Iw-2 と西へ 8.4 km 地点の Iw-8 において、事故前 (2008 年 5 月) と事故後 (2012 年 11 月) に 30 cm の土壌コアを採取したものを用いた。 $^{129}\text{I}$  の測定は、東京大学タンデム加速器施設 MALT の AMS システムを用いた。図 4 に FDNPP 事故前後の土壌中の  $^{129}\text{I}$  分布を示す。事故後において、2 地点の最表層土壌でかなり高い  $^{129}\text{I}$  濃度 (Iw-2:  $130 \text{ mBq kg}^{-1}$ 、Iw-8:  $40.2 \text{ mBq kg}^{-1}$ ) が認められ、どちらも深度と共に指数関数的に減少した。Iw-2 地点において、沈着した事故起源  $^{129}\text{I}$  のおよそ 90% が  $37 \text{ kg m}^{-2}$  より上層に存在していた。Iw-8 地点については、沈着した  $^{129}\text{I}$  のおよそ 90% が  $51 \text{ kg m}^{-2}$  より上層に存在し、その 9% が ( $51 \sim 130$ )  $\text{kg m}^{-2}$  に浸透していた。

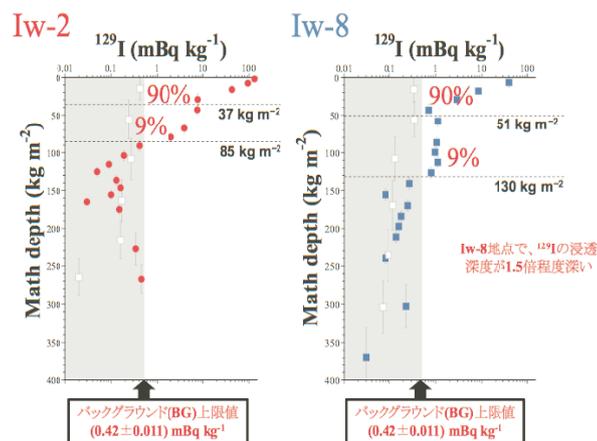


図 4: 2 地点における FDNPP 事故前後の  $^{129}\text{I}$  濃度の深度分布。

#### (1-8) 筑波大学 6 MV タンデム加速器システムの導入

筑波大学 UTTAC では、震災復興計画により 6 MV タンデム加速器の導入を進めている。加速器本体は、米国 National Electrostatics Corp. のペレトロン型であり、2014 年 1 月に 6 MV の昇圧試験に成功している。筑波大学には 2014 年 3 月に加速器本体の搬入設置作業が行われた。加速器周辺機器及びビームラインの組み立て作業については、2014 年 10 月までにほぼ終了している。また、新設の加速器用冷却水循環装置は、2015 年 1 月に設置された。現在は、信号線及び電気配線の設置作業等を実施している。6 MV タンデム加速器については、放射線発生施設承認申請の提出準備を進めており、2015 年度中の稼働開始を目指している。図 5 に、導入された筑波大学 6MV タンデム加速器システムの全体写真を示す。



図 5: 筑波大学 6MV タンデム加速器システムの全体写真。

#### (1-9) Lamb シフト型偏極イオン源の再構築

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門では Lamb シフト型偏極イオン源 (PIS) を所有しており、これまでに偏極分解能や不安定核の核磁気モーメントの測定などを行ってきた。PIS は東日本大震災によって大きな損害を受け、このままでの継続使用は不可能となった。震災後、新しく導入された 6MV タンデム加速器のためのイオン源の一つとして使用することが決まり、PIS の再構築が始まった。PIS を新たに設置するために、当部門の加速器棟西側に PIS 棟を新設した。再利用可能と判断された物 (デュオプラズマトロンのチェンバー、スピンフィルター、Ar ガスセル、静電ステアラー、ウィーンフィルター等) は、もともと設置されてあった加速器棟 9 階から PIS 棟へ移動させ、再度、組み直した。再利用可能以外の物品に関しては、基本的に新しい物に入れ替えた。平成 26 年度で PIS 本体を含むビームラインの整備はほぼ完了した。真空系はスクロールポンプと磁気浮上式ターボ分子ポンプを使用し、PIS のビームライン全体で  $\sim 10^{-8}$  Torr が維持されている。震災によって動作不良となったゲートバルブはオーバーホールによって再利用された。加速管、四重極電磁石、いくつかのビームダクトは新たに製作し、PIS のビーム輸送ラインとして組み込んだ。PIS を動かすための多くの電源も新しくした。これらの電源を含む周辺機器の多くは新たに設計された高電圧架台の上に設置され、光ファイバーによって制御が可能となっている。その中の一つが高速スピンステイトコントローラーであり、スピン状態の切り替えや偏極の On/Off を光ファイバーを通じて制御できるようになっている。

現在、EPICS を用いた制御システムの整備を進めている。その後、ビームテスト (強度、偏極度、輸送効率等) を実施し、不安定原子核の核磁気モーメント測定実験などに使用する予定である。

【2】高エネルギー原子核実験グループ (三明康郎、江角晋一、中條達也、Oliver Busch、益井宙、加藤純雄)

(2-1) 重イオン衝突における粒子生成源のシステムサイズおよび空間異方性の系統測定

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある相対論的重イオン衝突型加速器を用いて、未知の物質相であるクォークグルーオンプラズマ (QGP) の実験的研究が進められている。重イオン衝突によって生成された QGP は流体膨張を伴いつつハドロン物質へと転移するが、ハドロン放出時の粒子空間分布を調べることは、系の膨張の様子を解明するとともに QGP 物性を理解する上で重要である。本研究では、量子統計干渉効果 (HBT 効果) を用いて、システムサイズおよび異方性の測定を行った。特に  $\pi$  中間子に加えて、共鳴粒子崩壊による雑音粒子の影響の少ない  $K$  中間子を解析し、粒子依存性に着目した。

図 6 は終状態におけるシステムサイズの横質量依存性である [4]。系が膨張していることを示す横質量依存性が  $\pi$  中間子および  $K$  中間子で観測されているが、特に中心衝突において粒子間に違いが観測された。定性的には流体モデルによって再現されているが、粒子放出時間の情報を含むサイズパラメータ  $R_0$  は定量的には再現できていない。空間的異方性についても測定を行い、原子核の重なり起因する初期の楕円形状が終状態でも観測され、非常に強い膨張または瞬間的膨張であったことを示唆している。空間的異方性に関しては、統計精度および系統誤差の範囲内で粒子間に優位な差は観測されなかった。

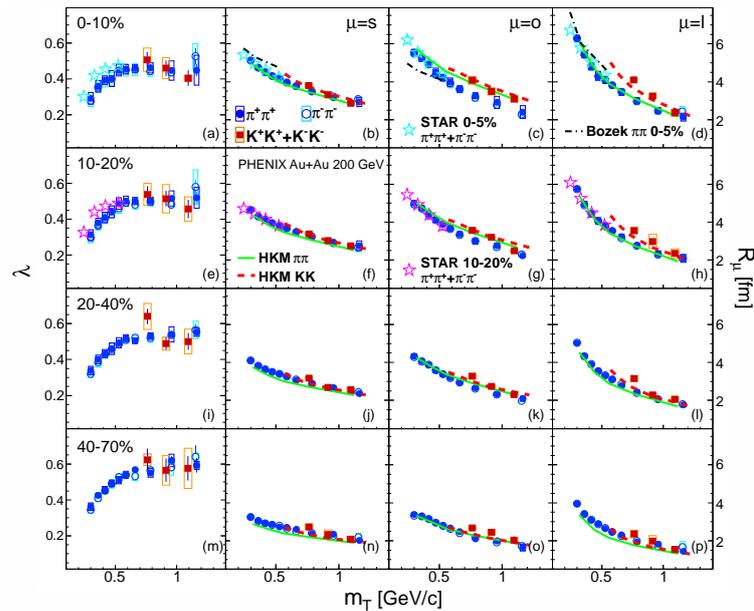


図 6:  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金 + 金原子核衝突におけるシステムサイズの横質量依存性

(2-2) 高エネルギー重イオン衝突における粒子種識別高次方位角異方性の測定

高エネルギー重イオン衝突実験において衝突に関与したクォークとグルーオンは熱平衡化後 QGP 相を構成し、QGP 流体の膨張 (冷却) を経てハドロンガスに至る。衝突系を記述する相対論的流体計算と実験結果の比較による衝突初期条件及び QGP 粘性の決定が重要な課題である。近年の包括荷電

ハドロン測定により、楕円型方位角異方性 ( $v_2$ ) に加えて三角形型及び四角形型の高次方位角異方性 ( $v_3, v_4$ ) が、初期条件及び粘性の組み合わせをより強く制限することが判明した [5]。本研究では流体計算に対し更なる参照結果を与えることを目的として、QGP 流体発展に対するハドロン種毎の応答に注目した粒子識別下での  $v_{2,3,4}$  の測定を行った。

図 7 は反応平面法及び二粒子相関法によって測定された、 $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金 + 金原子核衝突における粒子識別  $v_2, v_3, v_4$  である [6]。従来報告されていた  $v_2$  の低横運動量におけるハドロン質量依存性及び中間横運動量領域におけるハドロン構成クォーク数依存性 [7] が  $v_{3,4}$  においても観測された。これは  $v_{3,4}$  が  $v_2$  と同じく QGP の流体的膨張によって発展することを強く示唆する結果である。本測定と理論計算の比較を行い、初期条件及び粘性値の検討を行うことが今後の課題である。

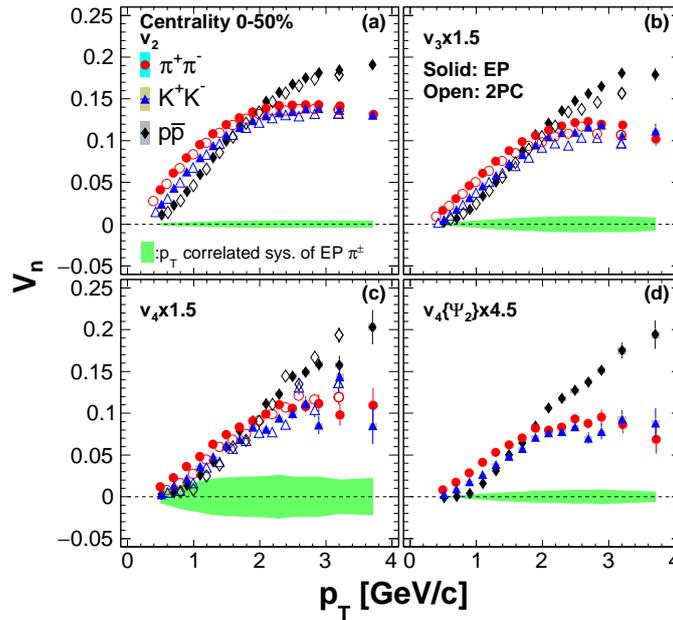


図 7:  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金 + 金原子核衝突における  $\pi^\pm, K^\pm$  及び  $p + \bar{p}$  粒子の  $v_2, v_3, v_4, v_4\{\Psi_2\}$

### (2-3) RHIC-PHENIX 実験における直接光子の $v_2, v_3$ 測定

BNL 研究所の PHENIX 実験において高エネルギー重イオン衝突実験を用いた QGP の研究を進めるために直接光子の測定をおこなった。光子は重イオン衝突時から常に放出されており、強い相互作用をしないため、生成された時の情報を持って放出される。低い横運動量における直接光子の横運動量に対する収量測定の結果から、重イオン衝突実験では陽子陽子衝突実験と比較して多くの光子が放出されていることが確認された [8, 9]。このことから、重イオン衝突では熱光子が多く生成されていると考えられている。

直接光子の  $v_2$  (2 方向への偏りの大きさ) の測定が行われ、ハドロン同様の強度を持つことがわかった [10]。衝突初期から生成される光子は  $v_2$  が小さいと考えられるため、実験で測定される光子の  $v_2$  はハドロン同様の  $v_2$  よりも小さいと期待されていた。しかし、大きな  $v_2$  が測定され、まだ完全には理解されていない。光子生成の理解のために、 $v_3$  (方位角異方性の 3 方向への偏りの大きさ) の測定が行われた。図 8 のように  $v_2$  と同様に  $v_3$  でもハドロンと同程度の強度が測定された。この測定結果から、実験で測定される低い運動量領域の光子は衝突後期から生成される光子が支配的だと考

えられる。この測定が生成メカニズムの理解につながると期待される。

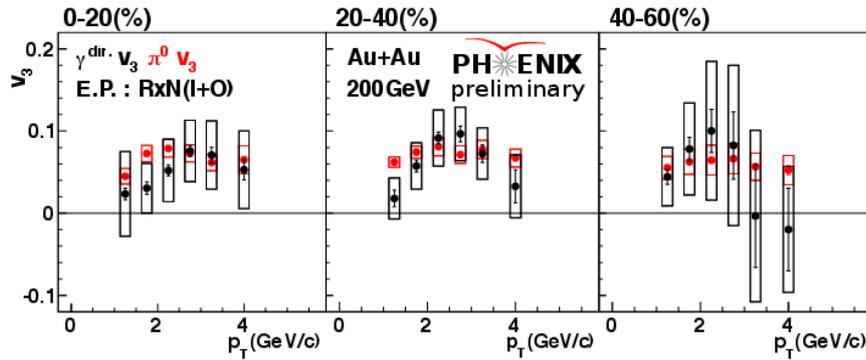


図 8: Au+Au 200GeV 衝突実験で観測された直接光子と中性パイオンの  $v_3$  結果

#### (2-4) 重陽子+金衝突、及びヘリウム+金衝突における方位角異方性の測定

アメリカのブルックヘブン国立研究所における相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いて、2008 年に重陽子+金の衝突実験が行われた。これまでに、小さい衝突系での実験が RHIC と欧州原子核研究機構における大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) で行われてきたが、衝突系が小さいためクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) が生成されていないと考えられてきた。しかし、高多重度の陽子+陽子衝突や陽子+鉛衝突において大きい擬ラピディティ差を持つ生成粒子間の方位角相関の観測や、粒子相関によって測定された楕円方位角異方性  $v_2$  の観測により、QGP が生成されている可能性が見つかった。そこで、重陽子+金の衝突実験のデータを用いて、小さい衝突系においても QGP が生成されているのか調べることを目的として  $v_2$  を測定し、先に報告された LHC での陽子+鉛衝突における  $v_2$  の結果と比較をした。

図 9 は RHIC-PHENIX 実験で測定された重陽子+金衝突における  $v_2$  の  $p_T$  依存性と、LHC で測定された陽子+鉛衝突における  $v_2$  の  $p_T$  依存性を示している [11]。この結果から、重陽子+金衝突における  $v_2$  は、陽子+鉛衝突における  $v_2$  とほぼ一致していることが分かる。また、図 10 は pion と proton に粒子識別した場合の  $v_2$  の  $p_T$  依存性と流体モデルとの比較を示している [11]。この結果から、流体モデルで記述される質量依存性が見られる。また、より高エネルギーの陽子+鉛衝突における結果と比較すると、粒子種による  $v_2$  の大きさの差が小さいことから重陽子+金衝突では半径方向への膨張がより小さいことが分かる。

2014 年にはヘリウム+金衝突、2015 年には陽子+金衝突実験も行われ、同様の測定をしており、今後もより詳細な測定を行っていく必要がある。

#### (2-5) 保存電荷揺らぎを用いた QCD 臨界点探索

米国ブルックヘブン国立研究所における相対論的重イオン衝突型加速器 RHIC を用いて、2010 年及び 2011 年にビームエネルギー走査プログラム (BES) が行われた。BES の最大の目的は QCD 相図上に存在し得る QCD 臨界点の探索である。臨界点では 2 次相転移によって保存電荷の感受率及び系の相関長が発散する。臨界点に敏感な実験的観測量の一つに保存電荷分布の揺らぎが挙げられる。保存電荷揺らぎは感受率に密接に関連すること、さらに高次揺らぎは相関長に非常に敏感であることが理論的に予測されている。したがって、保存電荷揺らぎを測定することによって、QCD 臨界点由来の揺

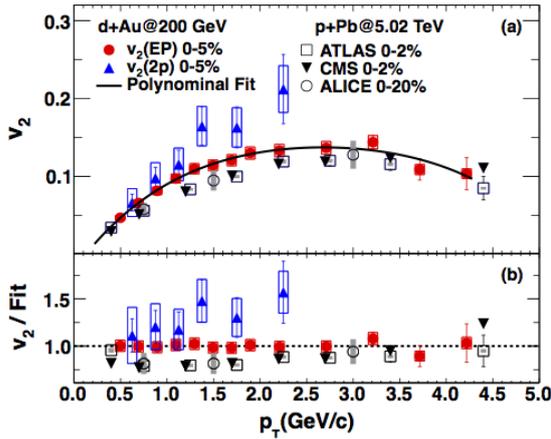


図 9: 重陽子+金衝突及び陽子+鉛衝突における  $v_2$  の  $p_T$  依存性

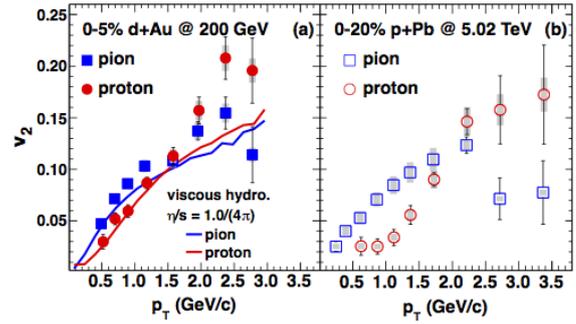


図 10: 粒子識別後の  $v_2$  の  $p_T$  依存性と流体モデルとの比較

らぎを捉えることが出来ると期待されている。RHIC-STAR 実験では、重心系核子対当たり 7.7 GeV から 200 GeV までのデータを収集し、QCD 臨界点探索のため保存電荷揺らぎを解析した。図 11、12 は RHIC-STAR 実験で測定された、正味陽子及び電荷の高次揺らぎのビームエネルギー依存性である [12, 13]。臨界点近傍では高次揺らぎが統計的 (ポアソンの) 揺らぎから大きくずれることが予想されている。図 11 の正味陽子では、ビームエネルギー 20 GeV 付近で統計的揺らぎからのずれが観測され、ビームエネルギーに対して非単調的振る舞いを示すことが分かった。一方で、正味電荷 (図 12) では、系統的不確かさの範囲内で優位なずれは観測されなかった。低ビームエネルギーでは統計精度が不十分なため、これらの結果から QCD 臨界点の有無を議論することは出来ない。2018 年以降に行われる予定の高ルミノシティ BES では最大で 10 倍のデータ取得が見込まれており、また検出器増強計画も進行中である。これらを組み合わせることによって、高次揺らぎの統計精度を改善し、さらに系統誤差も軽減することによって、QCD 相構造に対する新たな知見が得られると期待される。

(2-6) LHC-ALICE 実験における  $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突での、中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関

ジェット測定は高エネルギー原子核衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) の性質を調べる上で有用なプローブとなる。ジェットが QGP 中を通過する際に失うエネルギーを測定することによって、パートンの QGP 中のエネルギー損失機構を解明することにつながり、さらに QGP の密度や温度などの物理量の導出が期待できる。粒子は QGP 中を通過する際にエネルギー損失を起こすので、観測される高運動量のハドロンは QGP の表面付近で生成されるため、高運動量のハドロンをトリガーとして選んだ場合、 $180^\circ$  反対方向に生成されるジェットの QGP 中での通過距離を長くすることができる。よってトリガーとなるハドロンの運動量を変えることによって、ジェットの QGP 中での通過距離をコントロールすることができる。

スイスのジュネーブにある欧州原子核研究機構 (CERN) で、2010 年から LHC 加速器の運用が始まった。ALICE 実験で 2011 年に取られた重心系  $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突実験データを使い、中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関についての研究を行った。中性パイ中間子の再構成には電磁カロリメータ検出器 (EMCal)、荷電粒子ジェットの再構成にはシリコン検出器 (ITS) とタイムプロジェクトンチェンバー検出器 (TPC) を用いて行った。中性パイ中間子の運動量が高くなるにつれて 2 つの崩壊光子の崩壊角は小さくなり、EMCal 上の 2 つの電磁シャワーは重なってしまう。

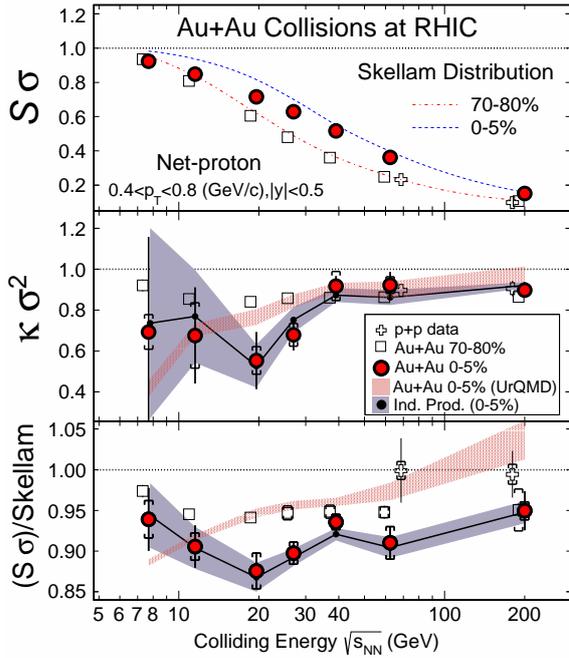


図 11: 正味陽子分布の高次キュムラント

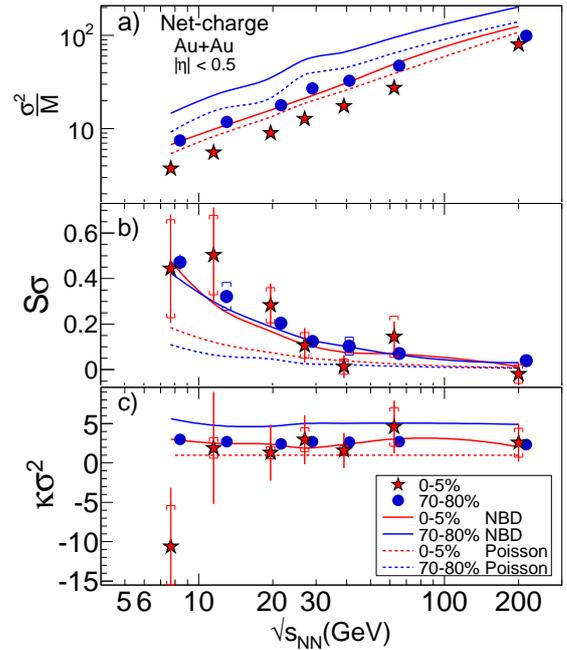


図 12: 正味電荷分布の高次キュムラント

従来の不変質量再構成の方法では重なった電磁シャワーからうまく中性パイ中間子が再構成できない。本研究では2つの重なった電磁シャワーの楕円形を用いて中性パイ中間子を再構成した。これにより40 GeVまでの中性パイ中間子の再構成をすることができた。

図 13 は中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関を示している。トリガーの中性パイ中間子の運動量領域は、 $8 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 12$  (GeV/c)、 $16 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 20$  (GeV/c)、 $24 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 36$  (GeV/c)。トリガーである中性パイ中間子の運動量が高くなるにつれて near side と away side のピークが上昇している。このことは高運動量の粒子になるほど、ジェットとの相関を持っていることを示しており、また中性パイ中間子がトリガーとなるハドロンに適していることを示している。この結果をベースラインとして今後重イオン衝突実験の解析を進めて行き、ジェットの QGP 中でのエネルギー損失機構の通過距離依存性について研究を進める。

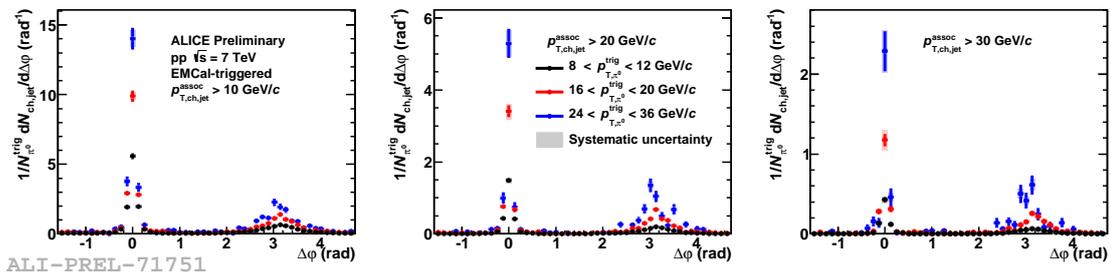


図 13: 中性パイ中間子をトリガーとした荷電粒子ジェットの方角相関

## (2-7) Particle Identified Jet Fragmentation with ALICE experiment

CERN-LHC での  $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突において、ALICE 実験でジェット内の荷電  $\pi$ 、K 中間

子、陽子+反陽子分布を測定した。シリコンを用いた内部飛跡検出器 (ITS) と時間射影荷電粒子飛跡検出器 (TPC) で測定した横運動運動量  $0.15\text{GeV}/c$  以上の荷電粒子により、半径パラメータ  $R=0.4$  で anti-kt 法を用いてジェットを再校正した [14]。TPC のコヒーレント・フィット法を用いて、検出器内での電離損失  $dE/dx$  情報から、 $\pi$ 、K 中間子、陽子の観測収量を統計的に測定し [15]、荷電粒子レベルのジェットに補正した結果 (粒子識別したジェット破碎分布関数) を得た。

図 14 に、1 ジェットあたりの  $\pi$ 、K 中間子、陽子+反陽子の生成量を、ジェット運動量に対する相対運動量  $z^{ch} = p_{T,particle}/p_{T,jet}^{ch}$  に対する依存性として、3 つのジェット運動量領域で示した。どの粒子種の場合にも、低い  $z^{ch}$  領域で最大値を示す「hump-backed plateau」を観測した。 $z^{ch} > 0.2$  領域で、2 つのジェット  $p_{T,jet}^{ch}$  領域間 (10-15、15-20 $\text{GeV}/c$ ) の類似性は、これまでに観測されたより高い  $p_{T,jet}^{ch}$  領域での、ジェット内荷電粒子分布の  $z^{ch}$  スケーリングを示している [14]。K/ $\pi$  比が  $z^{ch}$  に対して単調増加するのに対し、 $p/\pi$  は  $0.5 < z^{ch} < 0.6$  領域で最大値を示し、ジェット内の leading バリオン生成の抑制を示唆している。PYTHIA モデル計算は大まかな依存性を再現するが、実験データの詳細を記述できない事が現状である [15]。

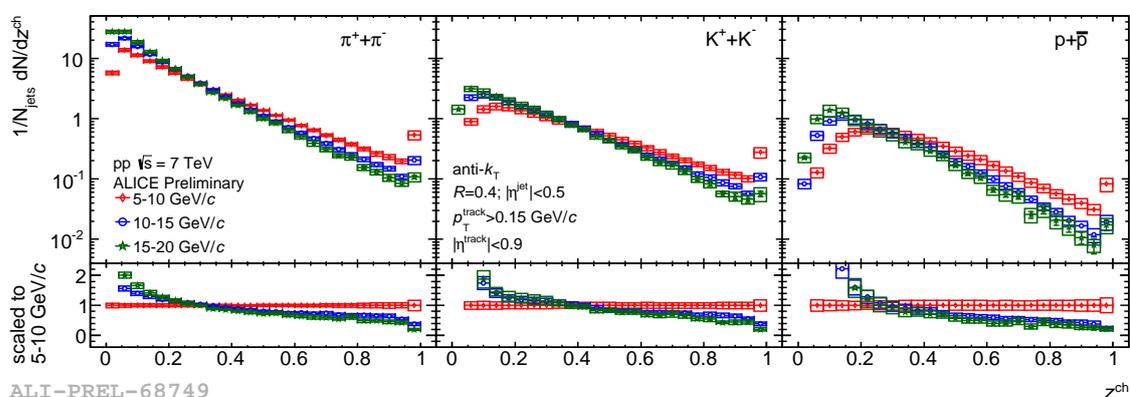


図 14: 1 ジェットあたりの  $\pi$ 、K 中間子、陽子+反陽子の生成量を、ジェット運動量に対する相対運動量  $z^{ch}$  の関数で表している。粒子識別したジェット破碎分布関数を、3 つのジェット運動量領域で示している。

## (2-8) LHC-ALICE Run2 における電磁カロリメータ検出器群を用いたジェット及び光子トリガーシステムの開発

欧州原子核研究機構 (CERN) では、2015 年度から大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を用いた第二期実験 (Run2) が開始される。ALICE 実験では筑波大学・高エネルギー原子核実験グループの主導で開発された電磁カロリメータ検出器である Di-jet CALorimeter(DCAL) の運用が始まり、ジェットイベントをプローブとしたクォーク・グルーオン・プラズマの詳細な物性探査が期待されている。我々はこの DCAL に加え、EMCAL, PHOS と呼ばれる計 3 機の電磁カロリメータ検出器群を用いてジェットイベント及び高エネルギー光子イベントを効率的に収集することを目的としたトリガーシステムに関わる開発を行った。トリガーアルゴリズムは Summary Trigger Unit(STU)[図 15] と呼ばれるボード上の FPGA に電子回路として実装される。開発言語として VHDL を用いてファームウェアを作成した。Run1 からの主な変更点・追加点は以下のとおりである。

- DCAL 増設に伴い変更された、データ読み出し方法への対応
- 光子及びジェットトリガーアルゴリズムの高速化

- PHOS への STU 導入のため、PHOS 検出器構成への対応及び PHOS STU から DCAL STU への通信アルゴリズムの追加
- ジェットバックグラウンド計算を目的とした、EMCAL STU と DCAL STU 間の相互通信アルゴリズムの追加
- ALICE 実験で用いられる Common Data Header(CDH) バージョンアップへの対応 (CDH version 3)

論理回路シミュレータを用いたテストベンチにより、正常な動作及び要求される動作速度が満たされることを確認した。2015 年度初頭には実機を用いた動作試験を行い、実際に ALICE のシステムに組み込む予定である。

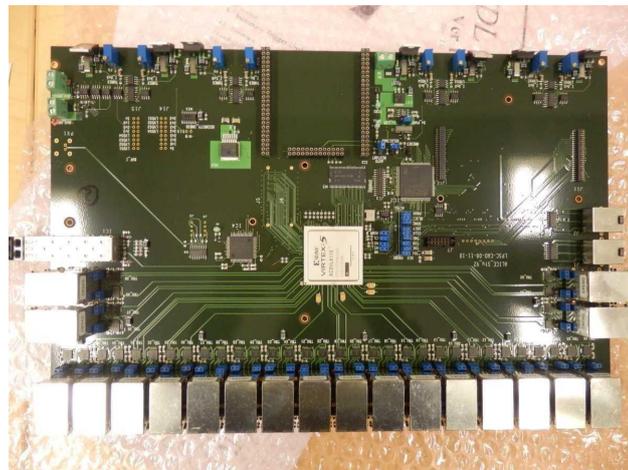


図 15: Summary Trigger Unit

#### (2-9) ALICE アップグレードのための超前方光子検出器 FoCal(Forward Calorimeter) の開発

欧州原子核研究機構 CERN の ALICE 実験において超前方領域での物理測定するための FoCal(Forward Calorimeter) 検出器を導入する計画がある。FoCal は直接光子を検出することを目的とした電磁カロリメーターの FoCal-E と、ジェットを測定することを目的としたハドロンカロリメーターの FoCal-H から構成されており、2022 年に予定されている Long Shutdown3 に完成機の導入を目指している。光子はカラー価を持っていないため QGP 中を相互作用すること無く、衝突初期の情報を含んでいることが予想されている。またその直接光子を前方方向で捉えることで、QGP 早期熱化の原因解明、CGC モデルの検証、初期パラメータの決定が期待されている。

本研究では FoCal-E の試作機を用いて PS/SPS で 2~50GeV/c のエネルギー領域でのテストビーム実験を行い、検出器のエネルギー依存性や分解能などの性能評価を行なった。また、DAQ system は LHC で実験を行っている ATLAS 実験の micromegas 検出器 (ドリフトチェンバーなど) に用いられている mmDAQ を使用した。図 16、図 17 に、テストビームで得られたデータを使用して求められたエネルギー依存性とシミュレーション [18] と比較したエネルギー分解能を示した。図 17 では赤い線でシミュレーションの結果を示しているが実験結果とは大きく外れている。これは、検出器のノイズレベルが高くなってしまっていることとシグナルの飽和や読み出しのレートにより計測できる粒子

の数が少なくなっていることが考えられる。今後の課題として、ノイズレベルの低減と DAQ system の高速化が挙げられる。

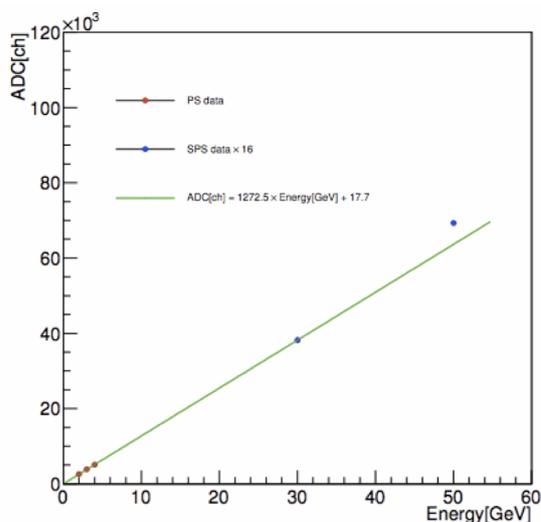


図 16: エネルギー依存性

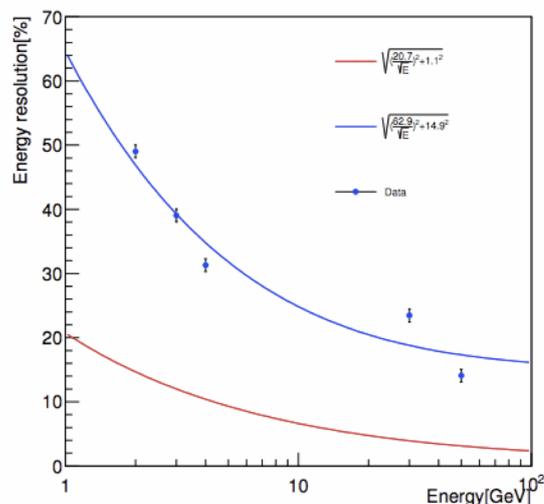


図 17: エネルギー分解能とシミュレーションの比較

#### (2-10) Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) 飛行時間測定器の開発

高エネルギー重イオン衝突実験では、近年 10~30ps の時間分解能を持つ飛行時間測定器の必要性が高まっている。それを達成できる検出器として最も有力なのが、Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC)である。MRPCは、RHICのSTAR、PHENIX 実験や、LHCのALICE 実験等で広く実用化されており、ALICE 実験の2 段型 MRPC は 50ps の時間分解能を達成している。

MRPC の時間分解能を向上させるには、段数を増やすことが有効である。2008 年には、1 段あたり 6 つのガスギャップを持つ 4 段型 MRPC が開発され、約 20ps の時間分解能を達成したという報告があった。10ps の時間分解能を達成するには、段数を増やすことによるメリット・デメリットを調べることが必要不可欠である。

そこで、1 ~ 4 段型の MRPC に対して、プリアンプの最適化が行われた。波形観測によりインピーダンスマッチングを行い、その後、時間分解能を評価することで最適な利得を決定した。利得を下げるとプリアンプの帯域が広がり、MRPC の信号の立ち上がりが早くなり、時間分解能も向上した(図 18)。また段数を増やすと、寄生容量によって立ち上がりが遅くなることが観測され、利得をさらに下げて帯域を広げなければならないことが分かった。今後、さらに帯域の広いプリアンプを開発し、10ps の時間分解能を目指す。

#### (2-11) KEK サマーチャレンジのためのラドン検出器の開発

ラドン  $^{222}\text{Rn}$  は無色無臭の希ガス放射性元素である。ウランウム  $^{238}\text{U}$  を起点に次々と原子核崩壊を繰り返して鉛  $^{206}\text{Pb}$  に至るウラン系列に属している。ウランウムは地中の岩石や土壤に含まれているので、その崩壊過程でラドンが発生し地表にまでしみ出している。

本研究は放射線教育の教材開発として身近な放射性物質であるラドンを題材として原子核の崩壊や半減期、放射線のエネルギーについて学ぶ補助教材の開発を目的としている。教材開発のためには安全に教育現場で使用できる安価で小型なラドン検出器であることと、教員と生徒が容易に扱えるデー

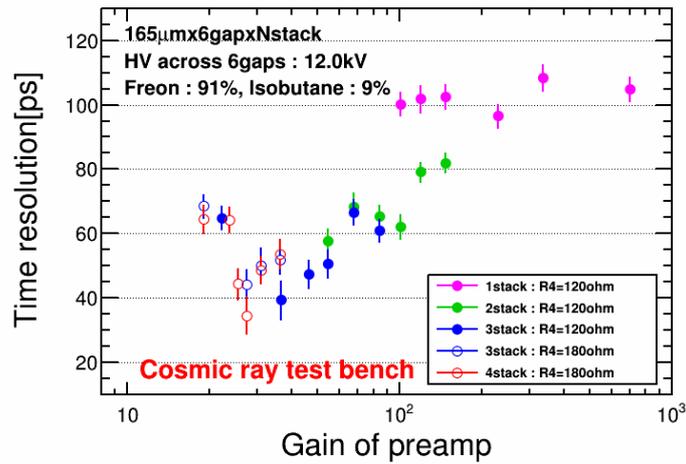


図 18: 縦軸に時間分解能、横軸にプリアンプの利得をプロットしたグラフ。マゼンタのマーカが1段型、緑色が2段型、青色が3段型、赤色が4段型 MRPC の結果である。中抜きのマーカは、後段の利得をさらに下げたものである。

タ解析ソフトウェアの開発が重要である。

2014 年度は高電圧部分を安全に使用するために読み出し回路を金属ケースにおさめ回路を改良した(図 19)。さらに検出器の性能についても  $\alpha$  線のエネルギー分解能が 0.84% となり前年よりも良い結果が得られた。図 20 は天然ウランを含む鉱石の測定結果であり、ラドン  $^{222}\text{Rn}$  の娘核であるポロニウム  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ 、ラドン  $^{220}\text{Rn}$  の娘核であるポロニウム  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Po}$ 、ビスマス  $^{212}\text{Bi}$  から放出される異なるエネルギーの  $\alpha$  線が測定された。この結果よりラドンが連鎖的に  $\alpha$  崩壊を起こしていく様子が確認できる。

また、8 月には高エネルギー加速器研究機構で開催されたサマーチャレンジ演習課題として、「ラドン検出器の製作と測定」を題材に本検出器を用いた。ここでは約一週間をかけて、主に大学3年生が検出器と読み出し回路の製作、データ制御・解析ソフトウェアの開発を行う実習である。さらにそれを用いて様々な身近な試料を測定し、得られたデータから  $\alpha$  線のエネルギー半減期を考慮することで放射性元素の特定やラドン濃度の比較を行った。図 21 はサマーチャレンジの生徒が測定したポロニウム  $^{212}\text{Po}$  のピークの時間変化である。2015 年度も新たな改良を重ね実施する予定である。

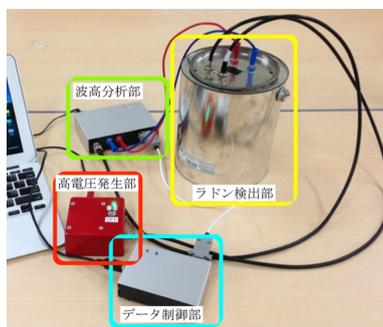


図 19: 本年開発のラドン検出器 (ver.10)

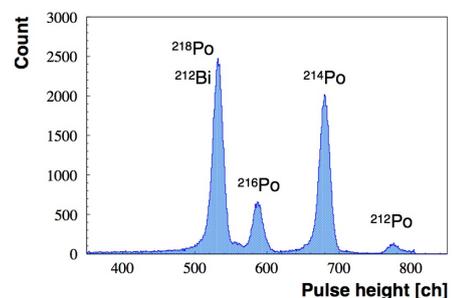


図 20:  $\alpha$  線のエネルギー分布

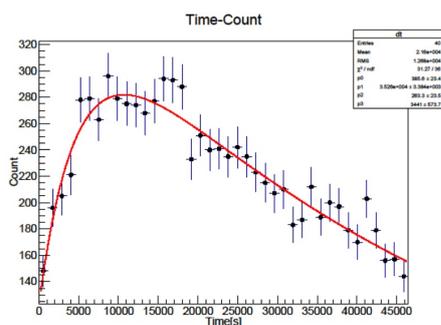


図 21: ポロニウム  $^{212}\text{Po}$  の積分値の時間変化

## 参考文献

- [1] T. Yamaguchi, *et al.*, Phys. Rev. **C** (2010) 014609.
- [2] 錦織 良, 筑波大学大学院平成 24 年度修士論文.
- [3] R. Guoxiao, *et al.*, Phys. Rev. **C** 39 (1989) 1351.
- [4] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1504.05168 Submitted to Phys. Rev. **C**
- [5] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 252301 (2011)
- [6] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1412.1038 (2014) Submitted to Phys. Rev. Lett.
- [7] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. **C** **86**, 064914 (2012)
- [8] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 132301 (2010)
- [9] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1405. 3940 (2014) Submitted to Phys. Rev. **C**.
- [10] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **109**, 122302 (2012)
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **114**, 192301 (2015)
- [12] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112**, 032302 (2014)
- [13] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 092301 (2014)
- [14] B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), arXiv:1411.4969 (nucl-ex)
- [15] X. Lu for the ALICE Collaboration, arXiv:1407.8387 (hep-ex)
- [16] O. Bourrion, STU manual, (2013).
- [17] R. Divi, ALICE Common Data Header specifications, ALICE Internal Note, (2014).
- [18] The ALICE FoCal Collaboration, Letter of Intent A Forward Calorimeter(FoCal) for the ALICE experiment, (2013).

## 原子核実験グループ研究業績リスト

### < 論文 >

1. “ Charge-changing cross sections of  $^{30}\text{Ne}$ ,  $^{32,33}\text{Na}$  with a proton target ” A. Ozawa, T. Moriguchi, T. Ohtsubo, N. Aoi, D. Q. Fang, N. Fukuda, M. Fukuda, H. Geissel, I. Hachiuma, N. Inabe, Y. Ishibashi, S. Ishimoto, Y. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, T. Kuboki, K. Kusaka, M. Lantz, Y. G. Ma, M. Mihara, Y. Miyashita, S. Momota, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, H. Ooishi, Y. Ohkuma, T. Ohnishi, M. Ohtake, K. Ogawa, Y. Shimbara, T. Suda, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, H. Takeda, K. Tanaka, R. Watanabe, M. Winkler, T. Yamaguchi, Y. Yanagisawa, Y. Yasuda, K. Yoshinaga, A. Yoshida, and K. Yoshida, *PHYSICAL REVIEW C* 89, 044602 (2014).
2. “ Density distribution of  $^{14}\text{Be}$  from reaction cross-section measurements ” T. Moriguchi, A. Ozawa, S. Ishimoto, Y. Abe, M. Fukuda, I. Hachiuma, Y. Ishibashi, Y. Ito, T. Kuboki, M. Lantz, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, T. Ohtsubo, H. Ooishi, T. Suda, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, K. Tanaka, T. Yamaguchi, *Nuclear Physics A* 929 (2014) 83–93.
3. “ Excited states above the proton threshold in  $^{26}\text{Si}$  ” T. Komatsubara, S. Kubono, T. Hayakawa, T. Shizuma, A. Ozawa, Y. Ito, Y. Ishibashi, T. Moriguchi, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Dam Nguyen Binh, A. A. Chen, J. Chen, K. Setoodehnia, and T. Kajino, *Eur. Phys. J. A* (2014) 50: 136
4. “ In-beam  $\gamma$ -ray Spectroscopy of  $^{30}\text{P}$  via the  $^{28}\text{Si}(^3\text{He}, p)^{30}\text{P}$  ” E. Mcneice, K. Setoodehnia, B. Singh, Y. Abe, D. N. Binh, A. A. Chen, J. Chen, S. Cherubini, S. Fukuoka, T. Hashimoto, T. Hayakawa, Y. Ishibashi, Y. Ito, D. Kahl, T. Komatsubara, S. Kubono, T. Moriguchi, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, A. Ozawa, T. Shizuma, H. Suzuki, H. Yamaguchi, T. Yuasa, *Nuclear Data Sheets*, 120, 88 (2014).
5. “ Evidence of halo structure in  $^{37}\text{Mg}$  observed via reaction cross sections and intruder orbitals beyond the island of inversion ” M. Takechi, S. Suzuki, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Ohtsubo, M. Nagashima, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, T. Moriguchi, H. Ohishi, T. Sumikama, H. Geissel, N. Aoi, Rui-Jiu Chen, De-Qing Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inabe, Y. Ishibashi, T. Itoh, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, M. Lantz, C. S. Lee, Yu-Gang Ma, K. Matsuta, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, M. Ohtake, T. Ogura, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, M. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler, Y. Yanagisawa, S. Watanabe, K. Minomo, S. Tagami, M. Shimada, M. Kimura, T. Matsumoto, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro, *PHYSICAL REVIEW C* 90, 061305(R) (2014).
6. “ Cherenkov light detection as a velocity selector for uranium fission products at intermediate energies ” T. Yamaguchi, A. Enomoto, J. Kouno, S. Yamaki, S. Matsunaga, F. Suzaki, T. Suzuki, Y. Abe, D. Nagae, S. Okada, A. Ozawa, Y. Saito, K. Sawahata, A. Kitagawa, S. Sato, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 766 (2014) 123–125
7. “ Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei  $^{23}\text{Al}$  and  $^{22}\text{Mg}$  ” Y. G. Ma, D. Q. Fang, X. Y. Sun, P. Zhou, Y. Togano, N. Aoi, H. Baba, X. Z. Cai, X. G.

- Cao, J. G. Chen, Y. Fu, W. Guo, Y. Hara, T. Honda, Z. G. Hu, K. Ieki, Y. Ishibashi, Y. Ito, N. Iwasa, S. Kanno, T. Kawabata, H. Kimura, Y. Kondo, K. Kurita, M. Kurokawa, T. Moriguchi, H. Murakami, H. Ooishi, K. Okada, S. Ota, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, R. Shioda, E. Takeshita, S. Takeuchi, W. D. Tian, H. W. Wang, J. S. Wang, M. Wang, K. Yamada, Y. Yamada, Y. Yasuda, K. Yoneda, G. Q. Zhang, T. Motobayashi. *Physics Letters B*, 743, 306-309 (2015).
8. " Measurement of backward secondary-electron yield under molecular ion impact coincident with emerging projectiles " S. Tomita, Y. Shiina, S. Tamura, R. Kinoshita, S. Ishii, K. Sasa, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, (2014), in press.
  9. " Vertical distribution and formation analysis of the  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ , and  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in the beach soil " Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, J. Kitagawa, S. Ikarashi, N. Kinoshita, *J Radioanal Nucl Chem*, 303, 2 (2015) 1197-1200.
  10. " Possible ferroelectricity in perovskite oxynitride  $\text{SrTaO}_2\text{N}$  epitaxial thin films " D. Oka, Y. Hirose, H. Kamisaka, T. Fukumura, K. Sasa, S. Ishii, H. Matsuzaki, Y. Sato, Y. Ikuhara, T. Hasegawa, *Scientific Reports*, 4, 4987 (2014).
  11. " Adequacy of a compartment model for CMRO2 quantitation using  $^{15}\text{O}$ -labeled oxygen and PET – A clearance measurement of  $^{15}\text{O}$ -radioactivity following intra-carotid bolus injection of  $^{15}\text{O}$ -labeled oxy-hemoglobin on *Macaca fascicularis* ", H. Iida, S. Iguchi, N. Teramoto, K. Koshino, T. Zeniya, A. Yamamoto, N. Kudomi, T. Moriguchi, Y. Hori, J. Enmi, H. Kawashima, N. J. Shah, J. Nakagawara, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 34, 1434-1439, 2014.
  12. " Quantification of myocardial blood flow using  $^{201}\text{Tl}$  SPECT and population based input function ", K. Koshino, K. Fukushima, M. Fukumoto, Y. Hori, T. Moriguchi, T. Zeniya, Y. Nishimura, K. Kiso, H. Iida, *Annals of Nuclear Medicine*, 28(9), 880-890, 2014.
  13. " Validity of using a 3-dimensional PET scanner during inhalation of  $^{15}\text{O}$ -labeled oxygen for quantitative assessment of regional metabolic rate of oxygen in man ", Y. Hori, Y. Hirano, K. Koshino, T. Moriguchi, S. Iguchi, A. Yamamoto, J. Enmi, H. Kawashima, T. Zeniya, N. Morita, J. Nakagawara, M. Casey, H. Iida, *Physics in Medicine and Biology*, 59, 5593-5609, 2014.
  14. " PET quantification of cerebral oxygen metabolism in small animals ", T. Temma, K. Koshino, T. Moriguchi, J. Enmi, H. Iida, *The Scientific World Journal*, 2014, 159103, 2014
  15. Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$ , PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), *Phys. Rev.* **D91** (2015) 3, 032001, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.032001
  16. Search for dark photons from neutral meson decays in p+p and d + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$ , PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), *Phys.Rev.* **C91** (2015) 3, 031901, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.031901

17. Cross section for  $b\bar{b}$  production via dielectrons in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys.Rev. **C91** (2015) 1, 014907, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014907
18. Low-mass vector-meson production at forward rapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys.Rev. **D90** (2014) 5, 052002, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.052002
19. Measurement of  $K_S^0$  and  $K^{0*}$  in p+p, d+Au, and Cu+Cu collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. **C90** (2014) 5, 054905, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.054905
20. Measurement of  $\Upsilon(1S + 2S + 3S)$  production in p+p and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys.Rev. **C91** (2015) 2, 024913, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.024913
21. Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. **D90** (2014) 1, 012007, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.012007
22. Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 22, 222301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.222301
23. Transverse-energy distributions at midrapidity in p+p, d+Au, and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 - 200$  GeV and implications for particle-production models, PHENIX Collaboration (S.S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. **C89** (2014) 4, 044905, DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044905
24. Measurement of transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  and 62.4 GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.). Phys. Rev. **D90** (2014) 1, 012006, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.012006
25. System-size dependence of open-heavy-flavor production in nucleus-nucleus collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. **C90** (2014) 3, 034903, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034903
26. Centrality categorization for  $R_{p(d)+A}$  in high-energy collisions, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys.Rev. **C90** (2014) 3, 034902, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034902
27. Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward and Backward Rapidity in d+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake, et al.), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 25, 252301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.252301

28. Two-pion femtoscopy in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, J. Adam, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. **C91** (2015) 034906, CERN-PH-EP-2015-019, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.034906
29. Production of inclusive  $\pi^0$  (1S) and  $\pi^0$  (2S) in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B740** (2015) 105-117, CERN-PH-EP-2014-196, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.11.041
30. Event-by-event mean pT fluctuations in pp and Pb-Pb collisions at the LHC, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys.J. **C74** (2014) 10, 3077, CERN-PH-EP-2014-169, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3077-y
31. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), J. Phys. **G41** (2014) 087002, CERN-LHCC-2013-024, ALICE-TDR-017, DOI: 10.1088/0954-3899/41/8/087002
32. Upgrade of the ALICE Experiment: Letter Of Intent, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), J. Phys. **G41** (2014) 087001, CERN-LHCC-2012-012, CERN-LHCC-I-022, ALICE-UG-001, DOI: 10.1088/0954-3899/41/8/087001
33. Exclusive  $J/\Psi$  photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 23, 232504, CERN-PH-EP-2014-149, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.232504
34. Multiplicity dependence of jet-like two-particle correlations in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B741** (2015) 38-50, CERN-PH-EP-2014-084, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.11.028
35. Production of  $\Sigma^\pm$  (1385) and  $\Xi$  (1530)0 in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys.J. **C75** (2015) 1, 1, CERN-PH-EP-2014-128, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3191-x
36. Multiparticle azimuthal correlations in p-Pb and Pb-Pb collisions at the CERN Large Hadron Collider, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. **C90** (2014) 5, 054901, CERN-PH-EP-2014-105, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.054901
37. Suppression of  $\pi^0$  (1S) at forward rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B738** (2014) 361-372, CERN-PH-EP-2014-103, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.10.001
38. Beauty production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV measured via semi-electronic decays, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B738** (2014) 97-108, CERN-PH-EP-2014-089, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.026
39. Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavor hadron decays in pp collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. **D91** (2015) 1, 012001, CERN-PH-EP-2014-097, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.012001

40. Suppression of  $\psi(2S)$  production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), JHEP **1412** (2014) 073, CERN-PH-EP-2014-092, DOI: 10.1007/JHEP12(2014)073
41. Neutral pion production at midrapidity in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys. J. **C74** (2014) 10, 3108, CERN-PH-EP-2014-091, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3108-8
42. Measurement of prompt D-meson production in p - Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 23, 232301, CERN-PH-EP-2014-090, CERN-PH-EP-2014-90, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.232301
43. Transverse momentum dependence of inclusive primary charged-particle production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys. J. **C74** (2014) 9, 3054, CERN-PH-EP-2014-088, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3054-5
44. Azimuthal anisotropy of D meson production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. **C90** (2014) 3, 034904, CERN-PH-EP-2014-083, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034904
45. Measurement of visible cross sections in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV in van der Meer scans with the ALICE detector B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), JINST **9** (2014) 11, P11003, CERN-PH-EP-2014-087, DOI: 10.1088/1748-0221/9/11/P11003
46. Freeze-out radii extracted from three-pion cumulants in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at the LHC, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B739** (2014) 139-151, CERN-PH-EP-2014-062, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.10.034
47.  $K^*(892)_0$  and  $\phi(1020)$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. **C91** (2015) 2, 024609, CERN-PH-EP-2014-060, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.024609
48. Measurement of quarkonium production at forward rapidity in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys. J. **C74** (2014) 8, 2974, CERN-PH-EP-2014-042, DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2974-4
49. Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Int. J. Mod. Phys. **A29** (2014) 1430044, CERN-PH-EP-2014-031, DOI: 10.1142/S0217751X14300440
50. Production of charged pions, kaons and protons at large transverse momenta in pp and Pb Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B. Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B736** (2014) 196-207, CERN-PH-EP-2013-230, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.07.011

51. Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of  $J/\psi$  suppression in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, B.Abelev, O. Busch, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. **B734** (2014) 314-327, CERN-PH-EP-2013-203, DOI: 10.1016/j.physletb.2014.05.064
52. Towards the heavy-ion program at J-PARC, H. Sako, T. Chujo, et al., Nucl. Phys. **A931** (2014) 1158-1162
53. Soft physics results from the PHENIX experiment, ShinIchi Esumi, PTEP **2015** (2015) 3, 03A104
54. Blast wave fits to elliptic flow data at  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 2760$  GeV, X. Sun, H. Masui, A. M. Poskanzer, and A. Schmah, Phys. Rev. **C 91**, 024903
55. Charged-to-neutral correlation at forward rapidity in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 91**, 034905
56.  $\Lambda\Lambda$  Correlation Function in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **114**, 022301
57. Measurement of Longitudinal Spin Asymmetries for Weak Boson Production in Polarized Proton-Proton Collisions at RHIC, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 072301
58. Observation of  $D^0$  Meson Nuclear Modifications in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 142301
59. Beam-Energy Dependence of Charge Separation along the Magnetic Field in Au+Au Collisions at RHIC, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 052302
60. Event-plane-dependent dihadron correlations with harmonic  $v_n$  subtraction in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, H. Agakishiev, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 89**, 041901(R)
61. Dielectron azimuthal anisotropy at mid-rapidity in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 90**, 064904
62. Beam Energy Dependence of Moments of the Net-Charge Multiplicity Distributions in Au+Au Collisions at RHIC, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 092301
63. Beam-Energy Dependence of the Directed Flow of Protons, Antiprotons, and Pions in Au+Au Collisions, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112**, 162301
64. Dielectron Mass Spectra from Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 022301; Erratum Phys. Rev. Lett. **113**, 049903 (2014)

65. Corrigendum to “ Suppression of  $\Upsilon$  production in d+Au and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Lett. **B 735** (2014) 127–137
66.  $J/\psi$  polarization in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV in STAR, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Lett. **B739** (2014) 180-188
67.  $J/\psi$  production at low  $p_T$  in Au+Au and Cu+Cu collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV with the STAR detector, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 90**, 024906
68. Measurement of charge multiplicity asymmetry correlations in high-energy nucleus-nucleus collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, L. Adamczyk, H. Masui, et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 89**, 044908

< 学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士 (理学)、水野三四郎 Measurements of Direct Photon Higher Order Azimuthal Anisotropy in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au + Au Collisions at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX 実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・金衝突での直接光子の高次方位角異方性の測定)

< 学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、沢畑 克樹、陽子過剰 Si、Ar 同位体の荷電変換断面積の測定
2. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、新井 郁也、超重元素の精密質量測定のためのイオンサーフィン型高周波イオンガイドガスセルの開発
3. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、泉 大希、PHITS を用いた AMS 測定条件の評価と宇宙線生成核種の測定
4. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、佐藤 航、LHC-ALICE 実験における超前方光子測定用電磁カロリメーター試作機のデータ収集系の構築と性能評価
5. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、野中俊宏、高時間分解能飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(多段型 MRPC) の開発 ; データ収集システムの構築と宇宙線による性能評価
6. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、細川律也、LHC-ALICE 実験 EMCAL/DCAL/PHOS 検出器によるジェット及び光子 LEVEL-1 トリガーの開発

< 招待講演 (国際会議) >

1. Akira Ozawa, Mass measurement with Rare-RI Ring Workshop ‘ Science and Next Generation Experiments at FRIB and RIBF ’ in 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 7-11, 2014, Waikoloa, Hawaii, US.
2. S. Esumi, ”Experimental results from RHIC” (plenary talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan

3. T. Chujo, "Experimental status of heavy-ion collisions at LHC" (plenary talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan
4. H. Masui, "Future perspectives of the ALICE experiment and detector upgrade" (plenary talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan
5. S. Esumi, "Study of Hot QCD matter at RHIC and LHC", mini-workshop "Future Directions in High Energy QCD", HAWAII 2014, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct 7-11, 2014, the Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island
6. H. Masui, "Beam Energy Scan at RHIC", mini-workshop "Quark Gluon Plasma and Future Directions in Heavy Ion Physics at RHIC and LHC", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct 7-11, 2014, the Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island
7. T. Todoroki, "Flow Measurements at the RHIC and LHC, What Have We Learned? What is Needed?", Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct 7-11, 2014, the Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island
8. T. Todoroki, "Recent measurements of azimuthal anisotropy  $v_n$  in heavy ion collisions" PDF, KMI Mini-Workshop 2014 "Fluctuations, collectivity and correlations at RHIC and LHC" October 23, 2014, Nagoya, Japan
9. T. Chujo, "The ALICE computing upgrade project and network in Asia", AFAD 2014, 6th Asian Forum for Accelerators and Detector, January 26, 2015, NSRRC, Taiwan
10. H. Masui, "Recent flow results at RHIC", GNR workshop, Flow and heavy flavour workshop in high energy heavy ion collisions, Incheon, Feb.24-26, 2015
11. H. Masui, "RHIC Beam Energy Scan", Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015, Symposium: QCD phase diagram and heavy ion collisions, Kyoto, Mar. 4, 2015

< 招待講演 (国内) >

1. 江角晋一, "Jet, flow and correlation in pA and dA" 第24回 Heavy Ion Cafe, 2014年4月19日 東京大学本郷キャンパス
2. 江角晋一, QM2014: 全体の包括、第25回 Heavy Ion Cafe 並びに第19回 Heavy Ion Pub 合同研究会 「QM2014 から探る QCD 物質の最前線」 2014年6月6日、名古屋大学 ES 総合館 6階
3. 水野三四郎、実験 低横運動量領域、第25回 Heavy Ion Cafe 並びに第19回 Heavy Ion Pub 合同研究会 「QM2014 から探る QCD 物質の最前線」 2014年6月6日、名古屋大学 ES 総合館 6階

4. T. Todoroki, "Event shape dependence of jet correlation at RHIC", 第 26 回 Heavy Ion Cafe, 2014 年 6 月 30 日、東京大学理学部 (本郷)
5. 中條 達也, "ALICE の forward 物理", ( PDF ), ハドロン散乱ゼロ度測定勉強会、2015 年 3 月 2 日、名古屋大学研究所共同館 5 階共通会議室
6. 江角晋一「クォーク核物質部門の研究」(基調講演), 第 1 回 CiRfSE ワークショップ, 2015 年 3 月 12 日~13 日, 筑波大学 総合研究棟 B 110、112
7. Oliver Busch「LHC-ALICE experiment and Jet physics」(宇宙史国際研究拠点講演), 第 1 回 CiRfSE ワークショップ, 2015 年 3 月 12 日~13 日, 筑波大学 総合研究棟 B 110、112
8. 江角晋一「pT 分布、Flow、2 体相関 (ridge 含む)、3 体相関」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」2015 年 3 月 25 日-3 月 27 日)(理化学研究所 和光)
9. 江角晋一「フロー (粒子相関) とゆらぎ」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」2015 年 3 月 25 日-3 月 27 日)(理化学研究所 和光)
10. 中條達也「前方の物理 (実験)」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」2015 年 3 月 25 日-3 月 27 日)(理化学研究所 和光)
11. 中條達也「ジェット of the 物理 (実験)」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」2015 年 3 月 25 日-3 月 27 日)(理化学研究所 和光)
12. 益井宙「Glauber、粒子多重度、中心度、揺らぎなど」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」2015 年 3 月 25 日-3 月 27 日)(理化学研究所 和光)

< 国際会議発表 >

1. Yasushi Abe, Isochronous field study of the Rare-RI Ring, STORF14 - 9th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings Schloss Rheinfels, St. Goar, Germany, September 28 - October 3, 2014.
2. K. Sasa, Distribution of  $^{129}\text{I}$  in terrestrial environment released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, The 13th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, Provence, France, 24-29 August 2014.
3. K. Sasa, The new 6MV AMS system at the University of Tsukuba, The 13th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, Provence, France, 24-29 August 2014.
4. T. Niida, "Azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the Event Plane in Au+Au collisions at PHENIX", WWND 2014, The 30th edition of the Winter Workshop on Dynamics, April 6-12, 2014, Galveston, Texas, USA.
5. S. Esumi, "Emission angle and particle mass dependence of HBT Interferometry in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ " (parallel talk), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany

6. H. Nakagomi, "Flow in Cu+Au collisions and unique tests of 3D medium evolution" (parallel talk), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany
7. S. Mizuno, "Centrality dependence of soft photon production and its collective flow in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV" (parallel talk), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany
8. S. Mizuno, "Direct photon collective flow in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV" (poster), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany
9. D. Watanabe, "Jet azimuthal distributions with high  $p_T$  neutral pion triggers in pp collisions from LHC-ALICE" (poster), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany
10. J. Bhom, "Multiplicity dependence of long and short-range two-particle correlation in  $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at LHC-ALICE experiment" (poster), Quark Matter 2014, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany
11. H. Masui, "LHC 8: Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE", 2014 Joint Workshop of the France-Japan (TYL/FJPPL) and France-Korea (FKPPL) Particle Physics Laboratories, May 26-28, 2014, Bordeaux, France
12. T. Chujo, "Calorimetry in ALICE at LHC", TIPP 2014, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, June 2-6, 2014, Amsterdam, the Netherlands
13. T. Todoroki "Two-particle correlation & HBT measurements in d+Au collisions at PHENIX" (talk), 2014 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 17-20, 2014 BNL, USA
14. T. Niida "Azimuthal Angle Dependence of HBT Interferometry with respect to Event Planes in Au+Au collisions at PHENIX" (poster) 2014 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 17-20, 2014 BNL, USA
15. T. Todoroki "Measurements of Two-Particle Correlations with respect to Higher-Order Event-Planes in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX" (poster) 2014 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 17-20, 2014 BNL, USA
16. S. Mizuno, "Measurement of direct photon collective flow in Au+Au  $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV collisions at RHIC-PHENIX experiment" (parallel talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan
17. D. Watanabe, "Jet azimuthal distributions with high  $p_T$  neutral pion triggers in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV from LHC-ALICE" (parallel talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan

18. H. Nakagomi, "Charged hadron flow in Cu+Au collisions at RHIC-PHENIX" (parallel talk), ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference, Aug 5-8, 2014, Osaka, Japan
19. T. Niida, "Event geometrical anisotropy and fluctuation viewed by HBT interferometry ", WPCF 2014, The Xth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Aug 25-29, 2014, Karoly Robert College in Gyongyos, Hungary
20. S. Mizuno, "Measurement of direct photon 3rd order azimuthal anisotropy in AuAu collisions ", WPCF 2014, The Xth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Aug 25-29, 2014, Karoly Robert College in Gyongyos, Hungary
21. T. Niida, "Final source eccentricity measured by HBT interferometry with the event shape selection", Hot Quarks 2014, Las Negras, Spain, Sep.21-28, 2014
22. H. Masui, "Azimuthal Anisotropy for Multi-strange Hadrons as Penetrating Probe in High-Energy Heavy-Ion Collisions at RHIC", High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, Sep 22-26, 2014, CCNU, Wuhan, China
23. S. Mizuno, "Measurement of Direct Photon Azimuthal Anisotropy in Au+Au 200 GeV Collisions at RHIC-PHENIX Experiment" High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, Sep 22-26, 2014, CCNU, Wuhan, China
24. N. Tanaka, "Azimuthal Sensitive HBT in Pb+Pb 2.76 TeV Collisions at LHC-ALICE Experiment", High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, Sep 22-26, 2014, CCNU, Wuhan, China
25. Sanshiro Mizuno, "Measurement of direct photon collective flow in  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  AuAu collisions at RHIC-PHENIX experiment", TGSW 2014, Tsukuba Global Science Week 2014, 2014年9月28日 - 30日、筑波大学大学会館
26. Daisuke Watanabe, "Jet azimuthal distributions with high pT neutral pion triggers in pp collisions  $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$  from LHC-ALICE", TGSW 2014, Tsukuba Global Science Week 2014, 2014年9月28日 - 30日、筑波大学大学会館
27. T. Chujo, "Forward Calorimetry in ALICE at LHC ", HAWAII 2014, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct 7-11, 2014, the Hilton Waikoloa Village on Hawaii 's Big Island
28. T. Chujo, "A Japanese perspective", at "RHIC & AGS Users ' Group Open Forum Meeting ", HAWAII 2014, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct 7-11, 2014, the Hilton Waikoloa Village on Hawaii 's Big Island
29. T. Chujo, "Path length dependence of jet quenching and how to measure medium response using jets in Run-2", Workshop on ideas and possibilities for future jet analyses, Oct 20-22, 2014, CERN
30. T. Kobayashi, "Di-jets with soft particles in PbPb ", Workshop on ideas and possibilities for future jet analyses, Oct 20-22, 2014, CERN

31. N. Tanaka, "Azimuthally sensitive HBT with respect to jet axis in PbPb ", Workshop on ideas and possibilities for future jet analyses, Oct 20-22, 2014, CERN
32. D. Watanabe, " $\pi^0$ -jet measurements ", Workshop on ideas and possibilities for future jet analyses, Oct 20-22, 2014, CERN
33. H. Yokoyama and R. Hosokawa "DCAL triggers ", Workshop on ideas and possibilities for future jet analyses, Oct 20-22, 2014, CERN
34. T. Chujo, "Introduction to France-Japan collaboration ", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
35. D. Watanabe "pi0-hadron/jet correlations ", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
36. H. Yokoyama, "Implementation of triggers for Run2, new approaches ", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
37. R. Hosokawa, "Trigger simulation ", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
38. T. Kobayashi, "Hadron production from jets", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
39. N. Tanaka, "HBT and jets", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
40. T. Chujo, "Forward Calorimeter: Physics ", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France
41. W. Sato, "Forward Calorimeter: Detector", France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, Mar 14-15, 2015, VVF Villages, Sainte-Maxime, France

< 日本物理学会発表 >

1. 沢畑克樹、300 MeV/u の陽子過剰 Si、Cl、Ar における荷電移行反応の測定、第 70 回日本物理学会年次大会、2015、3/21-25、早稲田大学
2. 中條 達也 "LHC-ALICE 実験でのコンピューティング (Computing in LHC-ALICE)、75GB/s 生データに挑戦！次世代 LHC 重イオン衝突実験におけるパイラインデータ処理と世界分散計算機網", シンポジウム「実験のための最先端コンピューティング」, 日本物理学会 第 70 回年次大会 ( 2 0 1 5 ) 早稲田大学 早稲田キャンパス、2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日
3. 横山広樹 "Development of EMCALs' Trigger System in LHC-ALICE" (一般講演)、日本物理学会 第 70 回年次大会 ( 2 0 1 5 ) 早稲田大学 早稲田キャンパス、2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日
4. 細川律也 "LHC-Run2 における ALICE・電磁カロリメータ検出器群を用いたジェット事象トリガーのシミュレーションによる評価" (一般講演)、日本物理学会 第 70 回年次大会 ( 2 0 1 5 ) 早稲田大学 早稲田キャンパス、2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日

5. 佐藤航 ”LHC-ALICE 実験における超前方光子測定用カロリメータ試作機のデータ収集系の構築と性能評価” (一般講演)、日本物理学会 第70回年次大会(2015)、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月21日~24日
6. 野中俊宏 ”高時間分解能飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(多段型MRPC)の開発;PSI-DRS4を用いたデータ収集システムの構築 と宇宙線による性能評価” (一般講演)、日本物理学会 第70回年次大会(2015)、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月21日~24日

< 国内学会発表 >

1. 小沢顕、RI ビーム飛行時間検出器の開発、H25年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2014、4/21-22、ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan
2. 小沢顕、固体水素標的を用いた陽子ドリップライン近傍核生成法の開発、H25年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2014、4/21-22、ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan
3. 笹公和、最終退氷期から完新世初期にかけての南極氷床コア中の宇宙線生成核種  $^{36}\text{Cl}/^{10}\text{Be}$  比、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 28 日 (月) ~ 5 月 2 日 (金)、神奈川県 パシフィコ横浜.
4. 笹公和、福島第一原発事故により放出された  $^{129}\text{I}$  の分布と  $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  比の評価、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 28 日 (月) ~ 5 月 2 日 (金)、神奈川県 パシフィコ横浜.
5. 笹公和、筑波大学 6 MV タンデム加速器の導入状況と研究計画、第 27 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、京都、2014.7.4-5.
6. 笹公和、福島第一原子力発電所事故起源  $\text{I-}^{129}$  の陸域環境での移行と分布、日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都、2014.9.8-10.
7. 笹公和、福島第一原発事故により放出された  $^{129}\text{I}$  の陸域環境での分布、福島原発由来の放射性核種の環境動態に関する分野横断シンポジウム、つくば、2015.1.9-10.
8. 泉大希、PHITS を用いた  $^{36}\text{Cl}$ -AMS 測定条件の評価と宇宙線生成核種の測定、第 17 回 AMS シンポジウム、2015 年 3 月 2 日 (月) ~ 3 日 (火)、筑波大学 大学会館国際会議室.
9. Sanshiro Mizuno (Univ.Tsukuba) 「Direct photon in PHENIX」(Mini-workshop on high-temperature and high-density quark nuclear matter at J-parc, RHIC and LHC energies), 第 1 回 CiRFSE ワークショップ、2015 年 3 月 12 日 ~ 13 日、筑波大学 総合研究棟 B 110、112
10. Hiroki Yamamoto (Univ.Tsukuba) 「pp correlations in ALICE」(Mini-workshop on high-temperature and high-density quark nuclear matter at J-parc, RHIC and LHC energies), 第 1 回 CiRFSE ワークショップ、2015 年 3 月 12 日 ~ 13 日、筑波大学 総合研究棟 B 110、112
11. Daisuke Watanabe (Univ.Tsukuba) 「 $\pi^0$ -jet analysis in ALICE」(Mini-workshop on high-temperature and high-density quark nuclear matter at J-parc, RHIC and LHC energies), 第 1 回 CiRFSE ワークショップ、2015 年 3 月 12 日 ~ 13 日、筑波大学 総合研究棟 B 110、112

< 科学研究費取得状況 >

1. 挑戦的萌芽研究「不安定核電気双極子モーメント測定への挑戦」、研究期間：2014-2015年度、研究代表者：小沢顕、研究経費（2014年度）：2,200千円
2. 基盤研究(B)「蓄積された多価イオン状態の不安定核ベータ崩壊と宇宙元素合成の環境」、研究機関：2014-2016年度、研究代表者：山口貴之、研究分担者：長江大輔、研究経費（分担額：2014年度）：直接経費 2,000千円
3. 基盤研究(A)「加速器質量分析法を用いた人為起源の長寿命放射性核種分析による環境影響評価」、研究期間：2012 - 2015年度、研究代表者：笹公和、研究経費（2014年度）：9,620千円（直接経費：7400千円, 間接経費：2220千円）
4. 挑戦的萌芽研究「炭素 14 マッピング直接測定を目指したレーザーアブレーション加速器質量分析法の開発」、研究期間：2014 - 2016年度、研究代表者：笹公和、研究経費（2014年度）：2,080千円（直接経費：1600千円, 間接経費：480千円）
5. 新学術領域研究（研究領域提案型）「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」「水・土砂移動に伴う放射性物質の移行過程の理解」、研究期間：2012 - 2016年度、研究代表者：恩田 裕一、研究分担者：笹 公和研究経費（分担額：2014年度）：直接経費 4,000千円
6. 基盤研究(C)「M - t y p e花崗岩の熱水流体の組成と挙動」、研究期間：2012 - 2014年度、研究代表者：黒澤正紀、研究分担者：笹 公和、研究経費（分担額：2014年度）：直接経費 50千円
7. 若手研究(B)「脳虚血性病態理解のための非侵襲的小動物 O-15 ガス PET 検査システムの構築」、研究期間：2013 - 2015年度、研究代表者：森口哲朗、研究経費（2014年度）：650千円
8. 基盤研究(B)「粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索」、研究期間：H 2 5年度～H 2 8年度、研究経費（H 2 6年度）：直接経費 2,300千円、間接経費 690千円、研究代表者：三明康郎、研究分担者：江角晋一、中條達也
9. 基盤研究(B)「LHC-ALCE 実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発」、研究期間：H 2 5年度～H 2 7年度、研究経費（H 2 6年度）：直接経費 6,100千円、間接経費 1,260千円、研究代表者：中條達也、研究分担者：三明康郎、杉立徹、稲葉基
10. 基盤研究(S)「クォーク物性を解き明かす ALICE 実験フォトン物理の新展開」、研究期間：H 2 6年度～H 3 0年度、研究経費（H 2 7年度・分担金）：直接経費 3,500千円研究代表者：杉立徹、研究分担者：中條 達也
11. 新学術領域研究（公募研究）「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」「高温高密度クォーク物質の QCD 臨界点探査」、研究期間：H 2 5年度～H 2 6年度、研究経費（H 2 6年度）：直接経費：1,400千円, 間接経費：420千円研究代表者：江角晋一
12. 日米科学技術協力事業「RHIC における高エネルギー重イオン衝突実験（PHENIX）」、研究期間：H 2 6年度、研究経費（H 2 6年度）：18,700千円、研究代表者：江角晋一

< 外部資金取得状況 >

1. JST/CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」平成23年度採択課題「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」代表 東京大学 沖 大幹、CREST 移流拡散チーム 末木グループ 研究代表者 末木啓介、研究分担 笹 公和、恩田裕一、研究者分担金 笹 公和 2014年度: 300千円
2. 筑波大学・KEK 連携事業「物質 量子ビーム融合領域」素粒子原子核分野 (原子核、加速器分野) 小沢 顕、中條達也、笹 公和 300千円 (2014年度)
3. 日本学術振興会 二国間交流事業・共同研究 (フランス (CNRS) との共同研究)「電磁カロリメータ検出器によるクォーク・グルーオンプラズマ超高温相の物性研究」、研究期間: H 25年度~H 26年度、研究経費 (H 26年度): 2,500千円、研究代表者: 中條達也
4. The France-Japan (TYL, 日仏素粒子物理学研究所 (FJPPL))、「Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE」、研究期間: 2014年度~2017年度、研究経費 (2014年度): 4,000ユーロ (フランス研究機関のみ) 研究代表者: 中條達也 (日本代表)、Y. Schutz (仏代表)

#### < 学内プロジェクト >

1. 研究基盤支援プログラム (Aタイプ)「r-過程第3ピーク起源解明に向けた系統的研究」代表: 小沢顕、279千円
2. 平成26年度筑波大学・ドイツ学術交流会 (DAAD) パートナーシップ・プログラム (筑波-DAAD 共同研究プログラム)「量子ビームを用いた高効率太陽電池の研究 (Studies of high-efficiency solar cells using quantum beams)」, 2014年4月1日~2016年3月31日、代表 上殿明良、分担 秋本克洋、櫻井岳暁、笹公和、平成26年度 1,214千円、平成27年度 589千円

#### < 研究会開催 >

1. "Quark Gluon Plasma and Future Directions in Heavy Ion Physics at RHIC and LHC", (Hawaii 2014, half-day workshop)、実施期間: 2014年10月 7日、実施場所: the Hilton Waikoloa Village on Hawaii 's Big Island, Hawaii, USA 主催者: Tatsuya Chujo, David Morrison, Soren P. Sorensen  
会議 Web ページ:  
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=761>
2. チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理: 基礎から最先端まで」、実施期間: 2015年3月25日~3月27日、実施場所: 理化学研究所 (和光市) 主催者: 浅川正之 (大阪大学)、板倉数記 (KEK、理論側取りまとめ)、小沢恭一郎 (KEK)、北沢正清 (大阪大学)、郡司卓 (東大 CNS)、志垣賢太 (広島大学)、中條達也 (筑波大、実験側取りまとめ)、野中千穂 (名古屋大学)、初田哲男 (理研)、浜垣秀樹 (東大 CNS)、日高義将 (理研)、平野哲文 (上智大)、福嶋健二 (東大理)、藤井宏次 (東大総)、松井哲男 (東大総)  
参加者: 107名会議 Web ページ:  
<http://indico.cns.s.u-tokyo.ac.jp/conferenceTimeTable.py?confId=198>

3. France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment、実施期間：2015年3月14日～17日、実施場所：VVF Villages "Sainte-Maxime" 64 chemin de la Vierge Noire 83120 Sainte-Maxime, France、参加者：日本 16名、フランス 12名、その他 4名、合計 32名、主催者：T. Chujo, Y. Schutz, G. Balbastre Conesa, R. Guernane、会議 Web ページ: <https://indico.cern.ch/event/368175/>

## VII-1. 非平衡統計物理グループ

教授  
助教

有光 敏彦 (2015年3月退職)  
吉田 恭

### 【1】非平衡統計物理

#### (1) 古典場の系の典型性 (吉田) 論文 [1], 講演 [5]

標準的な統計力学において、マクロな熱平衡状態はミクロな状態のアンサンブルで記述される。近年、典型性の概念を用いてこのアンサンブル描像の基礎付けが試みられている。アンサンブル内の殆ど全ての状態 (典型的状態と呼ばれる) において、注目すべき物理量 (状態の関数) が殆ど同じ値を持てば、アンサンブル平均または時間平均をとらずとも個々の典型的状態が熱平衡状態に対応している、という議論である。

本研究では、古典系での典型性を、特に自由度が空間座標でラベルされる古典場の系の場合で考察した。全自由度数を有限とするため、系のサイズは有限かつ空間座標は離散化されているとする。系の状態は場のフーリエ変換  $q_\ell(k)$  の値を可能な  $k, \ell$  全てについて決めることで指定され、その値の組を  $\{q\}$  と表す。ただし  $k$  は波数ベクトルで  $\ell$  は波数ベクトル以外の自由度を指定する添字である。簡単のためハミルトニアンは  $\{q\}$  の 2 次、調和振動子型で表せるものとする。このとき、状態の関数  $F(\{q\})$  が場の空間並進に対して不変であり、かついくつかの補助的条件を充たすならば、ミクロカノニカルアンサンブル内の殆ど全ての状態 (典型的状態)  $\{q\}$  について  $F(\{q\})$  がミクロカノニカル平均  $\langle F \rangle$  と等しいことが示された。

更に、上記条件を満たす状態の関数でエントロピーに対応するもの  $S(\{q\})$  を構築した。つまり、ミクロカノニカルアンサンブル内の個々の典型的状態  $\{q\}$  について  $S(\{q\})$  の値がそのミクロアンサンブル平均  $\langle S \rangle$  とほぼ一致しかつ通常のエントロピーの定義 (エネルギー値  $E$  のミクロカノニカルアンサンブルの位相空間体積の対数)  $S_{MC}(E)$  の値ともほぼ一致するような状態の関数  $S(\{q\})$  を定義した。

#### (2) 自己重力流体乱流の統計法則 (吉田) 講演 [1, 3]

宇宙空間の十分大スケールにおける質量分布の力学は、重力相互作用が支配的となり、連続体近似を行えば、自己重力流体系でモデル化される。一方で、水や空気など非圧縮性 Navier-Stokes (NS) 方程式に従う流体の乱流状態では、運動エネルギーが大きいスケールから小さいスケールに順次輸送されるエネルギーカスケード現象およびその状況下でのエネルギースペクトルの波数べき則 (Kolmogorov スペクトル) が知られている。

本研究では、自己重力流体の乱流状態でのエネルギーカスケードの可能性を考察した。そのために、NS に従う乱流においてエネルギーカスケードと Kolmogorov スペクトルを定量的に導くことに成功している Lagrange 完結近似の手法を、自己重力流体乱流に適用した。非圧縮性流体と異なり自己重力流体では、密度揺らぎが存在し、運動エネルギーの他にポテンシャルエネルギーが存在し、また運動エネルギーには揺らぎの 3 次の項が存在する。これらを適切に処理し、簡単な状況下での、エネルギーカスケードが実現した場合の密度揺らぎ相関スペクトルのべき則を求めた。

#### (3) 量子流体乱流の統計法則 (吉田) 講演 [2]

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体の流動などの量子流体の運動は、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP) 方程式により支配される。量子流体は、循環が量子化された渦糸が存在するなど、Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。

本研究では、GP 方程式に完結近似の解析手法を適用した。式を閉じる代表変数として GP 方程式の基本的場の量である秩序変数  $\psi$  の 2 点相関関数および応答関数を選び、その完結近似方程式を導いた。GP 方程式では運動エネルギーと相互作用エネルギーを合わせた全エネルギーおよび粒子数が保存量である。強乱流状態でその双方それぞれがカスケードする場合のエネルギースペクトルのべき則を求めた。特にエネルギーカスケードの場合エネルギースペクトルは  $k^{-2}$  則、ただし  $k$  は波数、である。この結果の数値シミュレーションによる定量的な検証などは今後の課題である。

## 【2】散逸場の量子論、量子情報物理

(1) 多分岐によるエラー耐性の高い RRDPS 量子鍵配送 (酒井 (院生), 都倉, 吉田) 講演 [4]

暗号鍵を第三者に盗聴されることなく配送することを可能にする量子鍵配送 (QKD) について、最近安全性の確保に攪乱の監視を行わない新しいプロトコル、差動位相シフト量子鍵配送 (RRDPS-QKD) が提案された。

本研究では、このプロトコルの光子パルスをもつ分岐するところを多分岐にしてエラー耐性を向上させることを検討した。また、元の 2 分岐プロトコルで光子パルスを分岐させるところで散逸が入った場合の効果を調べた。

### < 論文 >

[1] Kyo Yoshida: “Typicality and Statewise Entropy for Classical Field Systems”, *submitted*.

### < 講演 >

[1] 吉田恭, 「自己重力流体乱流のエネルギーカスケード」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 9 日, 中部大学春日井キャンパス, 春日井.

[2] (招待講演) Kyo Yoshida, “Spectrum in Gross-Pitaevskii turbulence”, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulation, 2014 年 12 月 11 日, 名古屋大学, 名古屋.

[3] 吉田恭, 「自己重力流体乱流のエネルギーカスケード」, 第 27 回理論懇シンポジウム, ポスター発表, 2014 年 12 月 25,26 日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹.

[4] 酒井一樹, 吉田恭, 都倉康弘, 「多分岐によるエラー耐性の高いラウンドロビン DPS-QKD」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京.

[5] 吉田恭, 「古典場の系の典型性」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京.

### < 社会貢献等 >

[1] 吉田 恭, 「流体力学」, 茗溪学園コア SSH AP サイエンス学習会, 2014 年 9 月 28 日, 茗溪学園, つくば.

## VII-2. 量子物性理論

教授：初貝 安弘

助教：苅宿 俊風

大学院生：2名(博士0名、修士2名)

卒論学生：2名

### 1 トポロジカル相の理論とバルク・エッジ対応

ランダウ理論以来、自発的対称性の破れ概念に基づき、具体的には秩序変数を用いた相の理論は物性物理学において大きな成功をあげてきたが、近年、量子ホール相など対称性の破れを伴わない多くの量子液体相、スピン液体相の発見に伴い、異なる観点から物質相を理解しようとする試みがなされている。これがいわゆるトポロジカル相の理論である。この立場に立つとき、多くのトポロジカルに非自明な相は、Berry位相や Chern 数と呼ばれる一連のバルクのトポロジカルな量で特徴づけられるが、そのほとんどは古典的な観測量とならず、これらの直接の実験的な観測は困難である。その一方、トポロジカル相においては、バルクの非自明な特徴は系に境界や不純物等幾何学的な外乱があるときに生まれる局在状態に反映されると考えられており、これらの局在状態は一般にエッジ状態と称され、非自明なバルクの特徴とエッジ状態の存在の相互関係は一般的に「バルク・エッジ対応」とよばれ、トポロジカル相における一つの指導原理となっている。

本年度は、これらトポロジカル相に関する一般的な理論として「エンタングルメントチャーン数」なる新しいトポロジカル量を提案しその有効性を示すと共に「バルク・エッジ対応」の具体的な有効性を幾つかの系にて確立した。更にグラフェン等に磁場を印加した系におけるいわゆる Streda の分極が新しいトポロジカル数であることを具体的な系に対して示した。以下、各項目に関して、そのハイライトを図示する。

#### 1.1 ベリー位相の分数量子化とエッジ状態

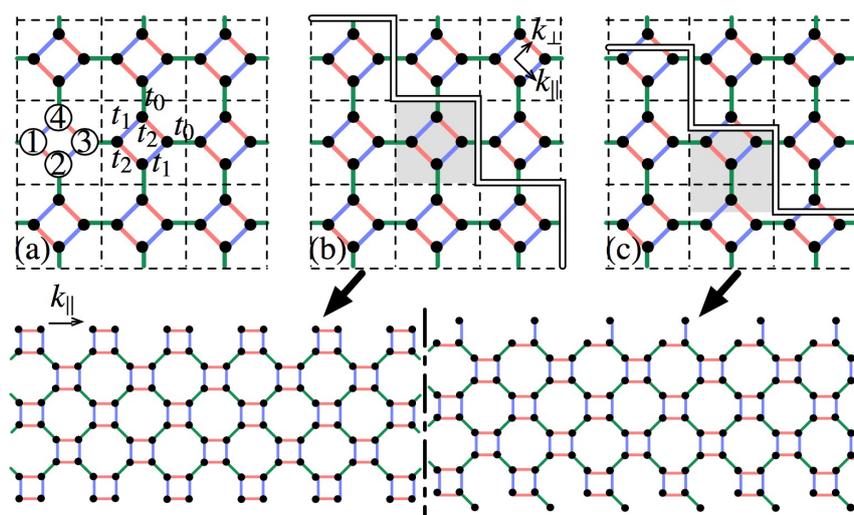


図 1: ベリー位相の分数量子化と対応する 2次元系の境界 [論文 6]

シリンダー状の2次元系を境界に平行な方向の波数に分解した1次元系の和として考えた時、シリンダー境界に存在するエッジ状態の存在は境界のない周期的な1次元系におけるBerry位相（Zak位相）と深く関連する。特に系がカイラル対称性等、高い対称性をもつとき、Berry位相は量子化し、断熱不変量となりトポロジカルな秩序変数となる。グラフェン等よく知られたカイラル対称性の場合、量子化するBerry位相は0または $\pi$ となるが、本論文では分数量子化と呼ぶべき $\pm\pi/2$ に量子化するBerry位相をもつ系を考察し、その系におけるエッジ状態との関連を明らかとすることで分数量子化するBerry位相を用いた「バルク・エッジ対応」の有効性をはじめて示した [図 1, 論文 6]。

## 1.2 弱いトポロジカル相における量子化ベリー位相とエッジ状態

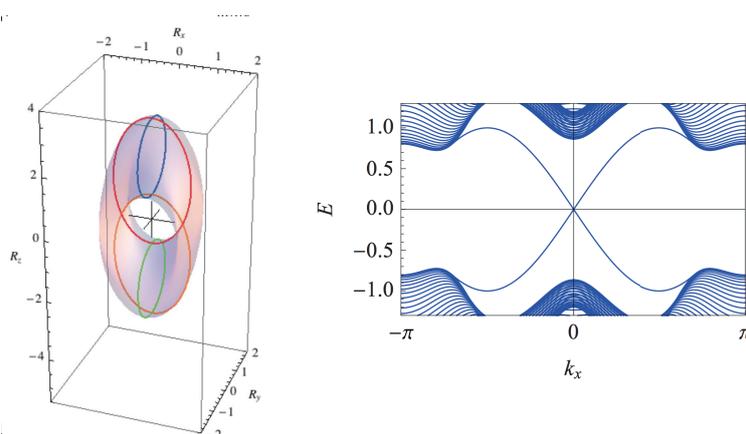


図 2: 弱いトポロジカル相のベリー位相の幾何学的表示とエッジ状態の分散の例 [論文 5]

トポロジカル相の理論でもっとも基本的なモデルとして2バンド系があるが、この系ではハミルトニアンは、パウリ行列で展開した際の係数が作る3次元空間内の一点と同一視できる。この対応を用いると系のChern数はある種の閉曲面が原点を囲む被覆次数であたえられ、Berry位相は原点周りの立体角から定まる。本年度は、特にある弱いトポロジカル相のモデルに関して、このBerry位相の幾何学的表示を用いてバルクのBerry位相を確定し対応するエッジ状態の関係を確定し、弱いトポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の意義を確立した [図 2, 論文 5]。

## 1.3 エンタングルメントチャーン数の提案

量子スピンホール相としての2次元トポロジカル絶縁体とは、スピンの磁場を反転点することにより、全系の時間反転対称性を回復した量子ホール系と見なすことができる。ただし、その“有効”磁場はスピン軌道相互作用に起因し、一般にはスピンは保存量とならないため量子ホール相2層として個別に議論することはできない。更に系の時間反転対称性の拘束からクラマース縮退に起因しBerry接続は消失するため、量子ホール相にて相分類に有効であったChern数も常にゼロとなり相分類には使えない。

しかし、この系においても、いわゆる extensive partition とよぶ系の分割を用いてスピンに対して非対称な部分系をトレースアウトすることでエンタングルメントハミルトニアンを構成すると量子スピンホール相においても有限のChern数が得られる。我々は、これをエンタングルメントChern数とよび、そのトポロジカル絶縁体における相分類における有効性を確認した [図 3, 論文 4]。

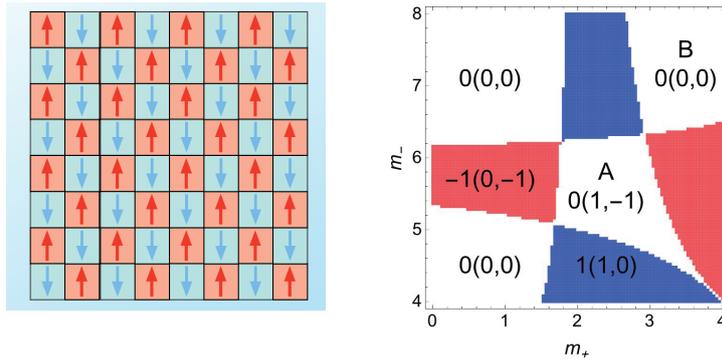


図 3: 弱いトポロジカル相におけるエンタングルメントチャーン数 [論文 4]

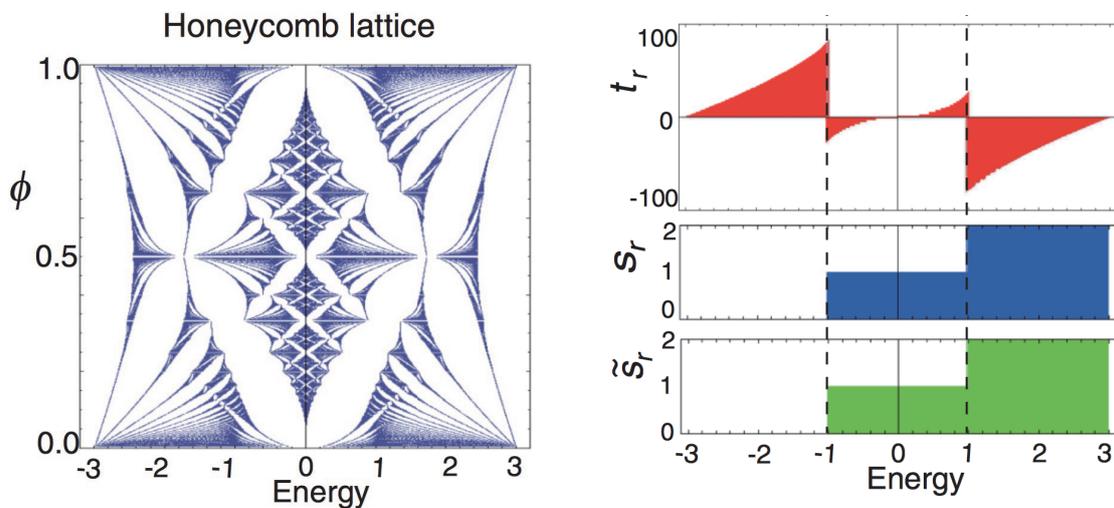


図 4: グラフェンの磁場-一粒子エネルギー図 (Hofstadter の蝶) と一連のトポロジカル数 [論文 7]

#### 1.4 グラフェンならびに Hofstadter 系におけるトポロジカル数としての分極

Hofstadter 系ならびにグラフェン等磁場中の周期系におけるホール伝導度は  $e^2/h$  を単位に TKNN 数とよばれ、トポロジカル相における Chern 数のもっとも典型的な例としてよく知られている。この系においてもいわゆる Streda の分極を格子あたりの磁束が磁束単位あたり有理数近傍において準古典近似として考察するとフェルミエネルギーを変化させても不変の位相不変量となることを具体的な模型で示した。この新しい位相不変量は磁場のない時の状態密度のファンホープ特異点をフェルミエネルギーが過ぎるときのみ変化する。すなわち特異性なしに変化できないトポロジカルな不変量である。

## 2 特異分散の理論

### 2.1 傾いたディラック電子系のランダウ準位の一般論

量子力学の von Neumann-Wigner の定理によれば、典型的な特異分散である 2 次元のグラフェンの Dirac cone 等のゼロギャップ半導体は、一般的な立場からは偶然には存在せず、カイラル対称性や時間反転 + 空間反転等、何か対称性等による拘束下においてのみ存在し得る。この立場からは波数-エネルギーの分散である Dirac cone は一般には垂直な円錐でなく、傾いたものとなる (図 5)。本年度は、この傾いた Dirac cone

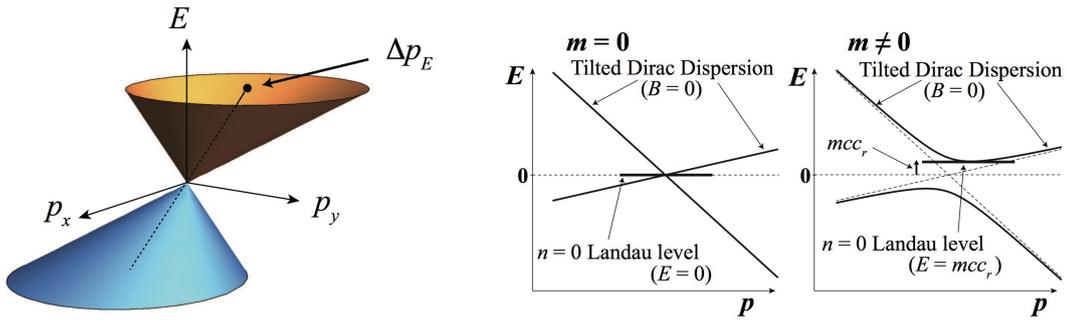


図 5: 傾いた Dirac cone (左) と  $n = 0$  のランダウ準位の位置 (右) [論文 1]

を一般的な立場から議論し、そこで現れる一般化されたカイラル対称性について詳述した ([論文 1])。特に磁場効果としての傾いた Dirac cone が作るランダウ準位構造に対して、Dirac cone が質量をもつ場合を含めた統一的な記述も与えた。

## 2.2 平坦バンドの一般論とシリセンの電子状態

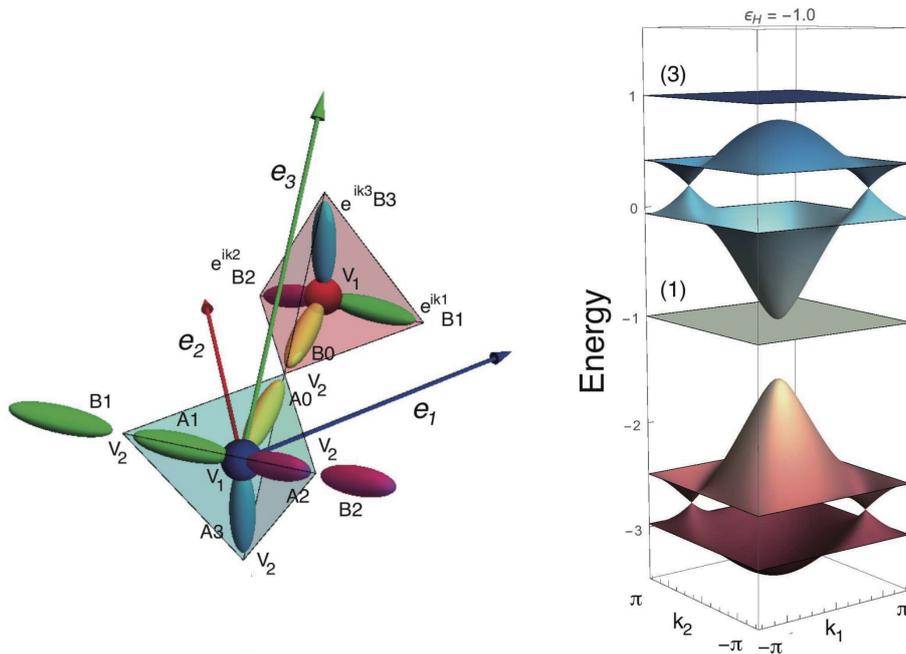


図 6: シリセンの基本格子 (左) と WT 型のシリセンの模型の平坦バンドを含むエネルギー分散 (右) [論文 2]

グラフェンは炭素原子がハニカム格子を作ったものであるが、そのシリコン類似物質であるシリセンは同様にシリコン原子がハニカム構造をとる。ただし、グラフェンは炭素原子が  $sp^2$  型の混成軌道を取り平面状の結合を作る一方結合平面に垂直な  $\pi$  電子が系全体に遍歴的に拡がり、伝導を担うのに対し、シリセン中のシリコン原子は  $sp^3$  型の混成軌道を取り、その構造も単一平面上になく、ハニカム格子上的隣接原子が面

に垂直方向に出入りしたいいわゆるバックリング構造をとる。よって、系の伝導を考察する際グラフェンでは  $\pi$  電子による単一軌道モデルでほぼ十分であるのに対し、シリセンではその多軌道性が本質的に重要となる。本研究ではもっとも単純化された多軌道モデルである 3 次元の Wear-Thorpe モデルをシリセンに変形し適用することでシリセンの全エネルギーバンド構造を定性的な理解を与えた。その際、初貝等が過去に与えた平坦バンドの一般論を適用することで、このシリセンのモデルにおいても平坦バンドの存在を一般的な観点から示した [論文 2]。平坦バンドは Dirac cone 等、ギャップレス点とともに特異分散の典型例である。物理的に一般の平坦バンドは実空間で局在した分子軌道から全電子系を構成したとき、一般にはこれらの分子軌道は非直交となり、これが遍歴性の起源となるが、分子軌道の総数に対してその非直交性が十分に存在しないとき電子系は分散を持ち得ず、平坦バンドが生まれることとなる。これはシリセンにおいてもその  $sp^3$  性により、系の遍歴性は弱く、局所的な摂動（電子相関、格子変形）等により対称性が破れる可能性を示唆する。これは実際のシリセンにおいては、理想的なハニカム構造とそれに付随する Dirac cone は実現しにくく、実験的に観測されている多くの構造においては長周期構造等対称性の破れをとともなうことと整合的である [論文 2]。

## < 論文 >

1. Y. Hatsugai, T. Kawarabayashi and H. Aoki, "Survival of sharp  $n=0$  Landau levels in massive tilted Dirac fermions: Role of the generalized chiral operator", Phys. Rev. **B91**, 085112(12) (2015), doi:10.1103/PhysRevB.91.085112
2. Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki, "Flat bands in the Weaire-Thorpe model and silicene", New J. Phys. **17**, 025009(17) (2015), doi:10.1088/1367-2630/17/2/025009
3. K. Shiraishi and Y. Hatsugai, "Electronic Structure of Silicene with Dirac Fermion and Recipe for Its Synthesis", Journal of the Vacuum Society of Japan, **57**, 423-427 (2014), doi:10.3131/jvsj2.57.423
4. T. Fukui and Y. Hatsugai, "Entanglement Chern Number for an Extensive Partition of a Topological Ground State", J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 113705(4) (2014), doi:10.7566/JPSJ.83.113705
5. Y. Yoshimura, K.-I. Imura, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Characterizing weak topological properties: Berry phase point of view", Phys. Rev. **B90**, 155443(13) (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.155443
6. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Fractionally Quantized Berry Phase, Adiabatic Continuation, and Edge States", Phys. Rev. **B90**, 085132(6) (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.085132
7. H. Aoki and Y. Hatsugai, "Polarization as a topological quantum number in graphene", Phys. Rev. **B90**, 045206(6) (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.045206

## < 著書 >

1. 初貝安弘「物理学ガイダンス：大学で学ぶ物理：熱力学」 p.23-p36 (2014) 日本評論社.

## < 講演:国際会議 >

1. (invited) Y. Hatsugai, "Symmetry in topological phases: Quantization and entanglement Chern numbers", Trends in Theory of Correlated Materials 2014, Aoyama, Tokyo, Japan, Oct 5-8 (2014).

2. (invited) Y. Hatsugai, "Symmetry protection and Berry connections in condensed matter systems", Geometric Aspects of Quantum States in Condensed Matter, Natal, Brazil, Aug.27 (2014).
3. (invited) Y. Hatsugai, "Geometric aspects of graphene: chiral symmetry and polarization", Geometric Aspects of Quantum States in Condensed Matter, Natal, Brazil, Aug.27 (2014).
4. (invited) Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence: variety and universality", Topology in the New Frontiers of Materials Science, NIMS, Tsukuba, Japan, April 1 (2014).
5. T. Kariyado, D. Seki and Y. Hatsugai, "Correlation effects on the topological edge states in graphene nanoflakes: Relation between nanostructure and local magnetic order", Dynamics of Strongly Correlated Systems, Kashiwa, Japan March 30 (2015).
6. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Symmetry and Bulk-Edge Correspondence in the Dimerized Spin-1/2 Heisenberg Ladder with External Magnetic Field", American Physical Society 2015 March Meeting San Antonio, U.S.A. March 2-6 (2015).
7. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Topological Characterization of the Plateau Phase in the Dimerized Heisenberg Ladder", International conference on topological quantum phenomena, Kyoto, Japan, Dec. 16-20 (2014).
8. T. Kawarabayashi, Y. Inoue, Y. Hatsugai, and H. Aoki, "Sharp zero modes in disordered graphene with Kekule bond order", High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-21), Panama City Beach, Florida, U.S.A. Aug. 3-8 (2014).
9. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Bulk-Edge Correspondence with the Berry Phase: Symmetry and Fractional Quantization", New Horizon of Strongly Correlated Physics, Kashiwa, Japan, June 25 (2014).
10. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, "Local density of states at topological defects in a Kekule bond order in graphene", Graphene week 2014, Gothenburg, Sweden, June 23-27 (2014).
11. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Boundary Shape Dependence of Edge Spectra: A View from Fractional Quantization of Berry phases", The OIST International Workshop on Novel Quantum Materials and Phases, Okinawa, Japan, May 14-17 (2014).

### < 講演:国内会議 >

1. [招待講演] 初貝 安弘, "Variety of edge states: QHE to silicone: topological point of view", Nagoya Univ. Tanaka Lab. Seminar/2014-08-04 2014, Nagoya, Japan
2. 関 大地, 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「グラフェン断片の多様なゼロモードエッジ状態」 「日本物理学会第70回年次大会/2015-03-21-2015-03-24 (2015) 早稲田大学, 東京
3. 大野 修平; 苅宿 俊風; 初貝 安弘, 「3次元フォトリック結晶の局在基底によるトポロジカル数の計算」 日本物理学会第70回年次大会/2015-03-21-2015-03-24 (2015) 早稲田大学, 東京
4. 福井 隆裕, 初貝 安弘, 「エンタングルメント・チャーン数の提案と応用」 日本物理学会第70回年次大会/2015-03-21-2015-03-24 (2015) 早稲田大学, 東京

5. 初貝 安弘, 白石 賢二, 青木 秀夫, 「拡張した Weaire-Thorpe 模型による silicene のバンド構造解析 平坦バンドとディラックコーン」日本物理学会第 70 回年次大会/2015-03-21-2015-03-24 (2015) 早稲田大学, 東京
6. 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「メカニカルグラフェンにおけるディラックコーンの生成と消滅」日本物理学会第 70 回年次大会/2015-03-21-2015-03-24 (2015) 早稲田大学, 東京
7. 吉村 幸徳, 井村 健一郎, 福井 隆裕, 初貝 安弘, 「2 次元版弱いトポロジカル相と Berry 位相」第 8 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)/2014-11-21-2014-11-22 (2014) 東京大学, 東京
8. 大野 修平, 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「フォトニック結晶におけるトポロジカル数の局在基底による計算とその応用」第 8 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)/2014-11-21-2014-11-22 (2014) 東京大学, 東京
9. 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「磁場下のボンド交替スピン 1/2 ハイゼンベルグ 2 本鎖のトポロジカルな性質: 対称性とベリー位相」第 8 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)/2014-11-21-2014-11-22 (2014) 東京大学, 東京
10. 関大地, 初貝 安弘, 「グラフェン断片の電子相関とトポロジカルな性質」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
11. 白石 賢二, 白川 裕規, 棚谷 翔, 初貝 安弘, 「シリセンリボンとゲルマネンリボンの端終端の効果の理論的研究」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
12. 大野 修平, 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「フォトニック結晶におけるチャーン数とエッジ状態」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
13. 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「量子スピン系におけるベリー位相の分数量子化とバルク・エッジ対応」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
14. 藤田 弦暉, 塩川 太郎, 小鍋 哲, 初貝 安弘, 山本 貴博, 高田 幸宏, 遠藤 哲郎, 村口 正和, 白石 賢二, 「ナノ構造中における電子輸送の理論的研究」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
15. 河原林 透, 初貝 安弘, 青木 秀夫, 「傾いたディラック電子系における  $n=0$  ランダウ準位の異常性と staggered ポテンシャル」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
16. 福井 隆裕, 初貝 安弘, 「必ずしもカイラルでない系におけるベリー位相の量子化」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知
17. 初貝 安弘, 「BdG 方程式のトポロジカルな構造」日本物理学会秋季大会/2014-09-07-2014-09-10 (2014) 中部大学, 愛知

## < 受賞 >

1. 日本物理学会第 20 回 (2015 年度) 論文賞, 2015 年 3 月, 福井 隆裕, 初貝 安弘, 鈴木 博, "Chern Numbers in Discretized Brillouin Zone: Efficient Method of Computing (Spin) Hall Conductances, J. Phys. Soc. Jpn. 74, pp. 1674 (2005) ".

## < 外部委員等 >

1. 初貝安弘、東北大学特任教授(客員)(国際集積エレクトロニクス研究開発センター)
2. Y. Hatsugai, "Progress of Theoretical and Experimental Physics", Editorial Board

## < アウトリーチ >

1. 初貝安弘, 第 35 回 数理の翼 夏季セミナー 講師「対称性の破れからバルク・エッジ対応へ」2014 年 8 月 17 日~8 月 22 日

## < 卒業論文 >

1. 荒木広夢:「Kane-Mele 模型のエンタングルメントチャーン数」(物理学類、卒業論文、2015.3)
2. 關澤拓未:「グラフェンでの原子崩壊」(物理学類、卒業論文、2015.3)

## < 修士論文 >

1. 大野修平:「フォトニック結晶におけるバルク・エッジ対応」(数理物質科学研究科、物理学専攻、修士論文、2015.3)
2. 關大地:「ナノグラフェン境界の電子状態の理論」(数理物質科学研究科、物理学専攻、修士論文、2015.3)

## < 外部資金 >

1. 科学研究費 基盤研究 (A)「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の物理とその普遍性: 固体物理から冷却原子まで」研究課題番号: 26247064, 総額: 28340 千円 2014 年度: 15600 千円 (直接経費: 12000 千円, 間接経費: 3600 千円) (研究代表者: 初貝安弘)
2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「マヨラナ表示による幾何学的位相とトポロジカル秩序変数」研究課題番号: 25610101, 2014 年度: 1430 千円 (直接経費: 1100 千円, 間接経費: 330 千円), (研究代表者: 初貝安弘)
3. 科学研究費補助金 新学術領域研究(研究領域提案型) 原子層科学, 領域代表 齋藤 理一郎, 理論班 連携研究者 初貝安弘

## VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 1名 (数理物質科学研究科前期課程 1名)

卒研究生 1名

本研究グループでは、メゾ系・ナノ系で顕在化する量子性と電子相関・非平衡性に起因する電子相関量子非平衡現象を「非平衡系の場の量子論」の手法を活用して理論的研究を進めている。量子ドット系の量子輸送現象の解析は、ドット系の電子相関とバイアス電圧による非平衡性を同時に考慮する必要があり、理論的な取り扱いが困難な問題の一つである。我々はこの問題に対し、種々の解析的手法と近似法を開発し、解析を進めている。これまで注力してきた電子間相互作用に対する解析的非平衡摂動計算に加え、本年度から文科省科研費「物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象」を新たに開始した(外部資金 [1])。これは、これまで必ずしも明確でなかった非平衡電流保存則を明示的に満たすべく、双対的記述として位相的自由度 (= 物質ゲージ場) による理論の構築・展開を意図するものである。加えて今年度は、関連する興味深いナノ量子輸送現象として量子ドット系の非平衡熱電現象および、格子モードと結合した量子ドット系の解析も行った。本年度の成果は以下のとおりである。

### 【1】量子ドットの解析的非平衡摂動論

不純物アンダーソン模型はナノ構造系の平衡・非平衡量子輸送現象を記述する基本的モデルである。このモデルで電子相関に関する摂動計算を行うと、非平衡電流が必ずしも保存されないことが以前より指摘されている。我々は有限バイアス下での電流保存の問題を再検討したところ、これまで20年以上もっぱら数値積分に依り評価されてきた2次摂動自己エネルギー  $\Sigma^R$  が、二重対数関数とよばれる特殊関数により厳密に評価可能であることがわかった。この評価を利用した解析的非平衡摂動理論 (Analytical Perturbative Treatment) は、ナノ構造系の非平衡性と相互作用効果を取り込み、電流保存則・スペクトル総和則を満たす。得られた自己エネルギーに関する解析的表式は、さらなる高度な近似を行うときの性質の良い礎となり得るものである。

#### (1) 不純物 Anderson 模型の非平衡スペクトル (論文 [1], 講演 [1,2])

不純物 Anderson 模型は、量子ドットを介した量子輸送現象を理論的に考察する際に標準的に用いられている理論模型であるが、主に電子-正孔対称性を持つ二端子系に理論研究が集中している。現実的な系では、ゲート電圧を制御変数として使うことが一般的であり、ゲート電圧に加え、リード・ドット間結合や電位降下の非対称性等により、系にはもはや厳密な電子ホール対称性は存在しない。我々は非平衡自己エネルギーの解析的表式を利用し、非平衡電流の保存則を陽に条件として課すことで、非対称不純物 Anderson 模型の非平衡スペクトルを求めた。得られた非平衡スペクトルは、電流保存則とスペクトル総和則を厳密に満たしていることが確認できた。また、電子正孔非

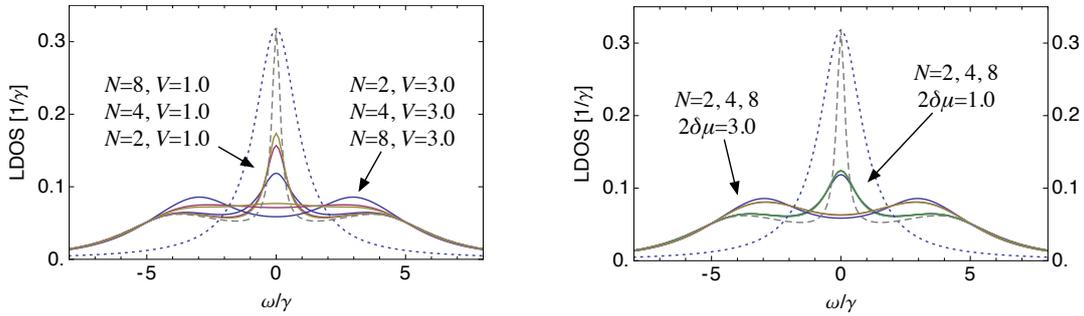


図1  $N$  端子系の非平衡スペクトル (左図) 端子の電圧を  $-V/2, \dots, V/2$  とした  $N$  端子系; (右図) 同じバイアス分散  $\delta\mu$  を持つ  $N$  端子系

対称系でも  $\Sigma^R(\omega)$  の解析的な表式により、有限バイアスが、近藤共鳴現象 (低バイアス領域) からクーロン閉塞現象 (高バイアス領域) への乗り移りをもたらすことを解析的に示すことができた。論議のある近藤共鳴の分裂に関しては、2次摂動の範囲では起こらず、特に電子ホール対称性が破れた系では、比較的小さなバイアス下から近藤共鳴を抑圧し、近藤共鳴の分裂ではなくクーロン閉塞共鳴へのミキシングが起こることがわかった。

## (2) 非平衡定常状態の普遍的位相緩和 (論文 [1], 講演 [3])

量子輸送過程の位相コヒーレンスを攪乱する効果としては、有限温度効果と有限バイアス効果が代表的である。両者は物理的に多くの類似する性質や影響を持つ一方で、理論的に見ると、前者は平衡状態で可解模型、後者は非平衡定常状態で非可解模型、と大きく異なっている。解析的非平衡摂動論は、多端子絶対零度系に対する解析の結果であるが、その入力として端子の初期分布  $\bar{f}(\varepsilon) = \sum_a (\gamma_a/\gamma) \theta(\mu_a - \varepsilon)$  を入力情報として使っているため、多端子性を活用することで任意の端子初期分布の影響を調べることが可能である。特に適当な  $\gamma_a$  と  $\mu_a$  を持つ仮想的な  $N$  端子系を導入することで、有限温度による位相緩和効果と有限バイアス 2 端子系による位相緩和効果を  $N = 2 \rightarrow \infty$  と連続的につなぎ、系統的に比較することができる。図1に解析的摂動論により得られた  $N$  端子系の非平衡スペクトル結果を示す。非平衡スペクトルは端子数にはあまり依存せず、実質的にバイアス分散  $\delta\mu$  のみで特徴づけられることがわかった。 $N = 2$  では、 $\delta\mu = \sqrt{\alpha}eV/2$  ( $\alpha$  は端子の非対称パラメータ)、 $N \rightarrow \infty$  では  $\delta\mu = \pi k_B T / \sqrt{3}$  である。この結果は、非平衡定常電子相関係の位相緩和効果を考察する上で、可解な  $N \rightarrow \infty$  極限として平衡相関係が現れ得ることを示唆し、非平衡定常状態が持つ普遍的な挙動とも関連する興味深い結果である。

## 【2】非平衡量子輸送と物質ゲージ場 (外部資金 [1])

ナノ構造系の非平衡量子輸送を電子相関に関する摂動計算を行うと、必ずしも非平衡電流保存則が保証されず、電流保存則を条件として課すことで自己無撞着に解くことになる。電流保存則をこのような形で「課す」ことは理論的には不自然であり、非平衡電流保存則を自然に保証するような

理論的枠組みを構築することが強く望まれる。本研究は、このような問題を根本的に解消するため、ナノ系の非平衡量子輸送現象を物質ゲージ場の理論見地から再定式化し、解析することを目的とするものである。

量子輸送現象における物質ゲージ場の基本的な形は、電荷の位相自由度を用いて量子トンネルを記述した Ambegaokar-Eckern-Schön 理論である。そこで本年度は、非平衡量子輸送現象を扱うことが可能となるよう、完全計数統計の手法と組み合わせ、量子ドット系を流れる非平衡電流の生成関数を Keldysh 汎関数により構成した。汎関数積分は、位相場に関して 2 次展開 (Gauss 近似) を行うことで近似的に評価可能となるが、同時に閉時間経路において有限の巻き付き数を持つ経路配位を考慮することが重要である。これは後者が非摂動的寄与として電荷量子化効果 (Coulomb 閉塞効果) を担っているためである。得られた生成関数は、電子相関のない極限では完全計数統計の Levitov-Lesovick 公式を再現し、電子相関の効果は物質位相場の寄与として表される。現在、以上のようにして得られた完全計数統計の生成関数から、具体的に微分コンダクタンス、その揺らぎ・高次モーメントの挙動に関しての解析を進めている。

### 【3】ナノ構造系の熱電現象 (学位論文 [1])

ナノ構造系の量子輸送現象として熱電現象を考えることは、基礎物性の観点からだけでなく、応用上も重要である。特にナノ系では電子相関の影響が強く現れるだけでなく、微小領域に有限の温度差をつけると大きな非平衡性を持つことが不可避と考えられる。その結果、バルク系で成立する Wiedemann-Franz 則に制限されないような高効率の熱電素子をナノ系において実現できる可能性がある。本研究では量子輸送現象の中でも特に熱電効果に注目し、輸送過程での電子-格子相互作用と電子相関が熱電現象 (Seebeck 係数  $S$  および熱電効率  $ZT$ ) に与える効果を解明することを目的として計算を行った。モデルとして、電子相関非平衡量子ドット系がフォノンと結合している Anderson-Holstein 模型を用いた。格子振動の効果を Mahan のユニタリ変換により取り込み、クーロン閉塞効果が支配的な温度領域を想定して電子相関を考慮して計算を行った。計算結果を図 2 に示す。線形領域では、熱電流 (Seebeck 電流) の符号変化は、状態密度の微分に比例し、電子正孔対称性を反映することが知られているが、その構造は有限の温度差をつけた場合に現れる熱電流に関しても予想以上に保持されていることがわかる (左図)。また熱電効率  $ZT$  のゲート電圧依存性は、 $\gamma/U$  に大きく依存し、特に Coulomb 閉塞共鳴ピーク付近で大きな熱電効率を得ようとすると大きな電子相関が必要であることがわかる。

#### 研究業績

##### < 論文 >

1. N. Taniguchi, *Multi-terminal Anderson impurity model in nonequilibrium: Analytical perturbative treatment*, Phys. Rev. B **90** 115421 (2014).

##### < 学位論文 >

1. 卒業論文: 山本敬太「ナノ構造量子輸送に対する電子相関と電子-格子相互作用の効果」(筑波大学物理学類 2015 年 2 月).

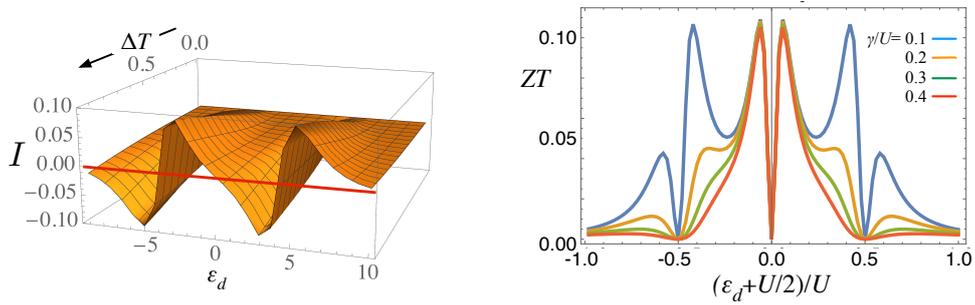


図2 (左図) 非平衡熱電流のゲート電圧依存性度。(右図) 熱電効率  $ZT$  のゲート電圧と電子相関の依存性。

< 講演 >

1. 谷口伸彦 「非対称不純物アンダーソン模型の解析的非平衡摂動計算と電流保存」日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 8 日 中部大学).
2. N. Taniguchi, “Analytical Perturbative Treatment of Multiterminal Nonequilibrium Anderson Impurity Models” American Physical Society March Meeting (2015.03.03, San Antonio, USA).
3. 谷口伸彦 「アンダーソン模型の解析的非平衡摂動理論 II, 多端子性と温度効果」日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 22 日 早稲田大学).

< 外部資金 >

1. 文部科学省 科研費 基盤研究 (C) 「物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象」(研究代表: 谷口伸彦 2014 年度-2016 年度).

## VII-4 ナノ構造物性

### 1. メンバー

教授	岡田晋
研究員	小鍋哲、富田陽子
学生	博士課程学生：6名、修士課程学生：5名、学群生：3名

### 2. 概要

ナノスケール構造を持つ物質においては、その物性は系のサイズ、表面(端)形状等に非常に大きく依存することが知られている。このことは、他方において、既存の物質においても、物質のサイズをナノメートルオーダーとし、その形状を制御することにより、新奇物性、新機能発現を誘起させることが可能であることを示唆している。実際、興味深い物性を示す種々のナノスケール炭素物質群の合成が近年盛んになされている。例えば、有限幅のグラファイト断片(グラファイトリボン)はその端形状に依存して、端を構成する原子にスピン分極が生じる事が知られている。さらに、このリボンを丸めた有限長さのナノチューブでは、そのチューブ直径に依存して、強磁性、反強磁性磁気秩序を示す事が我々の量子論に基づく全エネルギー計算から明らかになっている。また、チューブに5員環と8員環からなるトポロジカル欠陥を導入することにより、欠陥にそって分極電子が局在しチューブ軸にそって強磁性的秩序を発現する。

我々のグループでは、ナノサイズ炭素系(ナノチューブ、フラーレン、グラファイト)の電子物性を理論的に解析することによって、サイズ、形状が誘起する特異な電子物性発現の可能性を探索する事を目的としている。

### 3. 研究成果

#### 【1】 ナノスケールの世界の土星:C<sub>60</sub>を包摂した環状ポリアレン分子の分子設計

ナノスケールのカーボン物質は、その構造に起因する、ナノスケールの内包、外接空隙を有している。これらの空隙は本質的に他のナノスケールを有する物質を取り込み、複合構造を形成することが可能となる。実際、ナノスケールの炭素チューブであるカーボンナノチューブ(CNT)は、その内側の直径1nm程度の空隙にサッカーボール状の炭素分子C<sub>60</sub>を内包することが可能であり、ナノスケールのサヤエンドウを形成する。この類似構造として、近年、長さが極端に短いCNT、すなわち環状の炭化水素分子(シクロパラフェニレン)の内側空隙にC<sub>60</sub>が包摂された分子の合成もなされている。ここでは、その類似構造として、六角形状に重合したビフェニル(フェニル基が2つ繋がったもの)の内側空隙にC<sub>60</sub>分子を包摂させることにより、ナノスケール土星が構築することが可能であることを理論的に予言した(図1)。この分子は、これまでに合成されている

類似の分子とほぼ同程度、もしくはそれ以上のエネルギー的安定性を有していることが明らかになった。

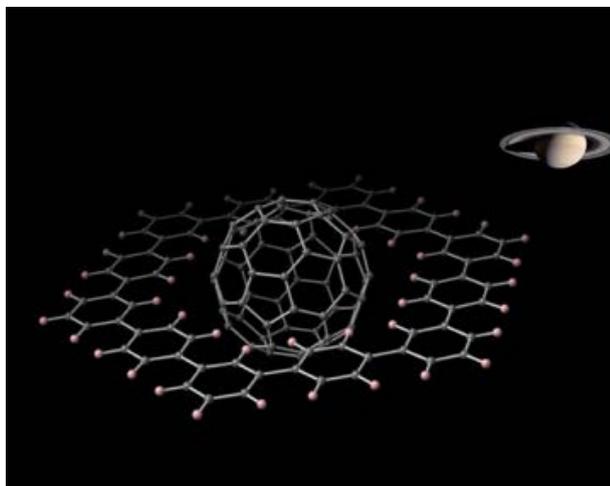


図 1: ナノスケール土星分子：C60 包摂環状ビフェニレンの構造

## 【2】 トポロジカルな欠陥を有するグラフェンの物性解明

グラフェンは本質的に、その6員環ネットワークに非6員環、すなわちトポロジカルな欠陥を含むことが知られている。これらのトポロジカルな欠陥はフェルミレベル近傍の電子物性を大きく変調させることを我々はこれまでに示してきた。本年度、我々は、 $sp^2$ 炭素原子が多様な多角形炭化水素分子を形成することに着目し、トポロジカル欠陥を主体とする $sp^2$ 炭素シートの物質設計を行った。ここでは、4員環(シクロブタジエン)と8員環からなるネットワーク、5員環と12員環から構築される2次元シートの安定構造と電子物性を明らかにした。5員環ネットワークにおいては、その原子ネットワークに一切6員環を含まないにもかかわらず、フェルミレベル近傍において1対の線形分散バンドが発現することを示した。また

同時にフェルミレベルに平坦バンドが発現し、強磁性的な磁気秩序が発現することも示した(図2)。すなわち、ディラック電子系と強磁性的磁気秩序が共存する興味深い電子構造を有する系であり、この構造を用いた磁性と伝導特性を併せ持つ新奇なデバイスの材料となるこ

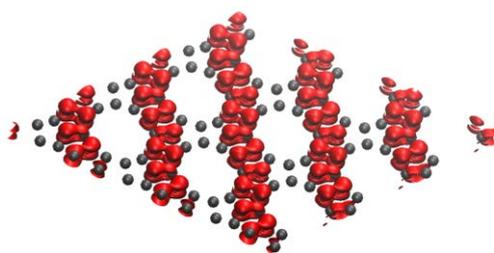
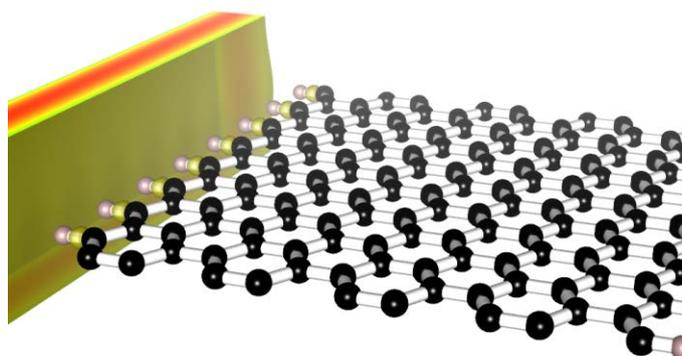


図 2 2次元5員環ネットワークのスピンドensity

とを示した。

### 【3】 グラフェンナノリボンへの電界によるキャリア注入の可能性

グラフェンナノリボンは、そのリボン端の原子ネットワーク形状に依存して、特異な電界応答を示すことが知られている。例えば、ジグザグ型の端を有するリボンでは、端近傍において、外部電界に対する過剰な遮蔽現象が発現し、外部電界に対して逆向きの電界が誘起される。ここでは、このようなグラフェンリボンの外側の真空領域に着目して、真空領域にその分布を有する、自由電子(NFE)状態の外部静電界応答特性を調べた。計算の結果、リボン端外に分布を有するNFE状態は外部電界の印加にともない、速やかに低エネルギーシフトし、最終的にフェルミレベルと交差し、この状態への電子注入が実現できることが明らかになった(図3)。電子注入に要する外部電界の大きさは、グラフェンリボンの幅の逆数に依存し、リボンの端形状にはそれほど依存しないことが明らかになった。



### 【4】 欠陥を有するCNTの電界下での電子物性

カーボンナノチューブは次世代の半導体デバイスを構成する材料として、その形状、電子状態の観点から注目されている。とりわけ、インクジェット技術によるフレキシブル半導体のチャンネル材としての応用が期待されている。一方、カーボンナノチューブは本質的にそのチューブ壁に原子欠陥を有することが容易に想像される。つまり、カーボンナノチューブを用いた半導体デバイスでは、このような欠陥を有するナノチューブの電界下での特性を明らかにする必要がある。ここでは、そのような欠陥を有するCNTの電界による電子/正孔注入に

ついて理論的に調べた。その結果、欠陥はナノチューブ内に内部電界を誘起し、そのために電荷注入に必要となる外部電界が欠陥の向きに強く依存することが明らかになった（図4）。この結果は、ナノチューブを電子デバイス、特に半導体デバイスとして応用する際には欠陥の電極に対する相対的な配向の制御が必須となることを明らかにしたものである。

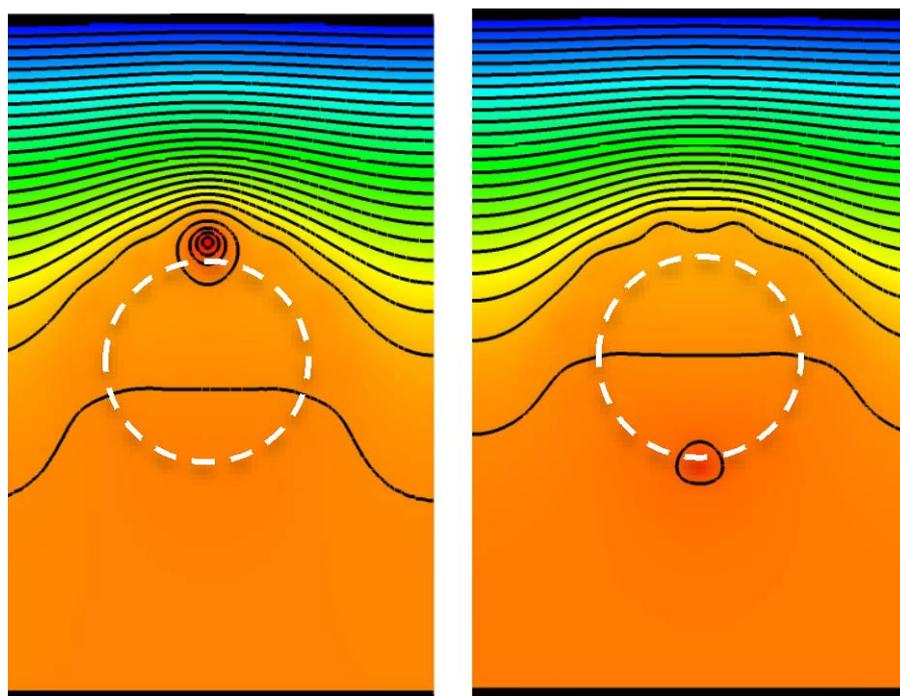


図4: 電界下での欠陥を有するCNTの周りの静電ポテンシャルの等高線。白点線がCNTの壁位置を表す。

#### 【5】電界によるフラレン分子のスピ状態制御

C60 フラレンは比較的高い化学的反応性を有している。この性質を使うことにより、C60 をはじめとするフラレンは、分子や原子によりその表面の科学修飾を行うことが可能である。たとえば、C60 に5個の有機官能基（フェニル基やメチル基）が吸着させることによりバドミントンのシャトルロック状の分子を合成することが可能である。さらに、5個の有機官能基を付加することにより、興味深いスピ物性を有するC60誘導体の合成も報告されている。ここでは、C<sub>60</sub>に10個のメチル基(-CH<sub>3</sub>)がある原子サイトに選択的に化学吸着したフラレン十重付加体(デカメチルフラレン)に着目し、この分子が分子サイズの磁石となることから、その磁性状態を電場により制御出来るかどうかを調べた。そ

の結果、この分子の磁性状態は外部電場を印可することにより不安定化し、磁性状態の発現／消失を外部電場により制御が出来ることを示した。

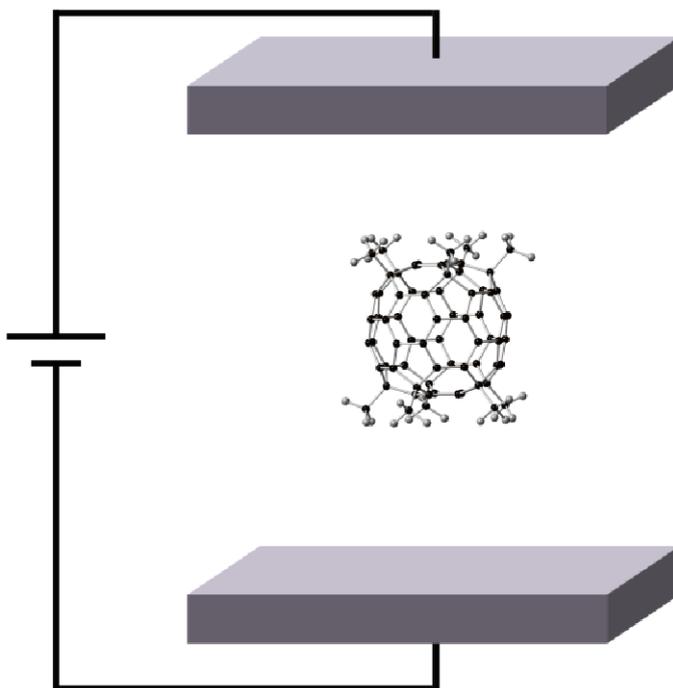


図5：電界下での十重付加体 C60 計算の構造モデル

#### 4. 学位論文

博士：

1. 實宝秀行：Fundamental properties of graphene hybrid structures (2015年3月)

修士：

1. 木暮聖太：ナノカーボン複合構造体の物質設計と物性解明(2015年3月)
2. 白川裕規：シリコン系絶縁膜中の格子欠陥の Si デバイスへの影響の理論的考察(2015年3月)
3. 藤田弦暉：ナノ構造中における電子輸送の理論的研究(2015年3月)

#### 5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞等（賞の名称、受賞者名、タイトル、年月日）

1. 山中綾香、日本学術振興会・博士特別研究員（DC2）2015年4月～
2. 丸山実那、日本学術振興会・博士特別研究員（DC2）2015年4月～

外部資金（名称、氏名、代表・分担の別、採択年度、金額、課題名）

代表

1. 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」（科学技術振興機構）（2009年度～2014年度）  
「計算科学によるグラファイト系材料の基礎物性解明とそのデバイス応用における設計指針の開発」（総額：82,100千円）
2. 科学研究費補助金 基盤研究(A)（文部科学省）（2013年度～2016年度）「ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明」（総額：35,200千円）
3. 科学研究費補助金 新学術研究（公募研究）（文部科学省）（2014年度～2015年度）「計算科学に基づく新奇原子層物質複合系の物性解明と物質設計」（総額：5,300千円）

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

1. M. Maruyama, K. Nakada, and S. Okada, "Energetics and electronic structures of polymerized cyclobutadiene" *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 035103 (2014). (DOI: 10.7567/JJAP.53.035103)
2. N.-T. Cuong, M. Otani, and S. Okada, "Electrostatic modulation of electron-states in MoS<sub>2</sub>: First-principles Calculations", *J. Phys.: Cond. Matt.* **26**, 135001 (2014). (DOI: 10.1088/0953-8984/26/13/135001)
3. J. Lin, O. Cretu, W. Zhou, K. Suenaga, D. Prasai, K. I. Bolotin, N.-T. Cuong, M. Otani, S. Okada, A. R. Lupini, J.-C. Idrobo, D. Caudel, A. Burger, N. J. Ghimire, J. Yan, D. G. Mandrus, S. J. Pennycook, S. T. Pantelides, "Flexible metallic nanowires with self-adaptive Ohmic contact to semiconducting transition-metal dichalcogenide monolayers" *Nature Nanotech.* **9**, 436 - 442 (2014). (DOI: 10.1038/nnano.2014.81)
4. M. Maruyama and S. Okada, "Two-dimensional sp<sup>2</sup> Carbon Networks of Fused Pentagons", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 06JD02 (2014). (doi: 10.7567/JJAP.53.06JD02)
5. A. Yamanaka and S. Okada, "Structural Dependence of Electronic Properties of Graphene Nanoribbons on an Electric Field", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 06JD05 (2014). (doi: 10.7567/JJAP.53.06JD05)

6. S. Kigure and S. Okada, "Energetics and Electronic Structures of C60 Included in [n]Cyclacene Molecules: Dynamical and Electronic Properties of C 60" , *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 06JD06 (2014). ( doi: 10.7567/JJAP.53.06JD06)
7. K. Nomura and S. Okada, "An anomalous dipole-dipole arrangement of water molecules encapsulated into C60 dimer", *Chem. Phys. Lett.* **608**, 351-354 (2014). (doi: 10.1016/j.cplett.2014.06.013)
8. K. Narita and S. Okada, "Spin-state tuning of decamethyl C60 by an external electric field", *Chem. Phys. Lett.* **614**, 10-14 (2014). (doi: 10.1016/j.cplett.2014.08.063)
9. S. Konabe and S. Okada, "Coulomb Interaction Effects on Optical Properties of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides", *Phys. Rev. B* **90**, 155304 (2014). (doi: 10.1103/PhysRevB.90.155304)
10. U Ishiyama, N.-T. Cuong, and S. Okada, "Electronic structures of carbon nanotubes with monovacancy under an electric field", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 115102 (2014). (DOI: 10.7567/JJAP.53.115102)
11. S. Kigure, Y. Iizumi, T. Okazaki, and S. Okada, "Electronic and Geometric Structures of Carbon Nanotubes Encapsulating Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Molecules", *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 124709 (2014). (DOI: 10.7566/JPSJ.83.124709)
12. A. Yamanaka and S. Okada, "Electron injection into nearly free electron states of graphene nanoribbons under a lateral electric field", *Appl. Phys. Express* **7**, 125103 (2014). (DOI: 10.7567/APEX.7.125103)
13. M. Shigeta, T. Endo, Y. Kondo, M. Uejima, S. Okada, K. Kaneko, and N. Nakashima "Latex Polymer/Super Growth-Single-Walled Carbon Nanotube Composite with High Electroconductivity Fabricated by Wet Processing", *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **87**, 1343-1348 (2014).
14. L. K. Shrestha, R. G. Shrestha, Y. Yamauchi, J. P. Hill, T. Nishimura, K. Miyazawa, K. Wakabayashi, T. Kawai, S. Okada, and K. Ariga, "Nanoporous Carbon Tubes from Fullerene Crystals as the  $\pi$ -Electron Carbon Source", *Angew. Chem. Int. Ed.* **54**, 951 - 955 (2015). (DOI: 10.1002/anie.201408856)

15. M. Shigeta, K. Kamiya, M. Uejima, and S. Okada, "Dispersion of CNT in Organic Solvent by Commercial Polymers with Ethylene Chains: Experimental and Theoretical Studies", *Jpn. J. App. Phys.* **54**, 035101 (2015). (DOI: 10.7567/JJAP.54.035101)
16. H. Jippo, M. Ohfuchi, and S. Okada, "Electronic transport properties of 10 nm graphene channel between Au electrodes", *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **13**, 54-58 (2015). (DOI: 10.1380/ejssnt.2015.54)
17. S. Kigure, H. Omachi, H. Shinohara, and S. Okada, "Nano-Saturn: Energetics of the Inclusion Process of C60 into Cyclohexabiphenylene", *J. Phys. Chem. C* **119**, 8931-8936 (2015). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b00449).

(2) 招待講演

1. 岡田 晋, "複合構造形成によるグラフェン系材料の物性制御", 応物 Si テクノロジー分科会講演会「グラフェンナノ構造の革新的デバイスへの展開」, 産業技術総合研究所, つくば市, 2014年5月23日
2. Satoru Konabe, "Theory of high efficiency photoelectric conversion in carbon nanotubes", The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference, (INEC2014), (北海道大学) 2014年7月28日-31日

(3) 国際会議発表

1. A. Yamanaka and S. Okada, "Electronic Properties of Graphene under an Electric Field", International Conference of Synthetic Metals, June 30 - July 5 (2014), Turku.
2. M. Maruyama and S. Okada, "Two-dimensional sp<sup>2</sup> carbon network consisting of fused pentagons", International Conference of Synthetic Metals, June 30 - July 5 (2014), Turku.
3. S. Kigure and S. Okada, "Energetics and Electronic Structures of CNT Encapsulating PAH Molecules", International Conference of Synthetic Metals, June 30 - July 5 (2014), Turku.
4. H. Jippo, S. Okada, and M. Ohfuchi, "First-principles electronic transport calculations of graphene with metal electrodes", The 7th International Symposium on Surface Science, Matsue, November, 2-6, (2014).
5. A. Yamanaka and S. Okada, "Energetics and Electronic Structure of Graphene Nanoribbons under an Electric Field", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).

6. U Ishiyama and S. Okada, "Threshold Voltage Variation for Charge Accumulation in CNT Due to the Monatomic Defect Arrangement", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
7. S. Kigure and S. Okada, "Nano-Saturn : Theoretical Design of New C60 Inclusion Compounds" MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
8. M. Maruyama and S. Okada, "Geometric and Electronic Structures of Polymerized C32 Fullerene", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
9. S. Konabe and S. Okada, "Nonlinear Optical Properties of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
10. K. Narita and S. Okada, "Spin-State Tuning of Decamethyl C60 by an Electric Field", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
11. H. Jippo, S. Okada, and M. Ohfuchi, "First-Principles Study on the Contact Problem of 10 nm Graphene Channel Devices", MNC2014, 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Fukuoka, November 5-7 (2014).
12. K. Narita and S. Okada, "Spin-state Tuning of Decamethyl C60 by an Electric Field", International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON '14), Miraikan, Tokyo, November 26-28 (2014).
13. U Ishiyama and S. Okada, "Electronic structure of carbon nanotubes with monovacancy under an electric field", International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON '14), Miraikan, Tokyo, November 26-28 (2014).
14. A. Yamanaka and S. Okada, "Electronic Properties of Graphene under an Electric Field", International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Univ. Tokyo, Tokyo, December 1-3 (2014).
15. M. Maruyama and S. Okada, "Electronic Structures of Two-dimensional sp<sup>2</sup> Carbon Networks of Fused Pentagon Trimers", International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Univ. Tokyo, Tokyo, December 1-3 (2014).
16. S. Konabe and S. Okada, "Exciton many-body physics in carbon nanotubes", International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Univ. Tokyo, Tokyo, December 1-3 (2014).

## VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

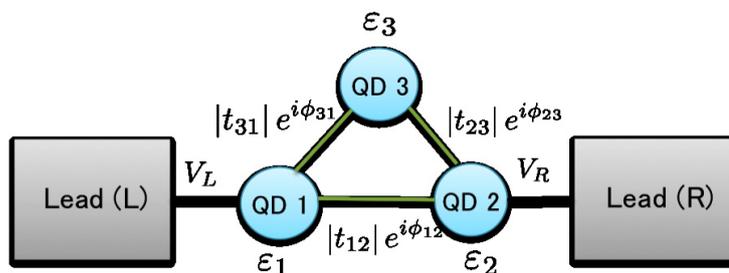
助教：久保敏弘

大学院生：博士後期課程3名、前期課程3名

### 【1】量子状態制御と非平衡統計物理

#### (1) 量子ポンプと時間依存伝導現象 (論文[5], 国際会議[1, 4], 国内会議[4, 12])

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象に継続して取り組んでいる。周期的に変化する外部パラメタによる「ポンプ現象」は原理的に重要な物理を含むだけでなく電流標準などの応用面でも重要な課題である。量子コヒーレンスが重要となる「量子ポンプ」について、量子ドット間のトンネル位相 (図の  $\phi_{12}$ ) を変調するモデルを提案し、これによる量子ポンプ電流を計算した。この解析は、「散乱理論」を用いていたため、相互作用が無い条件に限定されるが、計数統計を取り入れた量子マスター方程式を用いる方法では、相互作用の効果もトンネルの最低次で取り入れる事が可能である。電極/量子ドットの磁場とトンネル結合を変調した際に誘起される量子ポンプ電流、スピン流を調べた。また断熱的なポンプ電流だけでなく非断熱変調の効果を逐次的に評価した。



#### (2) メゾスコピック系の物性と伝導現象 (論文[1, 2, 4, 6], 国内会議[2, 6, 11])

近接した二つの量子細線系はクーロンドラッグと呼ばれる電子相関や、静電誘起 Aharonov-Bohm (AB) 干渉効果など興味深い現象が報告されている。量子細線は一次元状態密度の特殊性から静電結合の効果自体が非自明な物理を含んでいる。今回それぞれの量子細線の伝導を独立に調べる事により、一次元状態密度に起因する特異な静電特性を実験的に調べ理論モデルと比較する事により、その物理を明らかにした。また純粋な二次元系である Graphene では電子スピンの自由度に加え、谷間自由度が重要である。今回 Graphene の動的応答を理論的に調べた結果、系のトポロジーに起因する Berry 位相 (ベクトルポテンシャル) に加え、擬スカラーポテンシャルの効果が期待される事を明らかにした。この効果は、フォノンのダイナミクスに現れる事が期待される。また量子ドット中の電子スピンを用いた量子情報処理について近年の研究の進展に関してレビューした。

#### (3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス (国内会議[3, 9, 14, 16])

光格子中の冷却原子系は、良く制御された量子ダイナミクスを実験・理論を比較しながら研究することが可能である。今期は一次元 Bose-Hubbard モデルを舞台として、トンネル結合が時間的に変化する場合のボゾン粒子の量子ウォーク現象を議論した。また、スピン1のボゾン系ではスピン無依存の相互作用とスピンに依存する相互作用があるため、より多彩な量子ダイナミクスが期

待される。今回2粒子系を厳密に解く事により、スピン混合ダイナミクスと遠距離スピン相関を詳しく調べ、その特徴を明らかにした。

(4) 量子位相滑り (国際会議[2, 3], 国内会議[1, 8])

超伝導接合におけるトンネル現象において、クーパー対の位相コヒーレンスが保たれる場合はジョセフソン効果が現れ、これまで詳しく調べられて来た。クーパー対の電荷が良い量子数である場合は、ジョセフソン効果と双対の関係にある磁束のコヒーレントなトンネルである量子位相滑りが予言され、電流標準や高感度電荷計としての展望が理論的に議論されている。しかしながらその実験的実現の為に、散逸の少ない大きなインダクタンスを接合に付与する事が有効である。このインダクタンスを含む電磁場環境を人為的に制御する事により素子の性能改善が可能であることを理論的に示した。

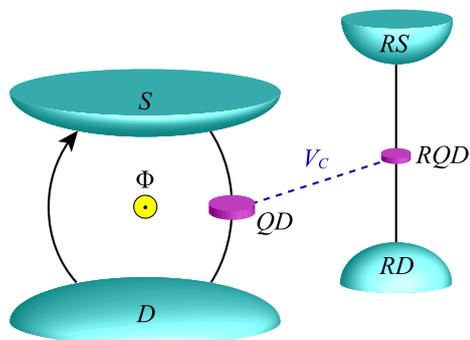
(5) 多分岐量子鍵配送 (国内会議[7])

従来の量子鍵配送はビットエラーに対して脆弱であるが、最近提案された光子の位相変調を信号として使う方法はエラー耐性が高い為注目されている。しかしながら、その為に100以上の長いパルス列に渡って位相情報を保持する必要がある。今回従来の二分岐干渉計を拡張し、三分岐以上の干渉計を使う事を提案し、その基本性能を理論的に解析した。ただその安全性解析には一部不備がある事が判明し、検討を加えているところである。

【2】環境が量子系にもたらすデコヒーレンスと量子統計

(1) 相互作用誘起 AB 振動 (国際会議[5], 国内会議[5])

近年、半導体微細加工技術・低温技術の進展に伴い、量子力学における基本概念が半導体メソスコピック系においても議論されるようになってきた。我々は特にハイゼンベルグの不確定性原理や粒子・波動二重性と深く関係した測定の反作用という概念について、図に示すようなAB干渉計の片方の経路に量子ドット(QD)が1つ埋め込まれた系を想定して議論してきた。今回、干渉計中の量子ドットと静電的に結合したもう一つの量子ドット(RQD)における伝導現象に、干渉計を貫く磁束の影響が現れることを理論的に明らかにした。静電相互作用( $V_c$ )が弱い場合は二次摂動論を用い、強い場合は運動方程式と断裂近似を用いて解析した。特に相互作用が強い場合は、RQDのコンダクタンスの変調の可視率が100%となる条件がある事を明らかにした。これは、もとのAB干渉計でのコンダクタンス変調の可視率が非常に小さいという結果と対照的である。



(2) 電圧端子を持つ系のゆらぎの定理 (論文[3])

ゆらぎの定理は、非平衡物理において見られる普遍性を示す重要な研究成果である。しかしながら、系の位相を緩和させる電圧プローブを含む系においてゆらぎの定理が成立するかどうかはまだ

だ明らかにされていなかった。今回、電圧プローブに関わる自由度の時間変化のスケールと、量子系を伝搬する伝導電子の時間スケールに大きな差がある事を用いて、ゆらぎの定理を証明した。その結果を用いて、線形、非線形の電気/熱伝導度、(熱)電流相関(ノイズ)の間に成立する普遍的な関係を求めた。

### (3) 量子連続測定 (国内会議[10, 13, 15, 17])

量子連続測定を扱う手法の一つに、Mensky の制限経路積分がある。これは測定データに従って経路積分の積分範囲を制限するものである。我々は Mensky の制限経路積分の微視的な導出を行うとともに、測定装置が non-Markov な場合への拡張を行った。更に、被測定系が開放系の場合へも拡張した。

### <論文>

(査読論文)

1. Michihisa Yamamoto, Yasuhiro Tokura, Yoshiro Hirayama, and Seigo Tarucha, “Band Shift, Band Filling and Electron Localization in a Quantum Wire Detected by Tunneling between Parallel Quantum Wires”, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 033710 (2015).
2. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Hideki Gotoh, “Valley-asymmetric potential in graphene under dynamical deformation”, Physics Review B 90, 205402 (2014).
3. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for heat transport probed by a thermal electrode”, Phys. Rev. B 89, 205314 (2014).
4. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, “Mechanism of the Doping Dependence of Raman 2D Band - Dirac-Cone Migration -”, JPS Conf. Proc. 4, 012003 (2015).
5. Satoshi Nakajima, Masahiko Taguchi, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Interaction effect on adiabatic pump of charge and spin in quantum dot”, arXiv:1501.06181 [cond-mat] (Submitted to Phys. Rev. B).
6. Seigo Tarucha, Michihisa Yamamoto, Akira Oiwa, Byung-Soo Choi and Yasuhiro Tokura, “Spin qubits with semiconductor quantum dots”, Quantum Computing, Quantum Communication and Quantum Metrology, Lecture Notes in Physics, Springer, in press.

### <講演：国際会議>

1. Masahiko Taguchi, Satoshi Nakajima, Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Quantum Adiabatic Pumping with Tunneling Phase in Quantum Dot System”, 32nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, Austin, Texas, USA, Aug. 14, (2014).
2. M. Taguchi, D. M. Basko, F. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Quantum fluctuations of a superconducting loop embedded in an inhomogeneous electromagnetic environment”, Frontiers of Condensed Matter, San Sebastian/Spain, Aug 25 - Sep. 5 (2014).
3. M. Taguchi, D. M. Basko, F. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Mode engineering for quantum phase fluctuations of a thin superconducting loop closed by Josephson junction”, Tsukuba Nanotechnology Symposium, Tsukuba, Jul. 25-26 (2014).

4. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo and Y. Tokura, “The effect of Coulomb interaction of adiabatic pump in quantum dot”, Tsukuba Nanotechnology Symposium, Tsukuba, Jul. 25-26 (2014).
5. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Non-local Aharonov-Bohm Effects in Transport through a Quantum Dot Capacitively Coupled to a Non-equilibrium Aharonov-Bohm Interferometer”, 8th International Conference on Quantum Dots (QD2014) Pisa, Italy, May 11-16(2014).

#### <講演：国内会議>

1. 田口真彦, Denis Basko, Frank Hekking, 都倉康弘, “不均一な電磁場中における超伝導リングの理論的解析”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 7aBB-11 2014/9/7.
2. 佐々木健一, 都倉康弘, 後藤秀樹, “動的格子変形のあるグラフェンにおけるバレー非対称なポテンシャル”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8aAH-6 2014/9/8.
3. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, “ホッピングパラメタが振動する Bose Hubbard model のダイナミクス”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8aAW-7 2014/9/8.
4. 都倉康弘, 田口真彦, 中嶋慧, 久保敏弘, “トンネル結合の位相変調による定常ポンプ電流”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8pAV-8 2014/9/8.
5. 久保敏弘, 都倉康弘, “干渉計と静電的に結合した量子ドット系における非局所 Aharonov-Bohm 振動”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8pAV-9 2014/9/8.
6. 久保敏弘, 都倉康弘, “超伝導電極を用いた量子ドットスピン干渉計におけるスピン分極の検出”, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 18a-A27-9, 札幌, 2014/9/18.
7. 酒井一樹, 吉田恭, 都倉康弘, “多分岐によるエラー耐性の高いラウンドロビン DPS-QKD”, 日本物理学会 第70回年次大会 21aAn-10, 早稲田大学, 2015/3/21.
8. 田口真彦, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking, 都倉康弘, “A 超伝導リングの荷電エネルギーとクーパー対密度を空間変調させた下での有効ジョセフソンエネルギーの解析”, 日本物理学会 第70回年次大会 21aBK-7, 早稲田大学, 2015/3/21.
9. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, 山下真, “スピン1 ボゾンの2粒子量子ウォーク”, 日本物理学会 第70回年次大会 21pAG-6, 早稲田大学, 2015/3/21.
10. 中嶋慧, 都倉康弘, “Mensky 制限経路積分の Non-Markov への応用: 量子連続測定へのアプローチ”, 日本物理学会 第70回年次大会 21pAN-2, 早稲田大学, 2015/3/21.
11. 柴田 浩行, 開 達郎, 土澤 泰, 武居 弘樹, 清水 薫, 山本 剛, 都倉 康弘, 山田 浩治, “Si 細線導波路結合型 SSPD の作製”, 第62回応用物理学会春季学術講演会、12p-A3-1、東海大学, 2015/3/12.
12. Y. Tokura, M. Taguchi, S. Nakajima, and T. Kubo, “Current induced by time-dependent phase of tunnel coupling”, Nasu spin camp, Sep. 11, 2014.
13. 中嶋慧, “量子連続測定 of Mensky 制御経路積分による定式化: Non-Markov への拡張”, 第4回 quatuo 研究会、高知、2015/1/12.
14. 森田大地, “スピン1 ボゾンの2粒子量子ウォーク”, 第4回 quatuo 研究会、高知、2015/1/12.
15. 中嶋慧, 都倉康弘, “Mensky 制限経路積分の Non-Markov な場合への拡張”, 第31回量子情報技術研究会(QIT31)、東北大学片平キャンパス、仙台, 2014/11/17-18.
16. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, “ホッピングパラメタが振動する Bose Hubbard model のダイナミクス”, 若手のための量子情報基礎セミナー、京都大学、2014/8/8-10.
17. 中嶋慧, 都倉康弘, “弱い量子連続測定”, 若手のための量子情報基礎セミナー、京都大学、2014/8/8-10.

## <学位論文>

(修士論文) 数理物質科学研究科

### 1. 酒井一樹

「Round-Robin 差動位相シフト量子鍵配送の改良プロトコルおよび鍵生成率への散逸の影響」

(学位論文)

### 1. 大山侑太

「Qubit としての NV 中心の近似的解析と数値計算による評価」

### 2. 武井阜

「量子ホール絶縁体におけるエッジ状態、及び散乱理論を用いた外因性スピンホール効果について」

### 3. 古谷太一

「光子における Berry 位相とそれに起因した物理現象の研究」

## <外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究(A) 課題番号: 26247051 「量子ホールエッジチャネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成26年度: 直接経費: 1,528 千円 (平成26年度~平成30年度、研究代表者: 藤澤利正)
2. 総務省戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE) 課題番号: 20393788 「集積化可能な電気制御スピン量子ビットで構成される量子インターフェースの研究開発」(分担)(研究代表者: 樽茶清悟) 「スピン量子コンピュータの理論研究」平成26年度: 273 千円 (平成26年度)
3. 科学研究費 若手研究(B) 課題番号: 26870080 「メソスコピック系における測定の反作用とトポロジカルな準粒子」(研究代表者: 久保敏弘) 平成26年度: 直接経費: 1,000 千円 (平成26年度~平成28年度)

## <社会還元等>

1. 都倉康弘、国立情報学研究所 客員教授 2010年3月~2015年3月
2. 都倉康弘、東京工業大学 客員教授 2014年4月~2015年3月
3. 都倉康弘、茨城県科学研究コンテスト評価員 2015年3月

## <その他: セミナー>

1. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo, & Y. Tokura, “Quantum adiabatic pumping with tunneling phase in quantum dot systems”, Seminar at LPMMC, Grenoble/France, May 19, 2014
2. Y. Tokura, “Control and detection of spins in quantum dot system”, Seminar talk at CEA Grenoble/France, Jan. 23, 2015.
3. M. Taguchi, Denis. M. Basko, Frank. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Mode engineering for quantum phase fluctuations of a thin superconducting loop closed by Josephson junction under periodically modulating charging energy and superfluid density”, Seminar at Institute Neel, Grenoble/France, Feb. 11, 2015
4. 中嶋慧, “Applications of the generalized quantum master equation to a quantum adiabatic pump and an excess entropy production”, 京都大学基礎物理学研究所、京都、2015/1/28.

## VII-6 表面界面物性グループ

### 1. メンバー

准教授      小野 倫也  
研究員      Kirkham Christopher

### 2. 概要

物質の電子状態や伝導特性を量子力学の第一原理に基づいて高精度に計算でき、最先端のスーパーコンピュータで大規模計算を実現できる計算手法の開発を行っている。また、開発した第一原理計算コード RSPACE を用いた大規模シミュレーションにより、表面や界面で起こる物理現象の解明と予測を行っている。さらに、発見した物理現象をデバイスに応用する研究にも取り組むとともに、計算科学手法によるデバイスデザイン技術の構築を推進している。

### 3. 研究成果

#### 【1】輸送特性計算における高速グリーン関数ソルバーの開発

Overbridging Boundary-Matching(OBM)法や非平衡 Green 関数法により輸送特性を求める際に、半無限電極に挟まれた系の Green 関数を求める必要がある。今、考えるべき Green 関数は

$$G_{ij} = \mathbf{e}_i^T [\varepsilon I - H]^{-1} \mathbf{e}_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, N_{xy}) \quad (1)$$

である。ここで、 $H$  は左右電極または散乱領域のハミルトニアン、 $\varepsilon$  は入射電子のエネルギー、 $I$  は単位行列、 $\mathbf{e}_i$  はグリッド上における  $i$  番目の単位ベクトルである。実空間差分法ではハミルトニアンは大規模疎行列となるため LU 分解法などの直接法では、逆行列の計算を実行することは演算量的にもメモリ容量的にも得策ではない。実際の計算の際には(1)式を以下のシフト線形方程式と呼ばれる大規模線形方程式に置き換えて、大規模かつ疎な行列に適した解法である共役勾配法(CG)法を用いて Green 関数の計算を行うのが一般的である。

$$G_{ij}(\varepsilon) = (\mathbf{e}_i, \mathbf{x}), [\varepsilon I - H] \mathbf{x} = \mathbf{e}_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, N_{xy}). \quad (2)$$

OBM 法や非平衡 Green 関数法では、あるエネルギーを持った電子を入射した際の散乱応答を評価しているため、電子伝導に寄与するフェルミレベル近傍の複数エネルギー点に対して(2)式を解く必要がある。これまで Green 関数の求解に用いていた CG 法では、各エネルギーに対する Green 関数を独立に計算していたため、ここで計算が律速されてしまい大規模な系への輸送特性を評価することは困難であった。この数値解法の1つに、対称行列向けの高速解法である Shifted COCG 法がある。この手法は大規模疎

行列を扱う実空間法に適していること、線形方程式の解法として広く知られている CG 法の考え方を自然に拡張した形式であり、従来の Green 関数計算コードへの組み込みが容易である。本研究では名古屋大学張グループ、鳥取大学星グループと協力して Green 関数の計算手法として Shifted COCG 法を我々の開発している RSPACE に組み込んだ。

Shifted COCG 法による計算速度向上の評価モデルとしてナトリウム単原子鎖を用いた。ここで、原子間距離  $d$  はナトリウム結晶中における最近接原子間距離  $d=7.0$  bohr とした。散乱領域の大きさは、 $L_x=L_y=10.0$  bohr,  $L_z=d$  である。Kohn-Sham 方程式の運動エネルギーの差分近似には中心差分近似を用い、グリッドの間隔は約  $0.5$  bohr とした。また、電子間の交換相関作用には密度汎関数理論の局所密度近似を用い、原子核からのクーロン相互作用にはノルム保存型擬ポテンシャルを用いた。

図 1 に CG 法と Shifted COCG 法の計算速度の比較を示す。CG 法では、各エネルギー一点に対して独立に方程式を解くため、計算時間は点の数にほぼ比例して増加する傾向にある。一方、Shifted COCG 法では、ほぼ横ばいとなっており、点の数に対する依存性は無視できる程度である。エネルギーサンプルが 50 点のとき、約 22 倍の高速化が達成された。

完成させた計算プログラムを用いて、ピーポッドがカーボンナノチューブ電極に挟まれた系で、キャリア電子が内包されたフラーレンによって散乱されることを第一原理計算で明らかにした。このような系は、タイトバインディング法で行われた実績があったが、第一原理計算では計算コストが膨大になるため、扱われた例は私の知る限り皆無である。図 2 に示すように、内包された  $C_{60}$  の 3 つある  $t_{1u}$  準位の縮退が解け、それらに入射電子が散乱され、コンダクタンススペクトルに鋭い 3 つのディップが見られる。Shifted CG 法の導入により、多数のエネルギーサンプリングができ、この様にコンダクタンスが急激に変化する部分の詳細な解析が可能になった。

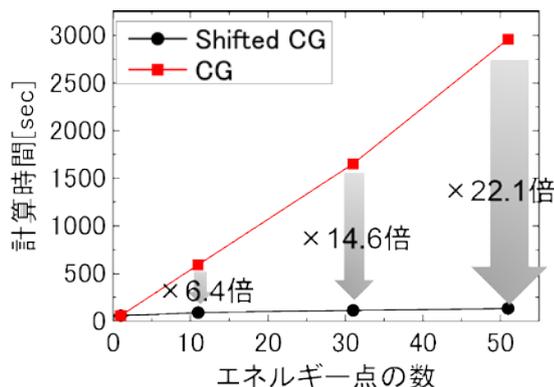


図 1: Shifted CG 法と CG 法の計算時間の比較

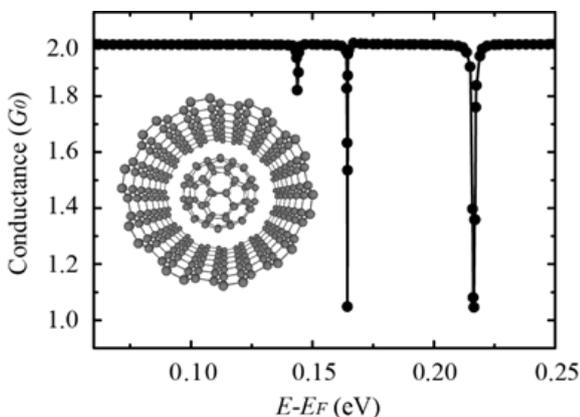


図 2: ピーポッドのコンダクタンス

## 【2】 SiC 基板熱酸化機構のシミュレーション

SiC は、Si に比べて高い熱伝導度、高い絶縁破壊電圧、大きなバンドギャップを持つ。これらに加えて、熱酸化により安定な絶縁膜 SiO<sub>2</sub> が得られることから、次世代のパワーデバイス用材料として期待されている。しかし、Si と異なり MOSFET として使用した場合のキャリア移動度が、バルクのキャリア移動度に比べて極端に低いことが SiC-MOSFET の実用化への課題となっている。これは、熱酸化中に生成された界面欠陥によるキャリア散乱が原因であると考えられている。したがって、MOS 構造作成時に生成される界面欠陥の原子構造の理解と制御は、移動度向上に向けた重要な課題となっている。本研究では、密度汎関数理論に基づく第一原理計算により、4H-SiC(001)基板の熱酸化初期と中期での酸化メカニズムの違いを調べた。

密度汎関数理論計算には、本グループで開発している RSPACE を用いた。スーパーセルの界面平行方向のサイズは 4H-SiC(001) の  $(6 \times 6\sqrt{3})$  セルとし、基板は、初期酸化モデルで Si-C バイレイヤー 6 層分、酸化中期モデルで 4 層分である。基板裏面の C 原子と酸化中期モデルの SiO<sub>2</sub> の未結合手は、水素原子で終端されている。両方のモデルにおいて、SiC の最上面は hexagonal 面である。スーパーセルは、初期酸化モデルで 264 個、酸化中期モデルで 400 個の原子からなる。計算の詳細は、T. Ono and S. Saito, Appl. Phys. Lett. 106 081601 (2015) に記す。

まず、初期酸化モデル表面の SiC 結合の間に一つずつ O 原子を挿入し、酸化エネルギーを調べた。図 3 上段に、酸化中に現れる原子構造を示す。また、酸化エネルギーは、 $E_n^{ox} = E_{(n-1)O} + \mu_O - E_{nO}$  と定義した。ここで、 $n$  は挿入した O 原子の数、 $E_{nO}$  は O 原子を  $n$  個挿入したモデルの全エネルギー、 $\mu_O$  は真空中の O 分子状態における O 原子の化学ポテンシャルである。挿入した O 原子数に対する酸化エネルギーを図 4 に白棒で示す。いずれの場合においても、O 原子挿入により安定化されるので、酸化される傾向にある。次に、酸化中に余分な C 原子が放出されるエネルギーを調べた。ここでは、C

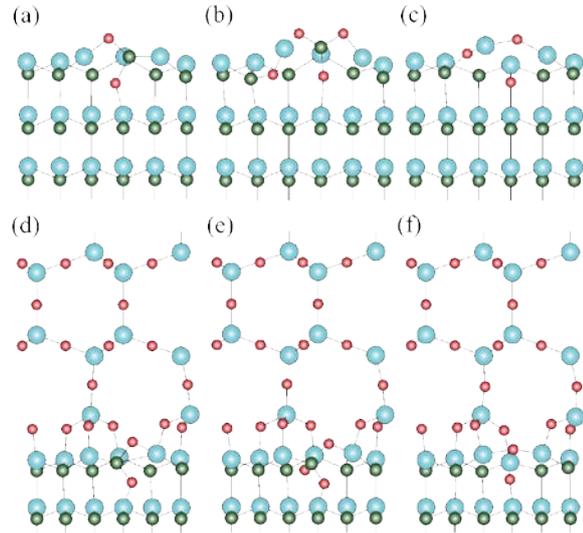


図 3: (上段)4H-SiC(001)表面モデル。(a)  $n=2$ 、(b)  $n=4$ 、(c)CO<sub>2</sub>放出前の  $n=4$ 。(下段)4H-SiC(001)/β-tridymite SiO<sub>2</sub> 界面モデル。(a)  $n=2$ 、(b)  $n=3$ 、(d) CO 放出前の  $n=3$ 。白、緑(大濃灰)、赤(小濃灰)、青(薄灰)の球は、それぞれ H、C、O、Si 原子である。

原子は CO 分子もしくは CO<sub>2</sub> 分子で放出されるものと仮定し、放出エネルギーを  $E_n^{CO_x} = E_{nO}^{w/C} - E_{(n-x)O}^{w/oC} + E_{CO_x}^{total}$  と定義した。ここで、 $E_{nO}^{w/C}$  は C 原子放出前の全エネルギー、 $E_{(n-x)O}^{w/oC}$  は C 原子放出後の全エネルギー、 $E_{CO_x}^{total}$  は放出分子の真空中での全エネルギーである。得られた放出エネルギーを図 4 に灰棒、黒棒で示す。この結果より、初期酸化過程では、O 原子を 4 個挿入した後に CO<sub>2</sub> 分子として放出しやすいことが分かる。

次に、酸化中期過程を模した SiC/SiO<sub>2</sub> 界面の酸化機構を調べた。図 3 の下段に、得られた界面原子構造の例を示す。また、図 5 に酸化エネルギーおよび C 原子放出エネルギーを示す。界面では、O 原子を 3 個挿入した時点で、CO 分子として C 原子を放出する。これは、図 3(f) に示すように、C 放出によりできた未結合手が、2 個の O 原子によって終端されるからである。一方、表面の場合に優勢であった CO<sub>2</sub> の放出は、最優勢ではない。これは、界面では O 原子が不足している状態であるため、C 原子よりも Si 原子の方が O 原子を引き付けるためである。また、O 原子挿入により反応部分の体積が膨張することが予想できるが、表面の場合は体積膨張によるストレスを表面上方に逃がすことができるのに対し、界面では上部に SiO<sub>2</sub> 層があるため上方に逃がすことができない。したがって、界面の方が体積膨張を抑えるため C 原子を放出するストレスが大きいため、O 原子を 3 つ挿入した時点で、C 原子を CO 分子として放出する。初期酸化と酸化中期で、酸化先端部での C 原子の放出機構(O 原子配位数)や界面ストレスが異なることは、実デバイスで観察されている堆積膜で作成された MOS と熱酸化膜で作成された MOS の電気特性の違いを反映しているものと考えられる。

#### 4. 受賞、外部資金、知的財産権等

1. 科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業・さきがけ、小野倫也、代表、2013 年度～2016 年度、「計算科学的手法による省電力・低損失デバイス用界面のデザイン」

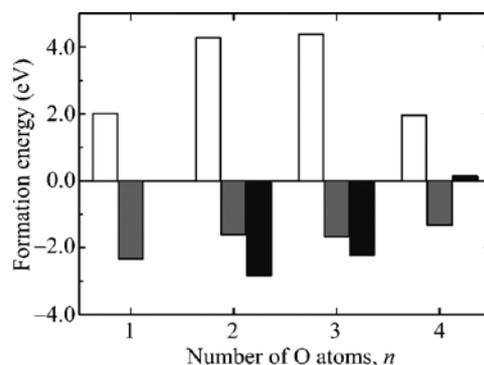


図 4: 初期酸化における酸化エネルギー(白)、CO 分子放出エネルギー(灰)、CO<sub>2</sub> 分子放出エネルギー(黒)。

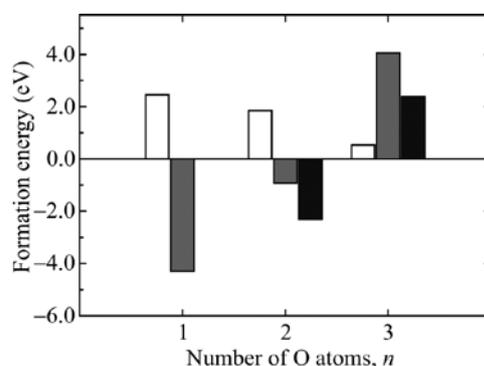


図 5: 酸化中期における酸化エネルギー(白)、CO 分子放出エネルギー(灰)、CO<sub>2</sub> 分子放出エネルギー(黒)。

2. 東京大学、委託研究、小野倫也、代表、2012年度～2015年度、「実空間手法に基づくナノ構造の電子・スピン輸送特性計算コードの開発」
3. 日本学術振興会科学研究費、新学術領域研究（研究領域提案型）計画研究、小野倫也、分担、2010年度～2014年度、「密度汎関数法理論に基づく非平衡ナノスケール電気伝導ダイナミクス」
4. 科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業・CREST、小野倫也、分担、2011年度～2014年度、「ナノとマクロの相界面の物質移動ナノサイクル」
5. 科学技術振興機構、先導的物質変換領域、小野倫也、分担、2012年度～2016年度、「二酸化炭素活性化機構の学理に基づくメタノール室温合成触媒の創成」
6. 文部科学省、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発、小野倫也、分担、2014年度～2018年度、「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」

## 5. 研究業績

### (1) 研究論文

(査読論文)

1. T. Ono, S. Saito, “First-principles study on the effect of SiO<sub>2</sub> layers during oxidation of 4H-SiC”, *Applied Physics Letters*, **106** 081601 1-4 (2015).
2. H. D. Nguyen, T. Ono, “Electron-transport properties of ethyne-bridged diphenyl zinc-porphyrin molecules”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **54** 055201 1-4 (2015).
3. S. Iwase, T. Hoshi, T. Ono, “Numerical solver for first-principles transport calculation based on real-space finite-difference method”, *Phys. Rev. E*, accepted.

### (2) 国際会議発表

(一般講演)

1. T. Ono, “First-Principles Simulation for Oxidation Process of 4H-SiC”, The 17th Asian Workshop on First-principles Electronic Structure Calculations, Nov. 3-5, 2014, Seoul, Korea
2. S. Iwase, T. Ono, “Efficient treatment of the surface Green’s function based on real-space finite-difference scheme”, The 17th Asian Workshop on First-principles Electronic Structure Calculations, Nov. 3-5, 2014, Seoul, Korea
3. C. Kirkham, T. Ono, “Effect of SiC Stacking on the Electronic Properties of the SiC/SiO<sub>2</sub> Interface”, The 17th Asian Workshop on First-principles Electronic Structure Calculations, Nov. 3-5, 2014, Seoul, Korea

4. S. Iwase, T. Ono, "Efficient treatment of the Green's function for first-principles transport calculation", The 2nd International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Dec. 1-3, 2014, Tokyo, Japan
5. T. Ono, "DFT calculations for oxidation of SiC", The 2nd International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Dec. 1-3, 2014, Tokyo, Japan
6. C. Kirkham, T. Ono, "Effect of SiC stacking on the electronic properties of the SiC/SiO<sub>2</sub> interface," The 2nd International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Dec. 1-3, 2014, Tokyo, Japan
7. T. Ono, "Density functional theory study on oxidation of SiC", Semiconductor Interface Specialists Conference, Dec. 10-13, 2014, San Diego, USA
8. C. Kirkham, T. Ono, "Interplay between defects and stacking at the SiC/SiO<sub>2</sub> interface", 17th International Workshop on Computational Physics and Materials Science: Total Energy and Force Methods, Jan. 15-17, 2015, Trieste, Italy
9. T. Ono, "First-Principles Calculation for Thermal Oxidation Process of SiC", 17th International Workshop on Computational Physics and Materials Science: Total Energy and Force Methods, Jan. 15-17, 2015, Trieste, Italy

(3) 国内学会・研究会発表

(招待講演)

1. 小野倫也, "第一原理計算を用いたナノデバイスの機能予測", 応用物理学会関西支部平成 26 年度第 2 回講演会「シミュレーションが先導するエレクトロニクス・フオトニクス研究 ～関西発イノベーションと若手からの発信～」, 2014 年 11 月 12 日, 神戸

(一般講演)

2. 岩瀬滋、小野倫也, "第一原理伝道計算によるピーポッドの輸送特性評価", 応用物理学会 2014 年度秋季大会、北海道大学札幌キャンパス、2014 年 9 月 17-20 日

(4) 著書、解説記事等

1. 小野倫也, "実空間差分法に基づく第一原理輸送特性計算によるナノ構造体の電子輸送特性", シミュレーション, **34** 18-22 (2015).

## VIII 生命物理グループ

教授 重田育照  
助教 庄司光男  
研究員 原田隆平  
学生 大学院生 2 名（前期課程 2 名）、学類生 3 名

### 研究の概要

生命物理学研究グループでは、生体内で重要な働きをしている蛋白質と核酸に注目し、その原子レベルでの特異的機能を理論的に解明することを目的としている。また、理論解析のための計算プログラムの開発も平行して行っている。

#### 【1】タンパク質の折り畳みシミュレーション[文献 3, 6, 15]

タンパク質の機能発現に重要な構造変化は、通常の分子動力学で追跡可能な時間より長時間の確率過程において観測される「レアイベント」である。本年度は、効率的なレアイベント探索のため、(1) 構造変化を誘起する可能性が高い初期構造選択と、(2) 短時間MDによる初期構造の構造リサンプリング過程から成る構造サンプリング手法を提案した。本手法で鍵となるのは、構造変化を誘起する可能性が高い初期構造を適切に選択することである。我々は、タンパク質の構造変化を記述する上で反応座標を定義し、それらに射影された高次元空間における「状態分布の端」に注目する。状態分布における密な領域はクラスタと呼ばれ、準安定状態に対応する。一方、クラスタに属さない状態である「状態分布の端」は遷移状態になりうると仮定し、これらの出現頻度の低い「スパースな分布」をリサンプリングすることで、効率的に構造遷移を誘起できると考えた。クラスタに属さないスパースな分布である「はずれ値」に対応する状態を検出し、短時間MDを用いて構造リサンプリングを繰り返す“Outlier FLOODing Method (OFLOOD)”と呼ぶ構造サンプリング手法を提案した。計算効率の検証として、OFLOODを速く折りたたむ典型的なタンパク質である図 1 の Trp-cage に適用したところ、ナノ秒オーダーの計算時間でフォールディング過程を抽出し、自由エネルギー解析を実行することに成功した。

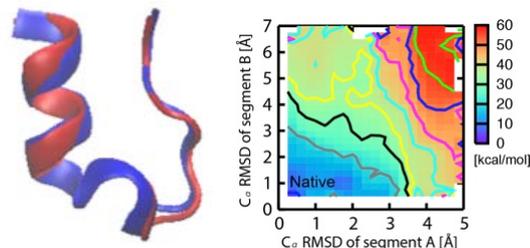


図 1 Trp-cage の折りたたみ構造（青：実験、赤：OFLOOD）と得られた自由エネルギー面

#### 【2】ナイロン分解酵素の酵素反応制御機構の解明[文献 4, 7, 13 15]

酵素利用による物質生産や分解は、酵素の基質選択性に由来する高選択性、および、温和な条件下での反応の進行などの特徴から、低環境負荷の手法として期待されている。しかし、酵

素の機能や物性は生体内環境に最適化されており、工業化するためには酵素の機能制御が不可欠である。近年分子生物学の発展によって、部位特異的のアミノ酸変異実験を中心とした酵素デザインが盛んに行われており、多くのアミノ酸変異のデータが蓄積されている。しかしながら、その手法はランダム変異や結晶から得られた構造情報に基づく経験的なものであり、より効率的な酵素を設計するためにはその機能を詳細に知ることが肝要である。しかし、酵素反応は多段階かつ複雑である上、様々な素過程が存在する。典型的な素過程としては、図2に示すように、(1) ループ部位や基質などの移動により生じる構造変化、(2) 基質を認識する分子認識、(3) 基質に対する化学反応、(4) 反応後のすみやかな脱離である。従来の研究は、基質結合や酵素反応のエナジエティクスを中心になされているが、酵素の機能改善や設計指針を構築する上で、これら全ての情報を正確に記述することが重要である。本発表では、分子動力学 (MD) 法、QM/MM 分子動力学 (QM/MM MD) 法、ならびに、フラグメント分子軌道 (FMO) 法の各種理論計算手法を用いて、右図に構造を示したナイロンオリゴマー分解酵素 (Nyl1B) の機能解析を行ない、アミノ酸残基を置換することによる基質結合・反応における影響を定量的に明らかにした

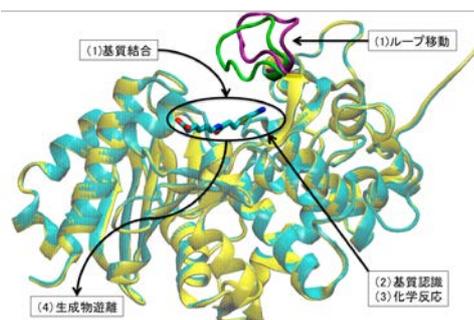


図2 酵素反応の素過程

### [3] 光合成酸素発生中心の電子状態についての理論的研究 [文献 16, 17]

光合成は光エネルギーを化学エネルギーに変換するシステムであり、生命の持つ重要なシステムの1つである。光合成は蛋白質の集合体で構成されており、各蛋白質は光捕集、電子伝達、ATP 生成と糖生成（酸素固定反応）の働きを担っている。電子伝達系を担う光合成システム II では、以下の化学式で示される様な、水を分解し酸素発生を発生する反応を触媒する。



この反応では水から電子を引き抜くため、本反応は極めて難しく、洗練された化学反応機構が予想される。2011年に沈教授（岡大）、神谷教授（大阪市大）により原子分解能(1.9 Å)のX線構造解析がなされ、初めて活性中心構造とその周りの水分子の立体的配置が明らかとなった。OECの活性中心はCaMn<sub>4</sub>O<sub>5</sub>クラスターが歪んだ椅子型構造になっている。反応中間体におけるプロトン化状態については未だ明らかになっていない。

そのため我々はOECの反応機構を解明する為、大規模量子古典混合法(QM/MM)法を用いて高精度理論解析を行った。OEC構造における構造変化をEXAFSとの結果と比較することで、反応中心(CaMn<sub>4</sub>O<sub>5</sub>クラスター)の構造特性、水素結合ネットワーク、及びプロトン化状態について考察した。

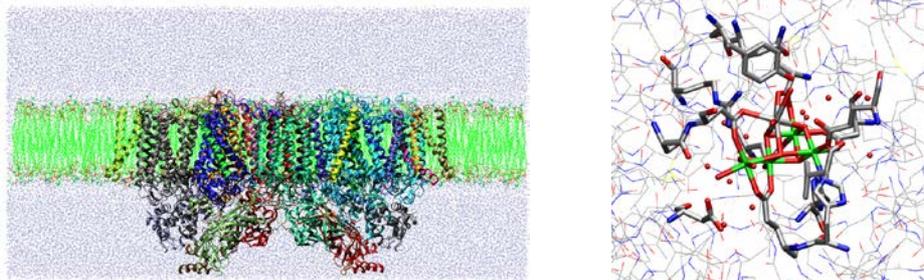


図 3. 光合成システム II(左図)と水分解サイト(右図)

#### [4] 再構成ミオグロビンの円偏光二色性吸収特性[文献 21]

円偏光二色性吸収特性(CD)は蛋白質の構造解析において古くから調べられており、二次構造を容易に調べられる手法として良く知られている。ミオグロビン(Mb)は補因子としてポルフィリンを持ち、酸素貯蔵を行っている。Mb は Soret 帯にポルフィリン由来の特徴的な CD 吸収を持っている。近年、Woody らの理論解析により、Mb の Soret 帯の CD 吸収はポルフィリンのビニル基の配向により決定される事が示唆された。しかしながら、ビニル基をなくした合成ポルフィリンで再構成された Mb でも CD 吸収が発生する事が長井(法政大)、長友(筑波大)らの実験により示された。我々は長井、長友らと連携し、3つの合成ヘムについて理論解析を行い、ポルフィリンのプロピオン酸残基の配向が CD 吸収に大きく影響する事を理論的に示した。本結果は、これまで定性的かつ指紋領域としてしか用いられていなかった CD 吸収特性が、実はポルフィリンの分子配向を大きく反映することを意味している。CD は X 線構造解析に比べ、測定が容易である。そのため、CD 測定は蛋白質全体の二次構造割合の決定のみならず、補因子の分子配向を解析できる手法になりうると予想される。

#### [5] 宇宙生命計算 (宇宙物理分野との共同研究)[文献 22, 23]

近年、系外惑星の発見が多く報告されてきている。ハビタブルゾーン内の惑星観測が成功し、地球に類似した惑星の発見もなされている。それに伴い、惑星のスペクトルから生命の痕跡(バイオマーカー)をいかに検出するかも非常に注目がなされている。バイオマーカーには様々な指標が提案されているが、red edge は、植物の反射スペクトル由来の近赤外領域(700-750nm)に見られる特徴的な急勾配である。この勾配の由来は様々なスケールでの要因が関わっているが、主要な要因としては光合成色素の1つであるクロロフィルの吸収スペクトルがある。

系外惑星における生命指標の可変性を明らかにするためには、地球における red edge 相当のスペクトルの環境依存性を明らかにすることが極めて重要と考えられる。まず始めに、主要な光合成色素の励起スペクトル計算を行い、系外惑星における植物の光吸収効率について考察をおこなった。また、光捕集システムの仕組み解明とその可変性について、光合成システムモデルを構築し、量子動力学計算により理論的検討をおこなった。

宇宙でのアミノ酸生成過程については様々な反応経路が考えられている。我々は、一般的な生成過程に対して反応物及び中間体の生成エネルギーの安定性を評価することで、宇宙におけ

るアミノ酸生成の仕組みの解明を試みた。ヒダントインやアミノニトリルを経由する、グリシンの生成過程について、第一原理計算(密度汎関数法)により反応機構を検討することで、宇宙空間でのグリシン生成機構について明らかにした。

#### <学術論文 (23報)>

1. K. Okuno, Y. Shigeta, R. Kishi, M. Nakano, “Theoretical design of solvatochromism switching by photochromic reactions using donor-acceptor disubstituted diarylethene derivatives with oxidized thiophene rings”, *Physical Chemistry Chemical Physics* **17**, 6484-6494 (2015). DOI: 10.1039/C4CP05946H
2. M. Kayanuma, K. Hanaoka, M. Shoji, Y. Shigeta, “A QM/MM Study of Initial Steps of Catalytic Mechanism of Nitrile Hydratase”, *Chemical Physics Letters* **623**, 8-13 (2015). DOI:10.1016/j.cplett.2015.01.039
3. H. Harada, Y. Takano, T. Baba, Y. Shigeta, “Simple, Yet Powerful Methodologies for Conformational Sampling of Proteins”, *Physical Chemistry Chemical Physics* (**invited feature article**) **17**, 6155-6173 (2015). DOI: 10.1039/C4CP05262E
4. H. Ando, Y. Shigeta, T. Baba, C. Watanabe, Y. Okiyama, Y. Mochizuki, M. Nakano, “Hydration Effects on Enzyme-Substrate Complex of Nylon Oligomer Hydrolase: Inter-Fragment Interaction Energy Study by the Fragment Molecular Orbital Method”, *Molecular Physics* **113**, 319-326 (2015). DOI: 10.1080/00268976.2014.941311
5. R. Nakamura, Y. Shigeta, K. Okuno, M. Fukushima, M. Hasegawa, S. Suzuki, M. Kozaki, K. Okada, M. Nakano, “Substitution Effects on Optical Properties of Iminonitroxide-substituted Iminonitroxide Diradical”, *Molecular Physics* **113**, 267-273 (2015). DOI: 10.1080/00268976.2014.937777
6. H. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, “Enhanced Conformational Sampling Method for Proteins Based on the TaBoo SeArch (TBSA) Algorithm: Application to the Folding of a Mini-protein, Chignolin”, *Journal of Computational Chemistry*, **36**, 763-772 (2015). DOI: 10.1002/jcc.23854
7. T. Baba, M. Boero, K. Kamiya, H. Ando, S. Negoro, M. Nakano, Y. Shigeta, “Unraveling the degradation of artificial amide bonds in nylon oligomer hydrolase: from induced-fit to acylation processes”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **17**, 4492-4504(2015). DOI: 10.1039/C4CP04419C
8. T. Matsui, Y. Kitagawa, M. Okumura, Y. Shigeta, “Accurate Standard Hydrogen Electrode Potential and Applications to the Redox Potentials of Vitamin C and NAD/NADH”, *Journal of Physical Chemistry A*, **119**, 369-376 (2015). DOI: 10.1021/jp508308y

9. Y. Shigeta, H. Harada, M. Kayanuma, M. Shoji, “Quantal cumulant dynamics for real-time simulations of quantum many-body systems”, *International Journal of Quantum Chemistry* (**invited review**), **115**, 300-308 (2015). DOI: 10.1002/qua.24820
10. H. Harada, T. Nakamura, Y. Takano, Y. Shigeta, “Protein folding pathways extracted by Outlier FLOODing method (OFLOOD)”, *Journal of Computational Chemistry*, **36**, 97-102 (2015). DOI: 10.1002/jcc.23773.
11. T. Baba, T. Matsui, K. Kamiya, M. Nakano, Y. Shigeta, "A density functional study on pKa of small polyprotic molecules", *International Journal of Quantum Chemistry*, **114**, 1128–1134 (2014). DOI: 10.1002/qua.24631
12. H. Fukui, S. Takamuku, T. Yamada, K. Fukuda, T. Takebayashi, Y. Shigeta, R. Kishi, M. Nakano, “Open-Shell Character and Second Hyperpolarizabilities of One-Dimensional Chromium(II) Chains: Size Dependence and Bond-Length Alternation Effect“, *Inorganic Chemistry*, **53**, 8700-8707 (2014). DOI: 10.1021/ic501334p
13. T. Baba, H. Harada, M. Nakano, Y. Shigeta, "On the induced-fit mechanism of substrate-enzyme binding structures of Nylon-oligomer hydrolase", *Journal of Computational Chemistry* **35**, 1240-47 (2014). DOI: 10.1002/jcc.23614
14. K. Kamiya, T. Baba, M. Boero, T. Matsui, S. Negoro, Y. Shigeta, “A Nylon-oligomer Hydrolase Promoting Cleavage Reactions in Unnatural Amide Compounds”, *Journal of Physical Chemistry Letters* **5**, 1210-1216 (2014). DOI: 10.1021/jz500323y
15. H. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, “Fluctuation Flooding Method (FFM) for accelerating conformational transitions of proteins”, *Journal of Chemical Physics* **140**, 125103 (2014). DOI: 10.1063/1.4869594
16. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, M. Suga, F. Akita, J-R. Shen, K. Yamaguchi, “On the guiding principles for lucid understanding of the damage-free S<sub>1</sub> Structure of the CaMn<sub>4</sub>O<sub>5</sub> cluster in the oxygen evolving complex of photosystem II”, *Chemical Physics Letters* **627**, 44-52 2015. DOI: 10.1016/j.cplett.2015.03.033
17. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, M. Suga, F. Akita, J-R. Shen, K. Yamaguchi, “Theoretical studies of the damage-free S<sub>1</sub> structure of the CaMn<sub>4</sub>O<sub>5</sub> cluster in oxygen-evolving complex of photosystem II,” *Chemical Physics Letters* **623**, 1-7, 2015. DOI:10.1016/j.cplett.2015.01.030
18. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Umeda, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen, T. Nakajima and K. Yamaguchi, “Theoretical modeling of biomolecular systems I. Large-scale QM/MM calculations of hydrogen-bonding networks of the oxygen-evolving complex of photosystem II”, *Molecular Physics* **113**, 359-384, (2015). DOI:10.1080/00268976.2014.960021
19. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Umena, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen, T. Nakajima, K. Yamaguchi, “Large Scale QM/MM calculations of hydrogen bonding networks for proton transfer and water inlet channels for water oxidation. – Functional Theoretical

- modelings of the oxygen evolving complex of photosystem II”, *Advanced in Quantum Chemistry* **7**, 325-413, 2014. DOI:10.1016/bs.aiq.2014.10.001
20. M. Shoji, Y. Yoshioka, K. Yamaguchi, “An Efficient Initial Guess Formation of Broken-Symmetry Solutions by using Localized Natural Orbitals”, *Chemical Physics Letters* **608**, 50-54, 2014. DOI: 10.1016/j.cplett.2014.05.063
21. M. Nagai, C. Kobayashi, Y. Nagai, K. Imai, N. Mizusawa, H. Sakurai, S. Neya, M. Kayanuma, M. Shoji, S. Nagatomo, “Involvement of Propionate Side Chains of the Heme in Circular Dichroism of Myoglobin: Experimental and Theoretical Analyses”, *Journal of Physical Chemistry B* **119**, 1275-1287 (2015). DOI: 10.1021/jp5086203
22. Y. Komatsu, M. Kayanuma, M. Shoji, K. Yabana, K. Shiraishi, M. Umemura, “Light absorption and excitation energy transfer calculations in primitive photosynthetic bacteria”, *Molecular Physics*, accepted 2015. DOI:10.1080/00268976.2014.998305
23. Y. Komatsu, M. Umemura, M. Shoji, M. Kayanuma, K. Yabana, K. Shiraishi, “Light absorption efficiencies of photosynthetic pigments: the dependence on spectral types of central stars”, *International Journal of Astrobiology*, accepted 2015.  
DOI:10.1017/S147355041400072X

#### <学位論文>

##### a) 修士論文（2件）

- ・ 氏家謙「トレオニン合成酵素における基質特異性決定過程の理論解明：熱力学積分法による自由エネルギー解析」
- ・ 田中弥「ウリジンシチジンキナーゼの基質認識機構についての理論的解明」

##### b) 卒業研究（3件）

- ・ 張致遠「短時間主成分分析を用いたタンパク質運動モードの粗視化」
- ・ パク・ジョンヒョク「ヘムの円偏光二色性吸収特性についての理論的計算」
- ・ 田村奈々「分子動力学法によるアミロイド形成過程の構造サンプリング」

#### <講演>

##### a) 国内・口頭（11件中、招待講演10件）

1. 重田育照、“第一原理計算によるタンパク質の  $pK_a$  と構造機能相関”、日本物理学会シンポジウム「プロトネーション イントゥ ダークネス: 生体分子機能理解の為の水素位置情報」、March 21<sup>st</sup>-24<sup>th</sup> 2015、早稲田大学、東京.
2. 重田育照、「高分散分子動力学法によるタンパク質でのレアイベントの検出」、レアイベントの理論科学ワークショップ（招待）、February 16<sup>th</sup> 2015、日本原子力研究開発機構システム計算科学センター、千葉.
3. 重田育照、「理論と実験の協奏的アプローチによる複合スピン励起子変換制御」、新学術領域研究「高次複合光応答」第2回公開シンポジウム（招待）、January 23<sup>rd</sup>-24<sup>th</sup> 2015、

千里ライフサイエンスセンター、大阪。

4. 重田育照、「酵素活性制御に向けた多階層量子計算手法の応用」、理研シンポジウム「生体分子系量子化学計算の最前線」(招待)、January 22<sup>nd</sup>-23<sup>rd</sup> 2015、理化学研究所、和光。
5. 重田育照、「宇宙生命連携研究による物質進化過程の探索」27回理論懇シンポジウム(招待)、December 24<sup>th</sup>-26<sup>th</sup> 2014、国立天文台、東京。
6. 重田育照、「第一原理計算に基づくタンパク質機能デザイン」、第8回FMO研究会(CBI学会2014年大会)(招待)、October 28<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> 2014、タワーホール船堀、東京。
7. 重田育照、「CMDの発想に基づく生命物理の研究」第25回CMDワークショップ(招待)、September 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup> 2014、国際高等研究所、奈良。
8. 重田育照、「計算化学による $pK_a$ の高精度算出法」、第1回水和ナノ構造研究会(招待)、August 28<sup>th</sup>-29<sup>th</sup> 2014、奥平温泉、岩手。
9. 庄司光男、「宇宙空間でのアミノ酸生成についての理論的研究」、実験・観測・計算シナジーによる自然界における生体分子の非対称性起源の解明(招待)、自然科学研究機構、2014/11/29。
10. 庄司光男、「QM/MM法による酵素反応機構の理論的解明」、CUTE Mini-Workshop, 三重大学(招待), May 21<sup>st</sup> 2014。
11. 庄司光男、氏家謙、田中弥、栢沼愛、梅田宏明、村川武、林秀行、重田育照、「QM/MM法によるトレオニン合成酵素の反応制御機構の理論解明」、理論化学討論会、名古屋大学、口頭、2014/5/22。

#### b) 国内・ポスター (11件)

1. 庄司光男、氏家謙、田中弥、栢沼愛、梅田宏明、重田育照、村川武志、林秀行、トレオニン合成酵素における生成物支援触媒機構解明のための精密自由エネルギー計算、日本生化学会大会、ポスター、2014/10/15。
2. 田中弥、氏家謙、友池史明、庄司光男、栢沼愛、増井良治、倉光成紀、重田育照、ウリジンシチジンキナーゼ中のウリジンのプロトン化状態についての理論的研究、日本生化学会大会、ポスター、2014/10/15。
3. 氏家謙、田中弥、庄司光男、栢沼愛、重田育照、町田康博、村川武志、林秀行、トレオニン合成酵素における反応中間体の自由エネルギー変化についての理論解析、日本生化学会大会、ポスター、2014/10/15。
4. 栢沼愛、庄司光男、重田育照、ニトリルヒドラターゼの触媒機構に関する理論的研究、分子科学討論会、ポスター、2014/9/21。
5. 庄司光男、田中弥、氏家謙、栢沼愛、梅田宏明、重田育照、中野祥吾、片柳克夫、同化型亜硝酸還元酵素における全化学反応の理論的解明、分子科学討論会、口頭発表、2014/9/21。

6. 梅田宏明、埜敏博、庄司光男、朴泰祐、重田育照、GPGPU 化 Fock 行列計算ルーチンの OpenFMO への組み込み、分子科学討論会、ポスター、2014/9/21.
7. 田中 弥、氏家 謙、友池 史明、栢沼 愛、増井 良治、倉光 成紀、庄司 光男、”ウリジンシチジンキナーゼ基質のプロトン化状態についての理論的検討”、第 14 回蛋白質科学会、横浜、ポスター、2014/6/25-27.
8. 氏家 謙、田中 弥、栢沼 愛、町田康博、村川 武志、庄司 光男、”熱力学積分法によるトレオニン合成酵素の基質結合自由エネルギー評価”、第 14 回蛋白質科学会、横浜、ポスター、2014/6/25-27.
9. 庄司 光男、田中 弥、氏家 謙、栢沼 愛、梅田 宏明、中野 祥吾、片柳 克夫、”同化型亜硝酸還元酵素の反応機構の理論的解明”、第 14 回蛋白質科学会、横浜、ポスター、2014/6/25-27.
10. 原田隆平、鷹野優、重田育照、”蛋白質構造揺らぎを用いた構造変化加速法:FFM”、第 14 回蛋白質科学会、横浜、ポスター、2014/6/25-27.
11. 梅田宏明、庄司光男、埜敏博、朴泰祐、”GPGPU 化した Fock 行列計算ルーチンの OpenFMO への組み込み”、日本コンピュータ化学会(春)、東工大、2014/5/29, 30.

**c) 国際・口頭 (7 件中、招待講演 6 件)**

1. Y. Shigeta, “A Molecular Design of Nonlinear Optical Properties and Conductivity Switches on the Basis of Open-shell Nature”, *2014 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)*, (**Invited**), Nov. 30<sup>th</sup>-Dec. 5<sup>th</sup> 2014, Hawaii, USA.
2. Y. Shigeta, “Protein Folding Processes Detected by Enhanced Sampling Techniques”, *19<sup>th</sup> International Workshop on Quantum Systems in Chemistry and Physics*, (**Invited**), Nov. 11<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> 2014, Tamsui, Taiwan.
3. Y. Shigeta, “Towards Theoretical Design of Catalytic Activities of Enzymes”, *The Asia Hub for e-Drug Discovery Symposium 2014*, (**Invited**), Nov. 11<sup>th</sup>-12<sup>th</sup> 2014, Sichuan University (SCU), Chengdu, China.
4. Y. Shigeta, “First-principles analysis on enzymatic degradation of nylon”, *2<sup>nd</sup> World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering*, (**Invited**), Oct. 27<sup>th</sup>-29<sup>th</sup> 2014, Las Vegas, USA.
5. Y. Shigeta, “Computational Studies on Redox Potential of Metal Complexes and Model Cofactors”, *International Conference on Synthetic Metals*, (**Invited**), June 30<sup>th</sup>-July 5<sup>th</sup> 2014, Turku, Finland.
6. M. Shoji, Y. Ujiie, W. Tanaka, M. Kayanuma, R. Harada, H. Umeda, Y. Shigeta, T. Murakawa, H. Hayashi, “QM/MM study of the L-threonine formation reaction of threonine synthase: mechanism of the product-assisted catalysis”, *Computational Science Workshop 2014*, (**Invited**), August 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> 2014, Tsukuba.
7. M. Shoji, “A development of the computational biosciences with supercomputers”, *AWEST2014*, (**Invited**), June 17<sup>th</sup> 2014, Awaji Island.

#### d) 国際・ポスター (6 件)

1. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, “A QM/MM study of amide formation reaction of Nitrile Hydratase”, *The 53<sup>rd</sup> Annual meeting of the biophysical Society of Japan*, Oct. 15<sup>th</sup> 2014, Poster.
2. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, “Theoretical investigation on the conformation-charge relationship of the photosystem II oxygen evolving complex (PSII-OEC)”, *The 53<sup>rd</sup> Annual meeting of the biophysical Society of Japan*, Oct. 15<sup>th</sup> 2014, Poster.
3. M. Shoji, Y. Ujiie, W. Tanaka, M. Kayanuma, R. Harada, H. Umeda, Y. Shigeta, T. Murakawa, H. Hayashib, “QM/MM study on the L-threonine formation reaction of threonine synthase”, QSCP XIX Taipei, Poster, Nov. 17<sup>th</sup> 2014.
4. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, “Theoretical study of the reaction mechanism of nitrile hydratase”, *Computational Science Workshop 2014*, Tsukuba, Aug 21<sup>st</sup> 2014, Poster.
5. Y. Ujiie, W. Tanaka, M. Shoji, R. Harada, M. Kayanuma, Y. Shigeta, T. Murakawa, H. Hayashi, “Free energy calculations of intermediate states of threonine synthase”, *Computational Science Workshop 2014*, Tsukuba, Aug 21<sup>st</sup> 2014, Poster.
6. W. Tanaka, Y. Ujiie, F. Tomoike, M. Shoji, M. Kayanuma, R. Masui, S. Kuramitsu, Y. Shigeta, “A theoretical study on interactions between uridine-cytidine Kinase and its Substrate”, *Computational Science Workshop 2014*, Tsukuba, 2014/8/21, Poster.

#### <著書 (2 報)>

1. 著書分担、4-1 節 (重田育照)、5-1 節 (庄司光男)、金属錯体の量子・計算化学、三共出版株式会社. ISBN: 9784782707098
2. 梅田宏明, 埜敏博, 庄司光男, 朴泰祐, 重田育照, “GPGPU クラスタ上での FMO 計算の性能評価”, (日本コンピュータ化学会 2014 秋季年会 精選論文 特集号) *Journal of Computer Chemistry Japan (invited letter)* **13**, 323-324 (2014) . DOI: 10.2477/jccj.2014-0053

#### <集中講義 (3 件)>

1. 重田育照、金沢大学理学部計算科学科 学部学生 集中講義 (1 コマ)
2. 重田育照、大阪大学大学院基礎工学研究科 大学院前期課程 「物性反応量子化学」 (5 コマ)
3. 重田育照、大阪大学基礎工学部 学部 3 回生 「化学反応論」 (1 5 コマ)

#### <外部資金獲得 (5 件)>

1. 新学術領域研究「コンピューティクス」公募研究：重田育照 (代表者) (平成 25～26 年度) 「Si ナノドットの非線形光学特性変化に対する動力学的解析」

2. 新学術領域研究「動的秩序と機能」公募研究：重田育照（代表者）（平成26年度）「キミュラント粗視化動力学によるタンパク質動的秩序形成過程の理論研究」
3. 新学術領域研究「複合光応答」計画研究：重田育照（代表者）（平成26～30年度）「実験と理論の協奏的アプローチによる多重スピン励起子変換制御」
4. 基盤研究 C：庄司光男（代表者）（平成26年度～28年度）「トレオニン合成酵素の全反応機構の理論的解明」
5. 若手研究（B）：原田隆平（研究代表者）（平成26年～28年度）「タンパク質構造揺らぎに基づく構造変化予測法の構築」

#### <その他>

##### a) シンポジウム（1件）

1. 「蛋白質構造と機能研究の分子シミュレーション計算アルゴリズム」、講演者：米澤康滋、計算生命科学 WG 第5回講演会、世話人：庄司光男、計算科学研究センター会議室 A、2014/11/29.

##### b) プレス発表（1件）

1. 「神奈川工科大と阪大、筑波大、兵庫県立大、仏 Strasbourg 大など、人工物質ナイロンオリゴマー分解酵素の反応の仕組みをスパコンで解明」日系バイオテク Online <https://bio.nikkeibp.co.jp/article/news/20140419/175556/>

## IX-1. 磁性物性グループ

准教授 小野田 雅重

大学院生 6名 (数理物質科学研究科後期課程1名, 前期課程5名)

卒研究生 4名

遷移金属化合物における機能性物質系 (二次電池, 熱電変換など), 相関電子系 (新型超伝導) ならびに量子スピン系 (幾何学的競合系) を対象とした, 結晶構造と巨視的・微視的物性の包括的理解.

この報告書では, 本グループによる「バナジウムポリアニオン系」, 「バナジウムセラミックス系」, 「コバルトセラミックス系」などの研究状況を簡潔に整理する. 2014年度, 本グループが対象とした物質群を図1に示す.

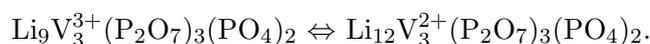
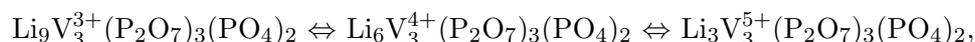
### 【1】バナジウムポリアニオン系

二次電池正極性能を示す物質系として, 2010年度より, ポリアニオン系を対象とした研究を開始した. 実用的目標は充放電のサイクル特性向上と高容量化である. 過放電試料は, 一般に  $V^{2+}$  あるいは  $V^{3+}$  のみからなる高密度電子系に対応し, 量子スピン系あるいは相関電子系における物質探索の観点からも大変興味深い. 充放電された物質系は, 一般の固相反応では得がたいので, その結晶構造および物性を多角的に追究した例はほとんどない.

本研究室で発明された次世代二次電池正極材料  $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  の初充電は2電子反応を示し, 容量  $C \approx 170 \text{ A h kg}^{-1}$  を与える. 次世代正極材料に属するバナジウムポリアニオン系では, 単斜晶  $Li_xV_2(PO_4)_3$ , タボライト型  $LiVFPO_4$  などが挙げられるが, 上記の結果は, これらの性能に匹敵しており, 今後の研究が重要である. 以下では物質ごとに節を分けて紹介する (論文1)

#### (1) $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ( $3 \leq x < 12$ ), $Li_{9-x}Ag_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ( $0 \leq x < 1$ )

$Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  の充放電過程は, それぞれ  $V_3P_8O_{29}$  当り3モル以上のLi脱離および3モル程度のLi挿入に対応する:



X線四軸回折の手法により, これまでに母物質および充電・放電組成の精密構造を決定するとともに, Liの拡散径路を決定した. いずれの組成においてもVイオンの結晶場は中間的であり, Li脱離相における強磁性状態およびV原子のイオン性と充放電電位の関係を明らかにした (論文1, 3)

$Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  の充放電特性改良のため, 酸素欠損系およびLi-Ag部分置換系などを創製し, その電氣的・磁氣的性質と充放電過程の詳細を検討した (論文3; 学位論文1; 学会発表5; 継続)

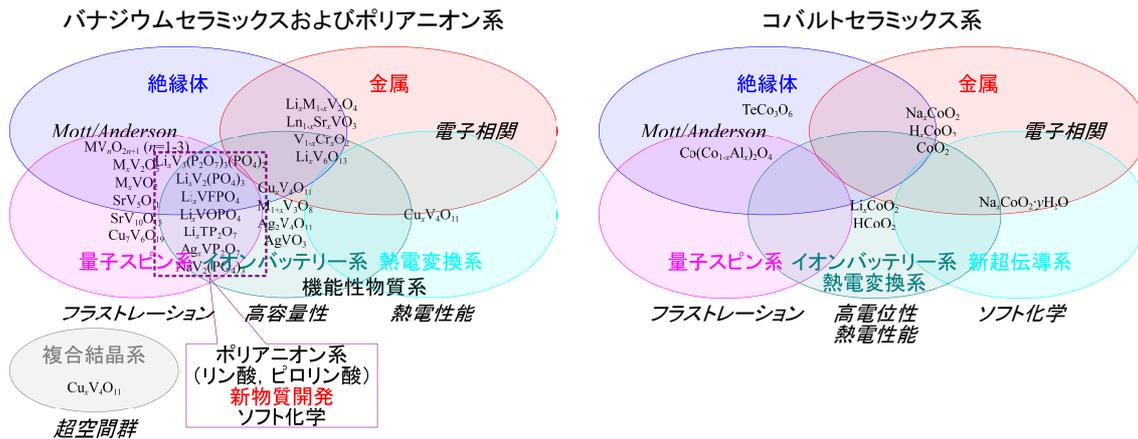


図 1: 2014 年度, 本グループが研究対象としたバナジウムセラミックス系, ポリアニオン系ならびにコバルトセラミックス系の物質群.

(2)  $Ag_xVP_2O_7$  ( $0.7 \leq x \leq 1$ )

Li イオン二次電池あるいは固体二次電池への応用を念頭に,  $Ag_xVP_2O_7$  系 ( $0.7 \leq x \leq 1$ ) を開発した. V イオンの結晶場が中間的結晶場にあり, 基底一重項であることを指摘するとともに,  $Ag$  欠損が  $V^{3+}$ ,  $V^{5+}$  の電荷分離を生むことを示唆した (論文 4; 学会発表 3)

(3) タボライト型  $Li_xVFPO_4$  ( $0 \leq x \leq 2$ ),  $Li_xVOPO_4$  ( $0.9 < x \leq 1$ )

三斜晶  $Li_xVOPO_4$  は高温で 1 次元磁性を示し, 10 K で一種のスピンプイエルス状態に転移する. また 1 次元常磁性状態とスピンプイエルス状態の間にスピンの 2 量体のゆらぎが存在する. 一方,  $Li_xVFPO_4$  の  $x = 1$  組成は, 11 K で低次元スピ系特有の帯磁率極大をもち, 9.8 K で反強磁性転移を示す. スピンドイナミクスは, 反強磁性転移点の周りで臨界発散を示し, さらに低温では基底 1 重項状態に起因した活性化型の温度変化をもつことがわかった. (論文 1, 5; 学会発表 2, 4; 特願 1; 継続)

(4) NASICON 型  $Na_xV_2(PO_4)_3$  および関連系

超イオン導電体 (NA Superior Ionic CONductor)  $Na_3Zr_2PSi_2O_{12}$  と類似の結晶構造をもつ  $Na_3V_2(PO_4)_3$  の合成, 電気的・磁氣的性質の評価ならびに NMR による微視的解析を行った. またイオン交換法により  $Ag_3V_2(PO_4)_3$  および  $Li_2NaV_2(PO_4)_3$  を合成し, それらの磁氣的性質を評価した. 本系はハニカム格子が 3 次元的に強く結合した系とみることができ, 基底 1 重項  $V^{3+}$  イオンの 2 量体モデルがよい近似になることがわかった. さらに NASICON 関連系として新物質を開発した (論文 2; 学会発表 1, 6; 継続)

【2】バナジウムセラミックス系

(1) 機能性物質系

$Cu_xV_4O_{11}$  系は, その結晶構造および物性の特異性に基づいて, 2006 年に多機能性複合結晶として発表した研究室オリジナルの物質系で, リチウム二次電池正極活物質であり熱電

変換材料である．最近，微視的見地から解明した Cu の高速イオン振動に基づき，新しい機能性として固体電池用正極あるいは固体電解質への応用を指摘した．現在，その基礎となる実験が進行中である．

並行して，高容量性を示すリチウム二次電池正極活物質  $\text{Li}_x\text{V}_3\text{O}_8$  系および  $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$  系の研究を再開した（論文 1；継続）

## (2) 金属 – 絶縁体転移系

スピネル格子型  $\text{Li}_x\text{Zn}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ ，複合結晶型  $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ ， $\text{Li}_x\text{V}_6\text{O}_{13}$  などにおける Anderson 型あるいは電子相関型金属 – 絶縁体転移機構の解明（保留）

## (3) 量子スピン系

幾何学的競合系として，主にスピネル格子と三角格子を対象に研究を進めている：スピネル格子型  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$  では，交換歪型 Jahn-Teller 秩序相，反強磁性秩序相（軌道秩序効果との競合）およびスピングラス相の組成依存性の検討；三角格子型  $\text{Li}_x\text{VO}_2$  では，常磁性相における擬 3 量体模型の構築およびスピン 1 重項 3 量体転移に関する構造解析；三角格子型  $\text{Na}_x\text{VO}_2$  では， $x = 1$  の超常磁性転移機構と  $x \approx 0.7$  のスピン  $\frac{1}{2}$ -3 量体転移機構に関する NMR（保留）

### 【3】コバルトセラミックス系

二次電池正極の代表である三角格子型  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  系には，組成変化による金属 – 絶縁体転移現象や量子スピン効果などの問題がある．

これまでに  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  ( $0.5 < x \leq 1$ ) および  $x = 0$  の構造・物性研究を行ってきたが，本年度は  $0 < x < 0.5$  を対象に NMR を行った．また  $\text{LiCoO}_2$  のソフト化学処理により得られる  $\text{CoO}_2$  の積層不整および弱相関金属性に基づく電気 2 重層キャパシタの評価を行った（継続）

### 【4】その他の遷移金属化合物系

#### (1) ペロブスカイト格子 $\text{SrTiO}_3$ および関連系 $\text{BaTiO}_3$ ， $\text{Sr}_2\text{TiO}_4$

熱電変換材料の開発を念頭に，これまでにペロブスカイト型セラミックス  $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$  系などの輸送機構を検討してきた．現在は， $\text{BaTiO}_3$  の最高安定相である六方晶型  $\text{BaTiO}_{3-\delta/2}$  およびペロブスカイト関連格子  $\text{Sr}_2\text{TiO}_4$  の結晶構造と電子状態に関して，広い酸素濃度領域にわたって検討を行っている（保留）

#### (2) 三角格子 $\text{Li}_x\text{NiO}_2$

幾何学的フラストレーション効果，二次電池などの観点から  $\text{LiNiO}_2$  およびその Li 欠損系に注目している．ソフト化学的手法により得られた試料の伝導機構に関しては一定の理解が得られたが，本系の物性理解をさらに進めるため，試料の質を高める工夫を行っている．（保留）

〈 論 文 〉

1. 小野田雅重, 機能性バナジウム酸化物およびポリアニオン系の結晶構造, 電子状態ならびにスピンドYNAMIX  
日本結晶学会誌 **56** (2), 78-84 (2014).
2. 小野田雅重, ナシコン型  $M_3V_2(PO_4)_3$  系の結晶構造とスピンドYNAMIX  
第 17 回超イオン導電体物性研究会講演集 (2014) pp. 7-10.
3. Masashige Onoda, Makoto Inagaki, and Hiroaki Saito, Crystal structures and electronic properties for the over-lithiated and Li-Ag substituted phases of  $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  insertion electrode system  
Journal of Solid State Chemistry **219**, 220-227 (2014).
4. Masashige Onoda and Takuma Sakamoto, Crystal structure and orbital-singlet state of  $Ag_xVP_2O_7$   
Journal of Solid State Chemistry **220**, 132-136 (2014).
5. Masashige Onoda and Takehiko Ishibashi, Phase transition and spin dynamics of the  $LiVFPO_4$  insertion electrode with the  $S = 1$  linear chain and the development of F-O mixed system  
Journal of the Physical Society of Japan **84** (4), 044802 [5pp] (2015).

〈 学位論文 〉

1. 齋藤裕亮, リチウムイオン二次電池正極  $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  の元素置換効果  
数理解析科学研究所修士 (理学) 論文, 2014 年 3 月  
バナジウムポリアニオン系の一つである  $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  を対象に, 電気伝導性の改善, 充放電容量の向上あるいは固体電池への応用を念頭におき, Li-Ag 部分置換系および酸素脱離系の試料を作成し, それらの帯磁率, 電気抵抗率ならびに充放電特性の測定を行った. 帯磁率の解析から,  $V^{3+}$  イオンの  $g$  因子の減少が明らかになり, 結晶場が母物質の場合と同様に Russel-Saunders 結合を壊すほどには大きくないことがわかった. また Li-Ag 置換量に依存して, 充電過程における平坦電位領域が増加し, 電子伝導性が低下することが明らかになった. さらに酸素脱離系では, 電気容量の増加を確認した.

〈 学会発表など 〉

1. 小野田雅重, ナシコン型  $M_3V_2(PO_4)_3$  系の結晶構造とスピンドYNAMIX  
第 17 回超イオン導電体物性研究会 102, 日本大学生産工学部, 千葉県習志野市, 2014 年 7 月 18 日
2. 石橋剛彦, 小野田雅重, タボライト型  $Li_xVFPO_4$  系の結晶構造と磁性  
日本物理学会 2014 年秋季大会 7aPS98, 中部大学春日井キャンパス, 愛知県春日井市, 2014 年 9 月 7 日
3. 小野田雅重, 坂本拓磨, 新型ピロリン酸バナジウム銀系の結晶構造と軌道一重項状態  
日本物理学会 2014 年秋季大会 7aPS99, 中部大学春日井キャンパス, 愛知県春日井市, 2014 年 9 月 7 日
4. 石橋剛彦, 小野田雅重, タボライト型  $Li_xVPO_4F$  系の結晶構造とスピンドYNAMIX  
日本物理学会第 70 回年次大会 21aPS83, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2015 年 3 月 21 日
5. 齋藤裕亮, 小野田雅重,  $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$  の Li-Ag 置換系の結晶構造と磁性  
日本物理学会第 70 回年次大会 21aPS84, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2015 年 3 月 21 日
6. 小野田雅重, 金沢浩紀, ナシコン型  $Na_3V_2(PO_4)_3$  の結晶構造とスピンドYNAMIX  
日本物理学会第 70 回年次大会 21aPS85, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2015 年 3 月 21 日

〈高校生・中学生対象授業，講演など〉

1. 小野田雅重, 次世代二次電池正極材料の開発  
科学技術週間事業－環境・エネルギーのための科学と技術：体験実験とポスター展, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2014年4月19日
2. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学  
平成26年度受験生のための筑波大学説明会, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2014年8月23日
3. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学 - 物理学の基礎から学際領域研究まで -  
若い世代のための出前講義, 宮古高等学校, 岩手県宮古市, 2014年9月24日
4. 小野田雅重, 物性物理：物性実験研究と物質科学 - 物理学の基礎から学際領域研究まで -  
APサイエンス学習会, 茗溪学園高等学校, 茨城県つくば市, 2014年10月19日

〈産学連携など〉

1. 小野田雅重, バナジウムホスフェート正極に関する共同研究(2013–2014)

〈特許公開・出願〉

1. 小野田雅重, 組成物, リチウムイオン二次電池用電極, リチウムイオン二次電池及び組成物の製造方法, 特願2014-249869

〈特記事項〉

1. 小野田雅重, 遷移金属酸化物系の研究, Marquis Who's Who in the World 2015 (32th Edition), 2014年11月

## IX-2 ナノフォトニクスグループ

名誉教授	舛本 泰章
准教授	池沢 道男
講師	久保 敦
助教	富本 慎一
大学院生	9名
卒研究生	4名

### 【1】量子ドットの分光研究（池沢道男、舛本泰章）

(1) CdS 量子ドット・電荷アクセプター（受容体）複合系中の電子スピン回転（舛本泰章, 海野晃, 鈴木栄里）

フェムト秒時間分解ファラディ回転法により、室温・横磁場中で CdS 量子ドットと CdS 量子ドット・電荷アクセプター（受容体）複合系中の電子スピンの回転を観測した。CdS 量子ドットと CdS 量子ドット・電荷アクセプター（受容体）複合系は化学的に成長させ、結合させたもので、トルエン溶液を試料とした。観測される時間分解ファラディ回転信号に、電子スピンの回転は 1ns 程度まで長く続く振動構造を与え、磁場の強さに比例したスピン回転周波数は g-因子として  $1.965 \pm 0.006$  を与えた。ファラディ回転信号中の非振動成分は励起子のスピン分極からなり、CdS 量子ドットに比べて CdS 量子ドット・電荷アクセプター（受容体）複合系ではわずかに減衰が速くなり CdS 量子ドット・正孔アクセプター（受容体）複合系では大きく減衰が速くなる。電子スピンの回転信号は CdS 量子ドットが分子リンカーを介して TiO<sub>2</sub> 電子アクセプター（受容体）に結合しているときには増強されスピン緩和時間は室温でも  $T_2^* = 450\text{ps}$  まで長くなる。CdS 量子ドットと TiO<sub>2</sub> 電子アクセプター（受容体）の複合系では、CdS 量子ドット中に光励起された電子・正孔対から電子のみが TiO<sub>2</sub> に移り、励起レーザーパルス列の次のレーザー光パルスが量子ドットを励起したときまでかなりの数の CdS 量子ドット中に正孔が残留し、この中に電子 1 つと互いに反平行なスピンをもった 2 つの正孔が結合した正のトリオンが形成される。正のトリオンのスピンと同じとなる電子スピンの回転は前の光励起の後に残留した正孔から正のトリオンへの光励起遷移により開始される。量子ドットに正孔をドープすることで電子スピンの回転信号を増強することが示された。

(2) 量子ドットの基礎と応用（舛本泰章）

『量子ドットの基礎と応用』の書籍を執筆した。裳華房から 2015 年秋に出版される予定である。目次は、1 章 人工原子、量子ドットとは何か 2 章 量子ドットの形成 3 章 量子サイズ効果 4 章 エネルギー離散化と反転分布：レーザーへ 5 章 表面を通じた化学結合：蛍光イメージングへ 6 章 外界との相互作用：光多重メモリーへ 7 章 量子ドットの光非線形：光スイッチ、高効率太陽電池へ 8 章 電子状態のコヒーレンスとコヒーレント制御：量子計算へ 9 章 スピンに依存したエネルギー微細構造とスピン緩和時間 10 章 量子力学の応用：量子計算と量子通信 11 章 量子ドットの太陽電池と発光ダイオードへの応用 からなる。

(3) 2 種類の等電子トラップに束縛された励起子の位相緩和メカニズム（張遼, 池沢道男, 佐久間芳樹<sup>A</sup> A物質・材料研究機構）

等電子トラップに束縛された励起子の位相緩和機構を解明することは、物理的な興味だけではなく、応用上も放射された光子の干渉性に関わるため重要である。昨年度までの GaAs 中の窒素等電子トラップに関する位相緩和の研究から、発光エネルギーや微細分裂が同じとみなせる多数の NN<sub>A</sub> 発光中心の間でも低温での位相緩和時間にはばらつきがあることが分かった。このため、低温での位相緩和には発光中心の周りの電荷揺らぎなど外因性のメカニズムが主に寄与していると考えられ

た。

低温極限だけでなく、温度上昇に伴う位相緩和メカニズムについての知見を得るために、エネルギーの揃わない $N_x$ と、エネルギーの揃った $NN_A$ の2種類の発光中心について、位相緩和時間の温度依存性を複数の発光中心について15K程度まで比較した。 $N_x$ 発光中心の位相緩和時間は温度上昇と共に急速に短くなるが、その温度依存性は発光中心間で大きなばらつきが見られた。他方、 $NN_A$ 発光中心の位相緩和時間の温度依存性は、複数の $NN_A$ 発光中心間でよく揃っていた。このことは、温度上昇に伴う位相緩和メカニズムは、発光中心に束縛された励起子の微細構造に依存していることを示しており、フォノンの吸収・放出を介した励起子基底状態と励起状態の間の散乱が主な位相緩和メカニズムと判明した。以上のような議論は、同じエネルギー構造を持つ多数の2準位系が利用できる発光中心を用いて初めて可能になった事であり、大きな意義がある。一方、実験結果を再現する活性化エネルギーが、発光スペクトルに見られる励起子微細分裂エネルギーに比べてずっと大きい値になっているなど、単純なモデルとの間で不一致も見られている。

(4) 単一等電子トラップのRabi振動 (池沢道男, 張遼, 安田直人, 佐久間芳樹<sup>A</sup> A物質・材料研究機構)

単一の2準位系を共鳴励起する事は、量子状態の光によるコヒーレント操作の他、**indistinguishability**の高い優れた単一光子発生のための励起方法としても重要であることが分かってきた。昨年度まで、狭線幅の連続光を用いて、GaAs中の窒素等電子トラップについて、試料側面からの励起法を行って、単一発光中心の共鳴励起に成功し、非古典光の発生も確認していた。今年度、励起光をピコ秒パルス光に変え、強い電場強度を利用したRabi振動の観測を試みた。Rabi振動は共鳴する光が引き起こす2準位系のコヒーレントなポピュレーション振動で、我々の観測法では、励起強度を上げた時に、その電場強度に対して $\sin^2$ の依存性をもって共鳴蛍光強度が振動する事を指す。2psのパルス幅を持つ波長835nmのパルス光を、5Kに冷却したGaAs中の $N_x$ 発光中心に当てたところ、励起強度を増加させた時に、共鳴蛍光強度が最大値を取った後で減少する様子が観測された。実際に周期的な振動を示すことまでは確認できていないが、この減少が試料の温度上昇などによるものでないことは確認しており、 $N_x$ 発光中心のRabi振動が観測されたものと考えられる。

(5) フォトニック結晶と結合させた等電子トラップからの非古典光発生 (池沢道男, 佐久間芳樹<sup>A</sup>, 迫田和章<sup>A</sup>, 杉本喜正<sup>A</sup>, 張遼, 山田雄太<sup>A</sup> A物質・材料研究機構)

2次元フォトニック結晶を用いた微小共振器を単一の等電子トラップの周りに作製し、パーセル効果を利用した発光寿命の短縮のための研究を行った。これまでに研究例のある量子ドットと比べて、エネルギーのそろった等電子トラップでは、再現性良く共振器モードと結合させることが期待できる。この手法により発光寿命の大幅な短縮が実現できれば、フーリエ変換限界の単一光子パルスに達する可能性があり、2光子干渉なども期待される。

GaAs:N中の $NN_A$ 窒素等電子トラップに共鳴波長を合わせた2次元フォトニック結晶構造を作製し、低温における発光スペクトルにキャビティーモードに起因すると考えられる鋭いピークを多数観測した。その一つのピークについて、連続光励起によるHBT(Hanbury-Brown and Twiss)セットアップによる光子相関測定を行ったところ、明瞭な凹みが観測され、非古典光の発生が確認された。このことから、鋭いピークは少数個の $NN_A$ トラップとキャビティーモードが結合したものと解釈される。凹みが浅かったことから、装置の時間分解能の影響を排除するためにパルス光励起でのHBT測定も行ったが、遅延時間ゼロに対応するピークの高さは同様に低くなかった。よって、結合しているトラップの数が多くが原因として考えられたため、今後、より低濃度の試料についてフォトニック結晶を作製し同様の実験を行う必要がある。パーセル効果が起こっているかどうかについては、発光の減衰時間が確かに速くなっていることが観測されているものの、キャビティーと結合

していない領域の減衰時間も同様に速くなっているため、観測された短い発光寿命にパーセル効果などの程度寄与しているか、より高い時間分解能の測定を行って明らかにする予定である。

## 【2】表面プラズモンのフェムト秒ダイナミクス (久保 敦)

(1) フェムト秒非同径ポンプ-プローブ法による表面プラズモン波束の超高速時間分解ダイナミクス (加藤、久保)

表面プラズモン(Surface plasmon, SP)は金属-誘電体界面に光励起される電子の集団運動であり、金属表面の微細構造を局所的な励起の起点とし、そこから界面や導波路構造に沿って伝搬させることができる。近年、次世代の超高速・小型情報処理素子としてプラズモニックデバイスが精力的に研究されているが、光速に近い速度で伝搬するプラズモン波の挙動を実時間で計測する手法は未だない。プラズモニックデバイス開発のためには、種々の機能素子からなる回路内を伝搬する SP 波束を可視化し、波束の時空間的な発展のダイナミクスを理解する必要がある。そこで我々は、時間幅 9 フェムト秒の光パルスを用い、直径数  $\mu\text{m}$  にピンポイントで集光したポンプパルスで SP 波束を励起し、次いで試料を広範囲に照射するパルスでプローブする、同軸・非同径ポンプ-プローブ法を用いた時間分解顕微鏡法を開発した。空間光変調器を用いた群速度分散補償により試料表面で 10 フェムト秒台まで圧縮されたパルスは、同等の時間幅のプラズモン波束を金属(Au)膜表面に励起する。さらに、プラズモンとプローブパルスの形成する表面場の強度分布を、試料表面の蛍光膜層で伝搬光に変換し、可視化を行った。

レーザー光源にはパルス幅 9fs、搬送波長 820nm のフェムト秒チタンサファイアレーザーを使用した。パルス対(ポンプ-プローブ光)の生成にはマッハツェンダー干渉計を用いた。干渉計から出射された非同径パルス対は対物レンズを通し試料表面に集光されるが、時間幅が約 10 フェムト秒の超短光パルスを対物レンズに通すと、レンズの群速度分散のために時間幅は数十倍にも広がる。そこで本研究ではチャープミラーによりパルスに低次(二次)の分散補償を施した後、さらに空間光変調器(Spatial light modulator, SLM)を用いて高次の分散補償を行い、試料面でのパルスの時間幅を最適化した。そして上記のように形成されたパルス対を用いて局所領域で励起された SP 波束の可視化を行った。試料はナノスケールの段差構造を有する Au 薄膜であり、さらに表面に蛍光層を形成している。対物レンズを通して集光したスポット径約  $4\mu\text{m}$  の励起光を Au 膜の段差部に入射し、プローブパルスを SP の伝搬領域を含む直径約  $50\mu\text{m}$  の範囲に照射する。ポンプパルスにより励起された SP により Au 膜表面にエバネッセント場が形成されるため、SP 波束が伝搬した軌跡にはジェット状の蛍光が見られる。さらに SP ジェットにプローブパルスを適当な遅延時間  $\tau$  をおいて重ねると、SP ジェット上にビートが現れる。ビートは遅延時間  $\tau$  の増大とともに、SP 進行方向に移動した。これは、SP-プローブパルス干渉によって Au 表面に形成されたエバネッセント場のグレーティング構造を、試料表面の蛍光層の二光子励起蛍光を経て可視化したものと解釈された。

(2) 誘電体包埋型金属薄膜導波路における長距離伝搬型表面プラズモン (片倉、久保)

伝搬型表面プラズモン (Surface Plasmon Polariton: SPP) は、生成される試料構造に依存して様々な伝搬モードを有する。伝搬モードとして最も一般的なものは金属-誘電体の単一界面において生成される単一界面表面プラズモンである。しかし、このモードは強い減衰を有しており、伝搬長の短さのため SPP のデバイス応用への壁となっている。この問題を打開するものとして、長距離伝搬型表面プラズモンポラリトン (Long Range Surface Plasmon Polariton: LRSPP) に関する研究が行われている。LRSPP は、膜厚 $<30\text{nm}$ の金属薄膜の上下を同一の誘電体で挟み込んだ構造において生成される SPP モードであり、非常に少ない伝搬損失を持つ。本研究ではこの LRSPP に注目し、二光子蛍

光顕微鏡法に適合した誘電体-金属-蛍光ポリマー-誘電体導波路構造の作製、ならびに LRSPP の伝搬を二光子蛍光顕微鏡法により可視化する事を目的とした。

LRSPP の導波路構造には金属ストライプ構造を採用した。導波路の詳細な構造は、FDTD(時間領域差分)シミュレーションの結果やこれまでの報告を参考に、厚さ各  $2\ \mu\text{m}$  の二つの誘電体層の間に、厚さ  $20\ \text{nm}$ 、幅  $20\ \mu\text{m}$  の Au 薄膜が埋め込まれたストライプ導波路構造を基本とし、さらに LRSPP を蛍光顕微鏡観察するために厚さ  $20\ \text{nm}$  の蛍光ポリマー層を Au 層と誘電体層の間に挿入したものとした。誘電体の材質はエポキシ樹脂に選定した。導波路のパターン描画にはマスクレス露光装置を使用し、構造の再現にはリフトオフ法、イオンミリング法、及び 2 層レジストリフトオフ法を試みた結果、2 層レジストリフトオフ法で再現性の高い導波路構造を作製することができた。作製した試料は劈開し、生成されたフレッシュな導波路断面をカプラーとした。試料に対し、パルス幅  $11\ \text{fs}$ 、搬送波長  $820\ \text{nm}$  のフェムト秒レーザーを集光し、導波路およびその近傍の電磁場分布を蛍光顕微鏡観察すると共に、蛍光強度分布、透過光スペクトルの入射光偏光依存性を計測した。その結果、p 偏光入射時には LRSPP モードが、s 偏光入射時にはエポキシ樹脂中の光導波モードが、それぞれ主な励起モードとなる事が確認された。

### (3) 通信帯フェムト秒表面プラズモンの二光子蛍光顕微鏡観察 (村上、久保)

近年、伝搬型表面プラズモン (表面プラズモンポラリトン、SPP) を情報伝達の媒体として利用する次世代デバイス、「プラズモニクデバイス」の研究が盛んである。既に実用化が先行するフォトニックデバイスでは通信波長帯  $1.55\ \mu\text{m}$  の光が使用されており、プラズモニクデバイスでも同波長帯の実装が期待されている。特に、デバイス動作の超広帯域化を実現するためには、超高速時間領域におけるプラズモン信号の測定法を確立し、信号の伝搬や能動素子との相互作用を含めたダイナミクスについて理解することが必要である。そこで、本研究では時間分解顕微鏡法を用いた  $1.55\ \mu\text{m}$  帯表面プラズモンの動的な観察法の構築を目的とし、フェムト秒レーザー光源、ポンプ-プローブ遅延光学系の構築、ならびに  $1.55\ \mu\text{m}$  フェムト秒レーザー励起 SPP の二光子蛍光顕微鏡法による可視化を行う。

本研究ではチタンサファイア(Ti:S)フェムト秒再生増幅器の出力を光パラメトリック増幅器(OPA)へ入力し、 $1.55\ \mu\text{m}$ へ波長変換し、SPP の励起光源に用いた。 $1.55\ \mu\text{m}$ 光は、Si CCD カメラで検出可能な波長帯域( $\lambda < 1000\text{nm}$ )から外れているため観察することができない。そこで二光子蛍光過程を用い、表面プラズモン励起に伴う試料表面のエバネッセント場を  $< 1000\text{nm}$  の光にアップコンバートする。試料は Si ウェハ上 Au を電子ビーム蒸着して作製し、さらに集束イオンビームエッチングにより光-SPP 結合部を形成した。レーザー照射により光-SPP 結合部で発する光のスペクトルを顕微分光器で計測し、2 光子蛍光と推定される発光を検出した。

### (4) 超格子材料[(GeTe)<sub>2</sub>(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1</sub>]の光誘起相転移と光学変調素子への応用 (杉山、久保)

超格子材料[(GeTe)<sub>2</sub>(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>1</sub>] (GST) は固相における Ge 原子の位置の変化によって低伝導状態と高伝導状態とが可逆的に変化する物質である。光ディスクの記録層に用いられている Ge<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 合金と同様の組成を持つが、GST は GeTe の層と Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の層とが周期的に配列した超格子を構成しているのが特徴である。本研究では、GST 多層膜に光透過ナノ構造を加工して NIR レーザー (波長  $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$ ) を透過させ、NIR 光透過率の GST の光誘起相転移に伴う強度変調を計測した。最終的には、GST の光誘起相転移を用いた新規光学変調素子の開発を目的としている。

GST の相転移は、試料作製後ナノ構造を含む周辺領域に波長  $\lambda = 532\ \text{nm}$  のナノ秒 Q-スイッチ YAG レーザーを照射することで行い、低伝導状態から高伝導状態へ相転移させた。YAG レーザー照射後、試料を光学顕微鏡で観察し、ナノ構造周囲の GST が相転移し色相が変化していることを確認した。相転移の前後での  $1.55\ \mu\text{m}$  光の光透過率の変化を計測したところ、変調の強度はナノ構造の大きさ

に依存して変化し、最大で 14 % の変調度を得た。FDTD 法によるシミュレーションを用いた解析を併せて行っている。

#### <論文>

(査読論文)

1. J. Sun, M. Ikezawa, X. Wang, P. Jing, H. Li, J. Zhao, Y. Masumoto: "Photocarrier recombination dynamics in ternary chalcogenide CuInS<sub>2</sub> quantum dots", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 11981 (2015).
2. P. Jing, W. Ji, X. Yuan, S. Qu, R. Xie, M. Ikezawa, J. Zhao, H. Li, Y. Masumoto: "Ultrafast Carrier Dynamics and Hot Electron Extraction in Tetrapod-Shaped CdSe Nanocrystals", *Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 7938 (2015).

(学位論文)

1. 修士論文 安田 直人、「GaAs 中の単一窒素発光中心の共鳴励起」
2. 修士論文 片倉 康輔、「誘電体包埋型金属薄膜導波路における長距離伝搬型表面プラズモン」
3. 修士論文 加藤 佳祐、「フェムト秒時間分解非同径ポンプ-プローブ法の開発と局所励起表面プラズモン波束の可視化」
4. 卒業論文 吉岡 篤志、「窒素をデルタドープした III-V 族半導体量子井戸の光学特性」
5. 卒業論文 中村 圭佑、「フェムト秒表面プラズモン波束の変形・減衰のダイナミクス」
6. 卒業論文 松本 実夏、「Ag 薄膜の Kretschmann 配置型全反射減衰測定」
7. 卒業論文 村上 亮輔、「1.55 μm 帯フェムト秒表面プラズモンの二光子蛍光顕微観察」

#### <国際会議>

1. Y. Masumoto, A. Murakami, H. Umino, S. Tomimoto: "Trion Resonant Kerr Rotation in ZnO:Ga", ICPS2014 (32nd International Conference on the Physics of Semiconductors) (Austin, TEXAS, USA 2014.8).
2. Y. Masumoto, J. Sun, H. Umino, E. Suzumura: "Fast charge transfer from quantum dots for solar cells", ICPS2014 (32nd International Conference on the Physics of Semiconductors) (Austin, TEXAS, USA 2014.8).
3. M. Ikezawa: "Single Photon generation from nitrogen isoelectronic traps in III-V semiconductors", Academic Symposium on Functional Material (吉林師範大学, China, 2014.9) [招待講演]
4. M. Ikezawa, Y. Yamada, Y. Sakuma, L. Zhang, H. Takeda, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Sakoda, and Y. Masumoto: "Non-classical Light Generation from Isoelectronic Centers Embedded in Photonic Crystal Microcavities", International Symposium on Recent Progress of Photonic Devices and Materials (神戸大学, 2014.11)
5. A. Kubo, "10-fs time-resolved imaging of surface electromagnetic waves", The 15th RIES-Hokudai International Symposium, 2014 年 12 月 16 ~ 17 日, Gateaux Kingdom, Sapporo, Japan [招待講演]
6. Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Exploring quadrupole and higher order surface plasmon resonances in individual plasmonic nanoantennas by PEEM", LEEM/PEEM 9, 2014 年 9 月 14 ~ 18 日, Berlin, Germany

#### <講演>

1. 山田雄太、張遼、池沢道男、武田寛之、池田直樹、杉本喜正、佐久間芳樹、迫田和彰、舛本泰章：「等電子トラップを埋め込んだフォトニック結晶共振器の光学特性」 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月)
2. 張遼、池沢道男、佐久間芳樹、迫田和彰、舛本泰章：「発光エネルギーの揃った GaAs 中の窒素発光

- 中心の位相緩和」 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月)
3. 山田雄太, 張遼, 池沢道男, 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章:「フ  
ォトニック結晶共振器に埋め込まれた等電子トラップからの非古典光発生」 第 75 回応用物理学会  
秋季学術講演会 (2014 年 9 月)
  4. 久保敦, “近紫外/近赤外域表面プラズモンの 10 フェムト秒時間分解イメージング”, 日本光学会年次  
学術講演会 Optics Photonics Japan 2014, 2014 年 11 月 5~7 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎〔招  
待講演〕
  5. 久保敦, 諸徳寺匠, 孫泉, 上野貢生, 于瀚, 松尾保孝, 三澤弘明, 笠谷岳士, 宮崎英樹, “ナノスケール  
プラズモンモードにおける対称性とコヒーレンス”, 第 4 回物質・デバイス領域共同研究拠点 活動報  
告会, 2014 年 4 月 25 日, ホテルメトロポリタン仙台
  6. 加藤佳祐, 久保敦, “フェムト秒レーザーにより局所的に励起された表面プラズモンの観察”, 第 75 回  
応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17~20 日, 北海道大学札幌キャンパス
  7. 久保敦, “非同径パルス対を用いた局所励起光応答の追跡”, 東北大学電気通信研究所共同プロジェク  
ト研究会「新しい光科学の創成とナノ情報デバイスへの展開 II」, 2014 年 10 月 30 日, 東北大学ナノ  
スピン実験施設
  8. 加藤佳祐, 久保敦, “フェムト秒非同径ポンプ-プローブ法による表面プラズモンの可視化”, 日本光学  
学会年次学術講演会 Optics Photonics Japan 2014, 2014 年 11 月 5~7 日, 筑波大学東京キャンパス文京校  
舎
  9. 加藤佳祐, 久保敦, “マイクロ領域から伝搬する表面プラズモン波束の時間分解イメージング”, 第 12  
回プラズモニクスシンポジウム, 2015 年 1 月 23~24 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
  10. 加藤佳祐, 久保敦, “非同径ポンプ-プローブレーザー励起顕微鏡法による局所励起表面プラズモン波  
束のフェムト秒時間分解映像”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11~14 日, 東海大  
学湘南キャンパス

#### <外部資金>

1. 光科学技術研究振興財団 研究助成, H26~27 「半導体中の等電子不純物の共鳴励起による超コヒーレ  
ントな光子の発生」 : 池沢道男
2. 科研費 若手(A), 研究代表者, H26~29, 「通信帯フェムト秒表面プラズモン波束の顕微映像化と非線  
形増幅」 : 久保敦
3. 科学技術振興機構 CREST, 研究担当者, H26~H31, 「カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモ  
ニクス」 : 久保敦
4. 平成 26 年度 物質・デバイス領域共同研究課題, 「プラズモニク構造に励起されるナノスケール電  
場分布の直接観察」 : 久保敦

#### <表彰>

1. 加藤佳祐, 久保敦, 2014 年応用物理学会秋季学術講演会 Poster Award, 「フェムト秒レーザーにより局  
所的に励起された表面プラズモンの観察」, 2014 年 9 月
2. 久保敦, 平成 26 年度 筑波大学若手教員奨励賞, 2014 年 12 月

### I X-3 強相関物性グループ

教授		守友 浩
講師		東山和幸
助教		小林 航 (H22. 9-)
研究員		柴田恭幸
大学院生	D3	五十嵐一泰
	D2	米澤宏平
	D1	高地雅光
	M2	高橋洋輔
	M2	赤羽隆弘
	M2	濱口 純
	M2	後藤謙典
	M2	高木健太郎 (休学)
	M1	浦瀬翔太
	M1	柳田 歩
	M1	平野泰樹 (休学)
卒業研究生	B4	赤間翔太
		木下明美
		福住勇矢
研究生		Rögnvaldur Línal Magnússon
研究補助員		深山真美子 (H26. 5-)
		木村京子 (H26. 5-)

#### 【1】 ナトリウムイオン電池正極材である層状酸化物の拡散係数の決定[1, 2, 3, 4] (柴田、福住、小林、守友) 図1

レーザーアブレーション法で層状酸化物薄膜 ( $P2\text{-NaCoO}_2$ 、 $P2\text{-NaMnO}_2$ 、 $O3\text{-NaCoO}_2$ ) を成膜し、複素インピーダンス測定を行った。ランデルス等価回路で解析を行い、ナトリウムイオン拡散係数とイオン電荷移動抵抗をナトリウム濃度と温度の関数として決定した。この実験により、ナトリウム化合物のナトリウムイオン拡散係数がリチウム化合物 ( $O3\text{-LiCoO}_2$ ) のリチウムイオン拡散係数より大きいこと、を明らかにした。

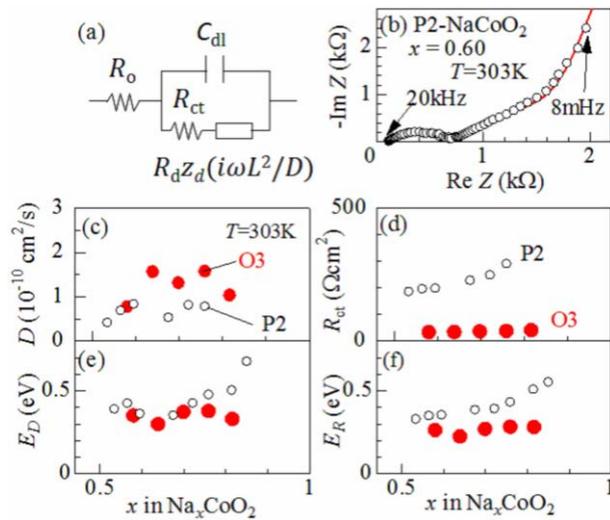


図1:層状酸化物のナトリウムイオン拡散係数とイオン電荷移動抵抗

【2】 二次電池起電力へのイオンモデルの適用 [5] (小林、守友) 図2

トランスの提唱したイオンモデルは、遷移金属酸化物の電子状態を俯瞰的に理解できるモデルである。我々は、このイオンモデルを層状酸化物のナトリウムイオン二次電池の起電力に適用した。その結果、Ti-Cr 酸化物では電子が遷移金属から引き抜かれ、Mn-Ni 酸化物では電子が酸素から引き抜かれることが、分かった。こうした物質描像、安定かつ高性能なナトリウムイオン正極材料の開発に貢献すると期待される。

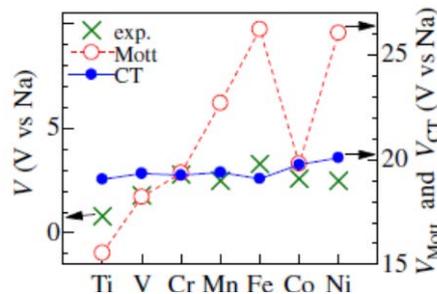


図2: O3-NaMO<sub>2</sub>の起電力(×)とイオンモデルによる計算結果(○と●)

【3】 プルシャンブルー薄膜への超高速イオンインターカレーション[6] (柴田、守友) 図3

鉄欠損を導入したPBA薄膜が、イオン半径の大きなRbイオンを超高速でインタカレートすることを発見した。詳細な解析により、イオンインターカレーションが固体/液体界面におけるイオン電荷移動抵抗で律速されていることが明らかとなった。こうした超高速イオンインターカレーションは水溶性放射性Csの除去に有効である。

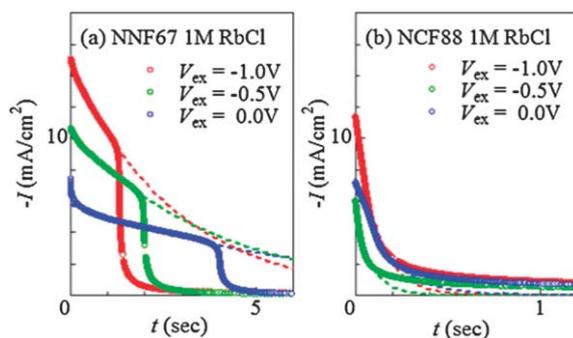


図3：プルシャンブルー薄膜へのRbイオンインターカレーション：(a)鉄欠損が多い薄膜(b)鉄欠損が少ない薄膜

【4】 有機薄膜太陽電池における電荷生成効率の分光学的決定法 [7] (米澤、NIMS、守友)

図4

有機薄膜太陽電池では、光励起による励起子生成→励起子の解離・電荷の生成→電荷の輸送・回収、といった複雑なプロセスで発電が起こっている。我々は光子一個あたりの生成電荷の数を分光学的に決定する方法を提案し、最も典型的な有機薄膜太陽電池であるP3HT/PCBMに適用した。

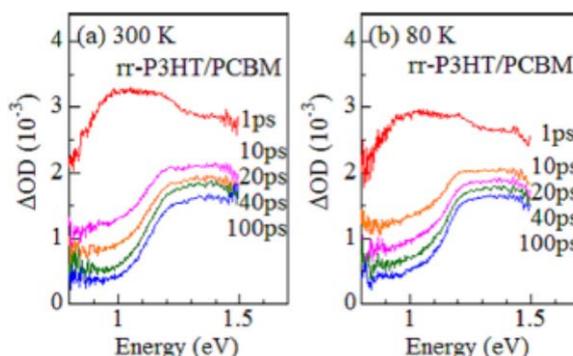


図4:P3HT/PCBMの誘導吸収の温度依存性:(a)400Kと(b)80K

【5】 両性分子 SubPc への電荷注入の観測[8] (高橋、米澤、NIMS、守友) 図5

両性分子 SubPc は、高効率有機太陽電池材料として注目を浴びている。我々は、SubPc/C<sub>60</sub> および SuBPc/6T ヘテロ型太陽電池を作製し、デバイス特性を明らかにした。さらに、系統的な超高速分光を行い、C<sub>60</sub>層から SubPc 層への電子注入、および、6T層から SubPc 層への正孔注入を分光学的に観測した。

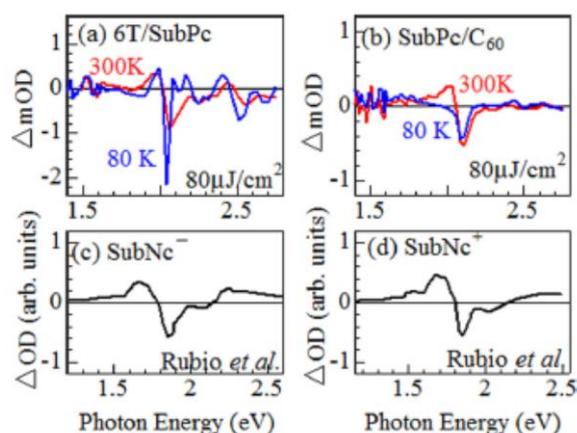


図5:両性分子 SubPc への電荷注入: (a)-(c)電子注入、(b)-(d)正孔注入

**【6】 走査型軟 X 線顕微鏡による有機薄膜太陽電池の分子混合の研究[9, 10] (守友、米澤、NIMS、KEK、AIST、広大、東大) 図 6**

走査型軟 X 線顕微鏡による F8T2/PC<sub>71</sub>BM バルクヘテロジャンクション (BHJ) 型有機薄膜太陽電池のドメイン構造と分子混合を明らかにした。さらに、アニール温度を変えた BHJ 型太陽電池を作製し、エネルギー変換効率、電荷生成効率、ドメインサイズ、分子混合率、を系統的に調べた。その結果、エネルギー変換効率が分子混合率に強く依存することが明らかとなった。

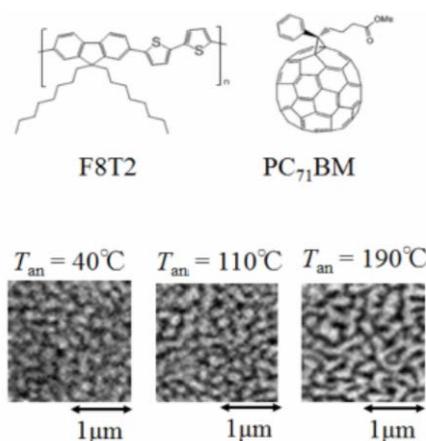


図6:F8T2/PC<sub>71</sub>BM バルクヘテロジャンクションの走査型軟 X 線顕微鏡像

**【7】 (Mn,Co)-プルシアンブルー類似体固溶体の電気化学物性[11] (栗原、守友) 図 7**

(Mn,Co)-プルシアンブルー類似体固溶体薄膜を作製し、構造物性、電子状態、電気化学物性の詳細を調べた。Fe の酸化還元電位が格子構造 (格子定数) に強く依存することが明らかとなった。

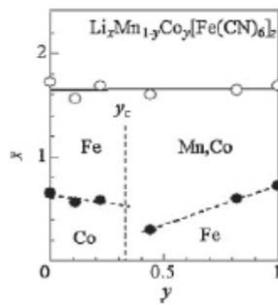


図7:(Mn,Co)-プルシアンブルー類似体の酸化還元相図

### 【8】 密度汎関数法によるPd(110)表面電子状態の研究 (東山) 図8

我々は以前、シンクロトロン放射光を用いてPd(110)表面の光電子スペクトルを測定した。(Yagi *et al.*, Surf. Sci. 231(1990)397-403)。スペクトル中のピークの大部分はバルクバンド間の直接遷移で説明できた。しかし、バルクのバンド構造では説明できないピークが4つ、フェルミ準位から-3eVにかけて観測された。今回、その起源を探るため密度汎関数法を用いて表面電子状態の計算を行った。

計算では射影演算子補強波法を実装した平面波コード (QUANTUM ESPRESSO) を厚さ 15Å の真空層と N 層 (N=3~31) の Pd 原子から成る対称スラブ模型に適用した。得られたバルクのエネルギーバンドは実験をよく再現した (図8左参照)。構造最適化後の表面緩和、表面エネルギー、仕事関数の値は過去の報告とほぼ一致した。以下では N=31 の結果を示す。

図8右は表面近傍と中心層にある原子に射影した局所状態密度 (LDOS) のエネルギー分布である。中心層とバルクで状態密度の違いはほとんどなく、計算が十分収束していることを示している。表面層ではバルクと比較して余剰の状態 a-d が存在する。これらの結合エネルギーの値と軌道対称性は実験結果とつじつまが合う。LDOS の深さ分布を調べたところ、状態 a-d は、それぞれバルクの異なる Bloch 状態と混成した表面共鳴状態であると考えられる。

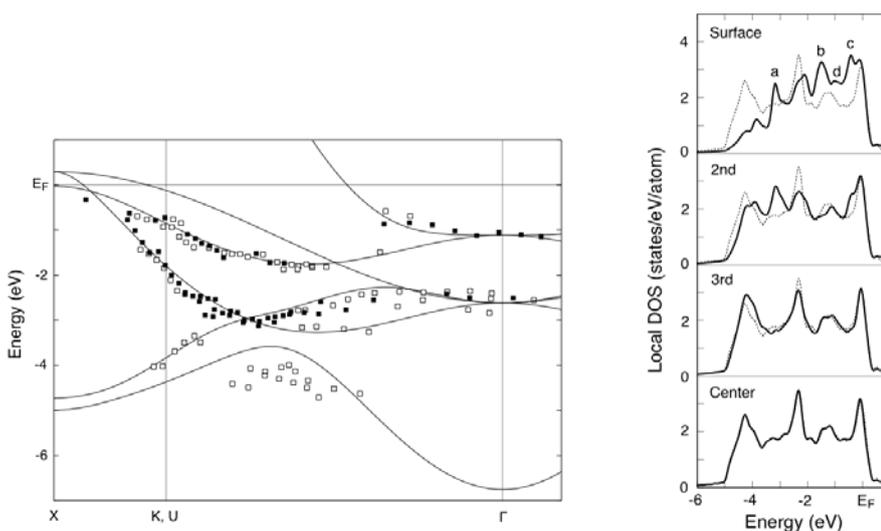


図8 左: バルクのバンド図 (四角が実験、状態 a-d は除いてある)  
右: LDOS (実線) とバルクの DOS (破線) の比較

## 【9】KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成26年度KEK大学等連携支援事業「加速器科学と融合した物質科学教育研究拠点の構築に向けて」の代表として、筑波大—KEKの連携・協力の強化のための活動を行った。

### <論文>

1. T. Shibata, Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Fast discharge process of layered cobalt oxides due to high Na<sup>+</sup> diffusion", *Sci. Rep.*, 5 (2015) 9006.
2. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, Erratum "Sodium ion diffusion in layered Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>" [*Appl. Phys. Express* 6, 097101 (2013)], *Appl. Phys. Express*, 8 (2014) 029201.
3. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, Erratum "Sodium ion diffusion in layered Na<sub>x</sub>MnO<sub>2</sub> (0.49 < x < 0.75): comparison with Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>" [*Appl. Phys. Express* 7, 067101 (2014)], *Appl. Phys. Express*, 8 (2014) 029202.
4. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Sodium ion diffusion in layered Na<sub>x</sub>MnO<sub>2</sub> (0.49 < x < 0.75): comparison with Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>", *Appl. Phys. Express*, 7 (2014) 067101.
5. W. Kobayashi and Y. Moritomo, "Ionic model approach to battery voltage of Na<sub>x</sub>MO<sub>2</sub>", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 83 (2014) 104712.
6. T. Shibata and Y. Moritomo, "Ultrafast cation intercalation in nanoporous nickel hexacyanoferrate", *Chem Comm.*, 50 (2014) 12941.
7. Y. Moritomo, K. Yonezawa, and T. Yasuda, "Effect of temperature on carrier formation efficiency in organic photovoltaic cells", *Appl. Phys. Lett.*, 105, 073902 (2014).
8. Y. Takahashi, T. Yasuda, K. Yonezawa, and Y. Moritomo, Carrier injection dynamics in heterojunction solar cells with bipolar molecule", *Appl. Phys. Lett.*, 106, 123902 (2015).
9. Y. Moritomo, T. Yasuda, K. Yonezawa, T. Sakurai, Y. Takeichi, H. Suga, Y. Takahashi, N. Inami, K. Mase, and K. Ono, "Fullerene mixing effect on carrier formation in bulk-hetero organic solar cells", *Sci. Rep.*, 5, 9483.
10. Y. Moritomo, T. Sakurai, T. Yasuda, Y. Takeichi, K. Yonezawa, H. Kamioka, H. Suga, Y. Takahashi, Y. Yoshida, N. Inami, K. Mase, and K. Ono, "Molecular mixing in donor and acceptor domains as investigated by scanning transmission X-ray microscopy", *Appl. Phys. Express*, 7 (2014) 052302.
11. Y. Kurihara and Y. Moritomo, "Electrochemical, structural, and electronic properties of Mn-Co hexacyanoferrates against Li concentration", *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 067101.
12. B. Bryant, Y. Moritomo, Y. Tokura, and G. Aeppli, "Temperature and field dependence of magnetic domains in La<sub>1.2</sub>Sr<sub>1.8</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>", *Phys. Rev. B*, 91 (2015) 134408.

### <著書>

1. 技術情報協会「放射性物質の吸着・除染および耐放射線技術における材料・施工・測定の新技術」2014/11/28, 633頁, 守友 浩 担当箇所 163-169
2. 技術情報協会「次世代蓄電池の【最新】材料技術と性能評価」2013/12/27, 829頁,

<学位論文>

1. 修士論文 高橋洋輔、「低分子ヘテロ接合型有機薄膜太陽電池の電荷ダイナミクス」
2. 修士論文 濱口 純、「プルシアンブルー類似体における Cs<sup>+</sup>インターカレーションの研究」
3. 修士論文 赤羽隆弘、「P2 型 Na<sub>x</sub>MO<sub>2</sub> の構造物性」
4. 修士論文 後藤謙典、「配位高分子におけるイオンインターカレーションの研究」

<講演>

1. 守友 浩 「エネルギー変換・貯蔵部門」 CiRfSE シンポジウム, 2015/3/12, 筑波大学 (つくば) 【invited】
2. Y. Moritomo 「high Na-ion diffusion constant in cathode materials for SIBs」 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium, 2015/3/17, ディスブルク (ドイツ) 【invited】
3. Y. Moritomo 「Structural and electronic properties of several cathode materials for sodium-ion secondary batteries」 TNS' 14, 2014/7/26, 筑波大学 (つくば) 【invited】
4. 守友 浩、柴田恭幸、小林航、西堀英治、「層状酸化物 AMO<sub>2</sub> の電子レベルの構造解析」第 55 回電池討論会、2014/11/19, 京都国際会館 (京都)
5. 守友 浩、栗原佑太郎「Co-Mn プルシアンブルー類似体の電気化学特性」第 55 回電池討論会、2014/11/20, 京都国際会館 (京都)
6. 高地 雅光、守友 浩「プルシアンブルー類似体のイオン拡散係数」第 55 回電池討論会、2014/11/21, 京都国際会館 (京都)
7. 柴田 恭幸、小林 航、守友 浩「Na<sub>x</sub>MO<sub>2</sub> (M=Co, Mn) 薄膜における電気化学特性」第 55 回電池討論会 2014/11/19, 京都国際会館 (京都)
8. 小林 航、守友 浩「イオンモデルによる O3 型層状酸化物の電位の考察」第 55 回電池討論会、2014/11/19, 京都国際会館 (京都)
9. 柴田恭幸、小林 航、守友 浩「O3 型 NaCoO<sub>2</sub> 薄膜の電気化学特性」第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014/9/17, 北海道大学 (札幌)
10. 柴田恭幸「Sodium ion diffusion in layered Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>」第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014/9/17, 北海道大学 (札幌) 【応用物理学会論文奨励賞受賞記念講演】
11. 柴田 恭幸、濱口 純、守友 浩「Ni プルシアンブルー類似体における高速インターカレーション」第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015/3/12, 東海大学 (平塚)
12. 柳田 歩、柴田 恭幸、小林 航、守友 浩「P2 型 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> 薄膜電極の放電曲線のレート依存性」第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015/3/11, 東海大学 (平塚)
13. 赤羽 隆弘、柳田 歩、小林 航、守友 浩「P2 型 Na<sub>x</sub>MO<sub>2</sub> の結晶構造の温度依存性」第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015/3/11, 東海大学 (平塚)

<ポスター発表>

1. 高橋 洋輔、米澤 宏平、安田 剛、守友 浩「両極性低分子を用いたヘテロ接合型薄

膜の電荷ダイナミクス」第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/12, 東海大学(平塚)

2. K. Yonezawa, Y. Moritomo, T. Sakurai, T. Yasuda, Y. Takeuchi, H. Kamioka, H. Suga, Y. Takahashi, Y. Yoshida, N. Inami, K. Mase, and K. Ono, "Domain Structure of F8T2/PC<sub>71</sub>BM Blend Film as Investigated by Scanning Transmission X-ray Microscope (STXM)", KJF-ICOME2014@Tsukuba, 2014/9/22-24
3. M. Takachi Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, "Diffusion constant of Li<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> in Prussian Blue analogues", CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium@Duisburg, 2015/3/16-17
4. 米澤宏平, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元, 守友浩 "Carrier Formation Efficiency in Organic Photovoltaic" NIMS Conference 2014@つくば, 2014/7/1-3
5. 東山和幸「Pd(110)表面電子状態の第一原理計算」第 70 回日本物理学会年次大会、2015/3/21、早稲田大学 (早稲田)

#### <特許出願>

1. 守友 浩、柴田恭幸「ナトリウムイオン二次電池用負極、ナトリウムイオン二次電池、リチウムイオン二次電池用負極、リチウムイオン二次電池」、筑波大学、特願 2014-222946、2014/10/31
2. 守友 浩、濱口純、柴田恭幸「水溶性放射性物質の除去・濃縮装置および水溶性放射性物質の除去・濃縮方法」、筑波大学、特願 2014-259441、2014/12/22

#### <特許取得>

1. 守友 浩、柴田恭幸「電圧駆動素子、電池、表示装置、磁性制御装置および反転対称性制御装置」、筑波大学、特 5590516、2014/8/8
2. 守友 浩、中田文也「プルシャンブルー類似体の作成方法」、筑波大学、特 5700382、2015/2/27
3. 守友 浩、五十嵐一泰「不揮発性エレクトロクロミック素子およびカチオンの移動を制御する方法」、筑波大学、特 5641363、2014/11/7

#### <外部資金>

1. 挑戦的萌芽研究、守友 浩 (代表)、「プルシャンブルー類似体へのナトリウムイオンインターカレーション」、H25-H26, 320 万
2. 若手研究 (A)、小林 航 (代表)、「リチウムイオンポリマー電池素子を用いた遷移金属酸化物の物性制御」、H23-H26, 210 万
3. A-STEP、「水溶液中アニオンの高速・高密度貯蔵技術の開発」、守友 浩 (代表)、H26-H27, 131 万
4. 公益財団法人三菱財団/自然科学研究助成、守友 浩 (代表)「ネットワークポリマー正極材料におけるリチウムイオン動力学の研究」、H24-H26, 700 万
5. 公益財団法人東燃ゼネラル石油研究奨励・奨学財団/研究奨励助成、小林 航 (代表)、「イオンモデルに基づいた高性能ナトリウムイオン電池正極材料の開発」、H26-27, 100 万

6. 熱・電気エネルギー技術財団第 21 回研究助成、小林 航 (代表), 「層状遷移金属化合物における電気化学ゼーベック効果の研究」、H25-H26, 100 万

<その他>

1. 高橋洋輔 (M2)、数理物質科学研究科長表彰
2. 高地雅光 (D1)、2015 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium poster award
3. 柴田恭幸 (研究員)、第 36 回応用物理学会論文奨励賞、Sodium Ion Diffusion in Layered  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ 、Appl. Phys. Express 6 (2013) 097101

## IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎  
大学院生 7名

### 【1】 量子ホール系カイラルエッジ状態のスピ分解観測 (柴田、野村) [論文 1]

最近、量子ホール効果、量子スピンホール効果、量子異常ホール効果等の端状態に多くの注目が集まっている。これらの端状態では、スピン状態に依存したキャリアの輸送等の興味深い現象が起こるとされている。私達は近接場走査型光学顕微鏡を用いてスピン分裂した量子ホール端状態を空間分解して観測を行っている。近接場走査型光学顕微鏡は従来円偏光の照射にはあまり用いられてこなかった。これは標準的な光ファイバーでは偏光が保存されないことが知られていることやわずかな引っぱり歪みやねじれによって近接場プローブに複屈折を生じさせることのためである。そこで、私達は近接場プローブを作製するにあたって金属の蒸着条件を最適化すると共に集束イオンビーム(FIB)を使い軸対称に近い開口部をプローブ先端に形成した。さらにベレク補償子を用いて外部的に偏光状態を制御することにより、近接場プローブ先端から出射される光が円偏光となるよう複屈折を補償した。測定方法の概略図を図1に示す。

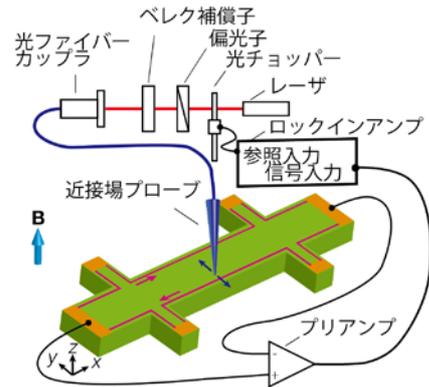


図1: 円偏光照射近接場走査型光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態の空間分解分光測定法の概略図。

円偏光近接場走査型顕微鏡を用いてホールバー試料に円偏光を局所的に照射し、ホールバーの電極間に生じる光電流の空間マップ図を得た。この空間マップ図により、カイラルエッジ状態にあるとされていた圧縮性液体、非圧縮性液体の分布が明らかにされた。この空間マップ図には黒の楕円で示すように上向きスピンの電子を光生成する右回り円偏光励起と下向きスピンの電子を光生成する左回り円偏光励起との間に光電流の明確な円偏光依存性が見られた。そこで、 $\partial_y V_\eta^\downarrow$ ,  $\partial_y V_\eta^\uparrow$ をそれぞれ↓スピン、↑スピンの電子を伝導電子帯につくる円偏光を照射した場合の光電流の空間微分として

$$P_\eta = \frac{\partial_y V_\eta^\downarrow - \partial_y V_\eta^\uparrow}{|\partial_y V_\eta^\downarrow| + |\partial_y V_\eta^\uparrow|}$$

を定義し、その結果を図2に示した。 $\eta = \pm$ は磁場の符号である。図2にはLier等のモデルによるスピン非偏極非圧縮性液体の帯の位置を黒の実線で示し、本研究で導入したスピン分裂した非圧縮性液体の帯の位置を白の破線で示した。黒の実線上ではPは緑色の0に近い値を示しており、円偏光の向きによる光電流の差が小さいことを示している。これは非圧縮性液体の帯が非偏極であることと整合している。一方、白の破線上では $P_\eta$ は-1若しくは+1の絶対値の大きな値を示しており、これはこの非圧縮性液体の帯がスピン分裂していることと整合している。この結果はスピン偏極した電子が局所光照射により二次元電子

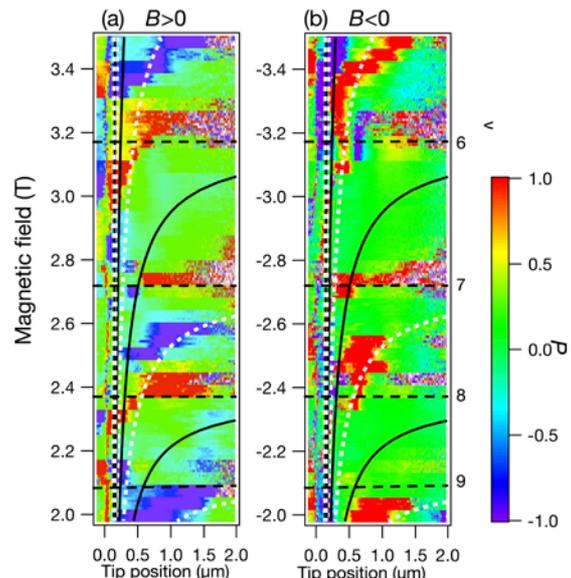


図2: (a)  $B > 0$  の場合の光電流の空間微分の偏極度  $P_\pm$ 、(b)  $B < 0$  の場合の偏極度  $P_\pm$ . [Adopted with permission from (Nano Lett. 15, 2417 (2015)). Copyright (2015) American Chemical Society.]

系層に注入されたことを明確に示している。

以上の結果をより深く理解するために、局所スピン密度汎関数法に基づいて強磁場中のスピン自由度を含んだカイラルエッジ状態のサブバンド構造および電子密度分布を高次差分法により数値的に求めた。その結果の一例を図3に示す。代表的な例として二次元電子系のバルク状態の電子占有数  $\nu=7.4$  と  $\nu=6.2$  の場合について図3に示した。この計算結果は  $m$  を整数として  $2m-1 < \nu < 2m$  の場合に、スピン分裂した非圧縮性液体の帯  $I_s$  がバルク状態とカイラルエッジ状態を隔てていることを示す。図の左端に  $\uparrow$  スピンまたは  $\downarrow$  スピンの電子が近接場プローブを用いた光局所照射によって選択的に生成される場合を考える。この場合に  $\uparrow$  スピンの電子の方が  $\downarrow$  スピンの電子よりも  $I_s$  を透過して図の右の方にあるバルク状態へ移動する確率が大きいことが示された。このことによって  $\partial_y V_\eta^\uparrow$ ,  $\partial_y V_\eta^\downarrow$  の符号と図2の白の破線近傍で  $|P_\eta|$  が大きいことが理解された。一方、図3において  $2m < \nu < 2m+1$  の場合に、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯  $I$  がバルク状態とカイラルエッジ状態を隔てていることを示す。この場合、図の左端に光学的に生成された  $\uparrow$  スピンの電子と  $\downarrow$  スピンの電子が  $I$  を透過する確率に大きな差が生じず、そのため図2の黒の実線近傍で  $|P_\eta| \approx 0$  であることが理解された。

以上のように、本研究によって新たに開発された円偏光近接場光学顕微鏡は、光によってスピン偏極した電子をナノメートル領域に注入可能であることを初めて実験的に示したものである。その結果、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯とスピン分裂した非圧縮性液体の帯の分布を空間マップして示すことに成功した。この成果は、例えば、消費電力を極限まで低減させるとされるスピントロニクス素子やトポロジカル素子中のスピン偏極した電子の流れの空間分布の解明を促進し、ひいてはそれらの素子の開発に大きく貢献するものと考えられる。

本研究は低温物性グループの大塚洋一教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏との共同研究である。

## 【2】 ナノ SQUID 走査型顕微鏡を用いたヘテロ接合中電流密度の可視化（柴田、大嶋、野村）

私達のグループでは Nb 弱結合型超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いた走査型 SQUID 顕微鏡の開発を進めている。SQUID は超高感度磁束検出器として知られているが、SQUID 顕微鏡の多くは空間分解能が  $10 \mu\text{m}$  以上であった。ナノメートル構造試料の物性測定のためにはより高い空間分解能の SQUID 顕微鏡が求められていた。そこで、収束イオンビーム (FIB) 加工によって SQUID のループサイズを微細化し、さらに SQUID プローブの先端部の研磨により SQUID と測定対象との間の距離の最小化を図り、空間分解能の向上を目的に研究を実施した。図4にこの

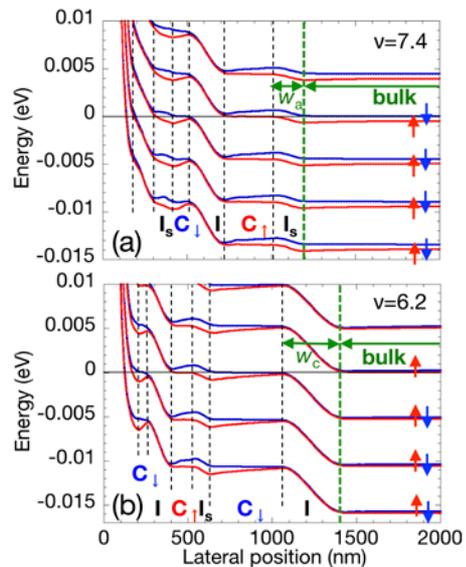


図3：局所スピン密度汎関数法に基づいた計算による強磁場中のスピン自由度を含んだカイラルエッジ状態の (a)  $\nu=7.4$  と (b)  $\nu=6.2$  の場合のサブバンド構造。フェルミ準位をエネルギーの原点にとった。[Adopted with permission from (Nano Lett. **15**, 2417 (2015)). Copyright (2015) American Chemical Society.]

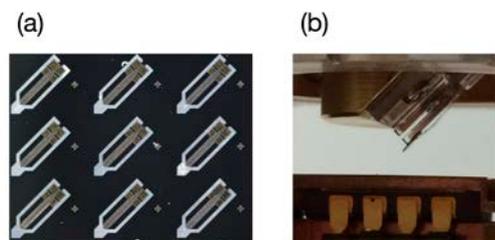


図4：(a) レーザリソグラフィと深堀エッチングにより作製された SQUID プローブ基板。(b) チューニングフォークに取り付けられた SQUID プローブとチップキャリア。

ようにして作製された SQUID プロブの写真を示す。通常の Nb 弱結合型 SQUID ではその電流-電圧特性にヒステリシスが見られ、走査中の各点において電流をスウィープして臨界電流  $I_c$  を測定する必要があった。本研究では、SQUID の構造の工夫によりヒステリシスが小さい SQUID プロブを作製し、SQUID を磁束-電圧変換素子として動作させることに成功し、走査による磁束イメージの取得が容易になった。図 5 に文献で知られている最先端の磁気顕微鏡、および私達の走査型 SQUID 顕微鏡の磁場感度と空間分解能の関係を示す。空間分解能を高くすると磁場感度が低下する傾向を見て取ることができる。磁気顕微鏡としては左下に位置するものが性能が高いとみなすことができるが、磁場感度-空間分解能の関係の中で私達の走査型 SQUID 顕微鏡はほぼベストの性能を示していることがわかる。

図 5 : 磁気顕微鏡における磁場感度-空間分解能の関係。

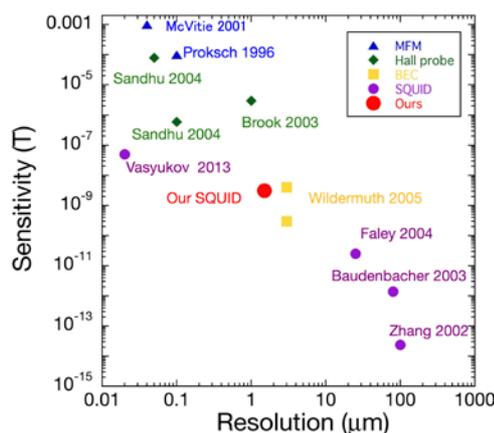


図 5 : 磁気顕微鏡における磁場感度-空間分解能の関係。

GaAs/AlGaAs 変調ドープヘテロ接合ホールバー構造試料中を流れる電流のつくる磁場分布の空間分解測定を実施し、二次元電流密度ベクトル分布を得た。図 6 に直線上に電流が流れる場合と、ホールバー内にて電流経路が折れ曲がる場合とについて、試料中を流れる電流のつくる磁場分布を測定した例を示す。測定により得られた磁場分布からフーリエ解析により試料中の二次元電流密度分布  $J_x(x, y)$ ,  $J_y(x, y)$  を再構成した。この結果の主な特徴は、電流密度分布のモデル計算により再現された。得られた結果は試料中電子の平均自由行程  $8.7 \mu\text{m}$  で説明されるバリステックな伝導を反映していることを示した。この新たに開発された走査型 SQUID 顕微鏡はトポロジカル素子や超伝導体中の電流密度分布の解明に貢献するものと考えられる。

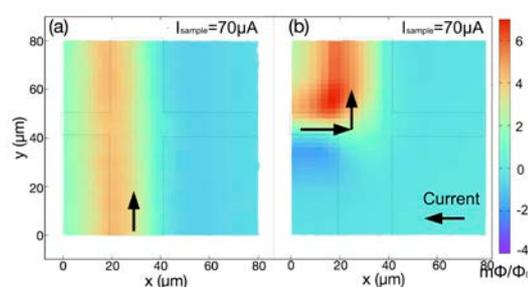


図 6 : GaAs/AlGaAs 変調ドープヘテロ接合ホールバー構造試料中を流れる電流のつくる磁場分布のマップ図。試料温度は 4 K、試料を流れる電流は  $70 \mu\text{A}$ 。(a)ホールバー中を直線的に電流が流れる場合、(b)ホールバー中で電流経路が折れ曲がる場合のプロット。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

### 【3】ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果 (大嶋、野村)

二次元電子系中の量子ホール状態の実現に磁場は必須ではなく、時間反転対称性を破ることにより生じ得ることが Haldane によって示されていた。最近、トポロジーに起因した量子状態への理解が深まり、円偏光照射による半導体のトポロジカル絶縁体への転移や光照射による無磁場下での量子ホール状態等の理論的提案が相次いでなされ、円偏光照射による新たな量子状態の生成が注目を集めている。これまでに私達のグループでは、近接場走査型光学顕微鏡を用いた量子ホール端状態の研究や極低温における分数量子ホール状態の研究を行い、量子ホール状態の解明に光学的手法が有効であることを示して来た。近年の超高速パルスレーザー技術の急速な進歩に伴い、THz 光発生は実験室レベルでの物性研究に適用されるようになってきた。そこで波長可変な円偏向パルス光を二次元電子系試料

に照射することにより、THz 回転電場を印加して円偏 THz 光照射による無磁場下での量子ホール状態の端緒を得ることを目的に本研究を開始した。

本年度、フェムト秒パルス中の  $+45^\circ$  ,  $-45^\circ$  の 2 つの偏向方向成分の位相を独立に制御し、出力波の偏向状態を制御するパルスシェーピングの一種であるベクトル波形整形波を用いた。この手法により中心周波数、偏向状態、スペクトルバンド幅が制御された THz 帯の変調波を得ることが可能である。図 7 に示すように、このベクトル波形整形波を低温クライオスタット中の二次元電子系ホールバー構造試料に照射し、ホールバー電極間に誘起される光電流のベクトル波形整形波の電場波形のねじれの向きに対する依存性を調べた。その結果 THz 回転電場の振動数と向きに依存した光電流を観測した。

本研究は東京農工大学三沢和彦氏のグループとの共同研究である。

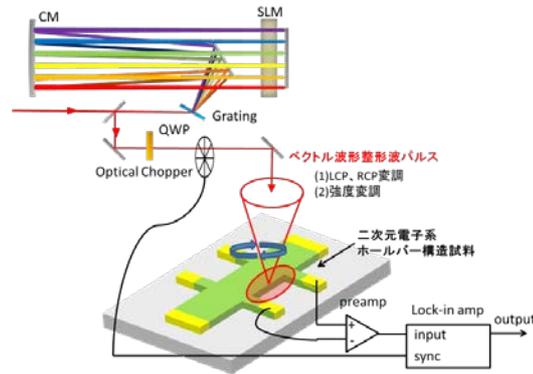


図 7：二次元電子系へのベクトル波形整形波照射・測定系の概略図。

#### 【4】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光物性（塚本、渡邊、野村）

最近、原子層数層の薄膜が得られるようになった遷移金属ダイカルコゲナイド二次元層状物質は、グラフェンと異なり有限のバンドギャップをもち、室温で強い発光が観測されたことを契機に注目を集めている。また、空間反転対称性の破れから有限のバンドギャップをもち、またスピン=軌道相互作用が大きいことが知られている二次元層状物質である。

遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の一種である  $\text{MoS}_2$  薄膜をポリジメチルシロキサンフィルムを用いた転写により六方晶窒化ホウ素上に転写して薄膜試料を作製した。作製した薄膜試料の光学顕微鏡像の一例を図 8 に示す。空間反転対称性の破れに起因する第二次高調波発生強度の層数依存性、発光ピークエネルギーの層数依存性を調べ、単層から 3 層の薄膜試料の層数を決定できることを示した。また、円偏光励起発光測定のための顕微分光セットアップを構築し、単層  $\text{MoS}_2$  薄膜の円偏光励起発光スペクトルを得た。二次元層状物質である  $\text{MoS}_2$  薄膜の層数を発光ピークエネルギーと第二次高調波発生強度から迅速に非破壊的に決定できることを示した。

また、 $\text{MoS}_2$  薄膜の光伝導特性の研究を行った。光伝導特性の測定のためには、 $\text{MoS}_2$  薄膜に電極を形成する必要があるが、接触抵抗が高いことが問題となっていた。また、 $\text{MoS}_2$  薄膜が意図せずにドーパされた状態になっており光非照射時の暗電流が大きいことが問題となっていた。これらの問題の解決のために、本研究では 1, 2 ジクロロエタンに 17~72 時間浸して化学ドーピングをして接触抵抗の低減を図った。また、裏面ゲート電極により、 $\text{MoS}_2$  薄膜中キャリア密度を制御し、暗電流の低減を図った。実際、1, 2 ジクロロエタンに浸したことによる空乏層長の低減によるソースドレイン電流の増大を観測し、裏面ゲート電極によりキャリア密度

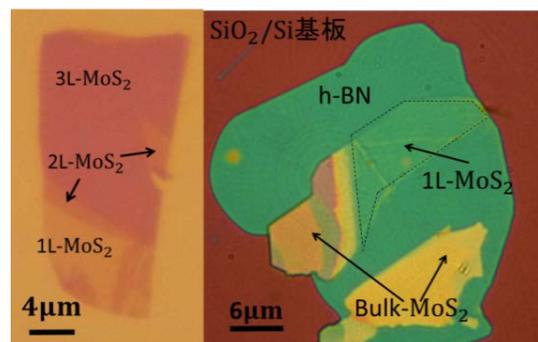


図 8： $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上に作製した  $\text{MoS}_2$  薄膜試料（左）および六方晶窒化ホウ素上に作製した  $\text{MoS}_2$  薄膜試料（右）の光学顕微鏡写真。

の制御が可能であることを示した。これらの手法により、光励起強度が 62 nW の場合に 3.2 A/W の受光感度を得た。これは従来の報告の 1.04 A/W より大きな受光感度であり、電極のショットキー障壁の高さの低減の効果が現れたものと考えられる。また、裏面電極制御によって暗電流が低減され、on-off 比として 100 倍以上を得ることに成功した。

<論文>

1. Syuhei Mamyouda, Hironori Ito, Yusuke Shibata, Satoshi Kashiwaya, Masumi Yamaguchi, Tatsushi Akazaki, Hiroyuki Tamura, Youiti Ootuka, and Shintaro Nomura: "Circularly polarized near-field optical mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge states", *Nano Lett.* **15**, 2417 (2015).
2. Ryosuke Ishiguro, Eiichiro Watanabe, Daisuke Sakuma, Shogo Tsuchiya, Yusuke Nago, Hirotaka Osato, Daiju Tsuya, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Development of nano and micro SQUIDs based on Al tunnel junctions", *Journal of Physics: Conference Series* **568**, 022019 (2014).
3. Shogo Tsuchiya, Misa Matsuno, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Magnetization of a Mesoscopic Superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  Plate on Micro-dc-SQUIDs" *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 094715, (2014).

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2015 年 3 月)

1. 大嶋 勇輝: 「ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果」
2. 塚本 知九馬: 「顕微円偏光励起による遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の発光スペクトルの研究」
3. 渡邊 寛之: 「裏面ゲート付き薄膜  $\text{MoS}_2$  の光伝導特性の研究」

<国際会議>

1. Y. Shibata and S. Nomura: "Imaging of magnetic flux induced by current in a Hall-bar structure with scanning Nb-SQUID microscope", *Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'14)* (Tsukuba, July, 2014).
2. Ryosuke Ishiguro, Eiichiro Watanabe, Daisuke Sakuma, Shogo Tsuchiya, Yusuke Nago, Hirotaka Osato, Daiju Tsuya, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Development of nano and micro SQUIDs based on Al tunnel junctions", *27th International Conference on Low Temperature Physics (Buenos Aires, Argentina, Aug. 2014)*.
3. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, T. Ohira, L. Yoshikawa, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Real-space Mapping of Spin-resolved Quantum Hall Chiral Edge States by Near-field Scanning Optical Microscopy", *The 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials, H-3-5* (Tsukuba, Sep., 2014).
4. Y. Shibata, Y. Osima, H. Kashiwaya, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, H. Takayanagi and S. Nomura: "Development of Scanning dc-SQUID system for local magnetic imaging", *The 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials* (Tsukuba, Sep., 2014).
5. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Imaging of spin-split incompressible strips in the quantum Hall chiral edge state", *the International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014)* (Kyoto, Dec., 2014).
6. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak: "Quasiexciton-Quasielectron Trion Emission in the Fractional Quantum Hall Effect Regime", *International Symposium on Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena 2015 (Miyagi-Zao, Feb., 2015)*.

<講演>

1. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎, M. Korkusinski, P. Hawrylak, 「分数量子ホール効果領域における準励起子-準電子発光」物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」(2014 年 4 月)

2. 野村晋太郎、「半導体二次元電子系へのベクトル整形パルス照射について」東京農工大学 科研費セミナー（2014年7月）
3. 野村晋太郎、「 $\nu=1/4$  近傍における三重項準励起子からの発光の消失」日本物理学会秋季大会、（2014年9月）
4. 柴田祐輔,大嶋勇輝,柏谷裕美,石黒亮輔,柏谷聡,高柳英明,野村晋太郎 「走査型 Nb-SQUID 顕微鏡を用いた  $^4\text{He}$  無冷媒冷凍機中の局所磁束観察」日本物理学会秋季大会（2014年9月）
5. 野村晋太郎、「極低温円偏光走査型近接場光学顕微鏡によるスピン分裂非圧縮性液体の観測」平成26年度東北大プロジェクト研究会「非平衡スピン・ゆらぎの精緻な制御と観測による新規ナノデバイスの開拓研究」（2014年11月）
6. 柴田 祐輔、「走査型 Nb 製弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡を用いた局所磁束観察」第10回 つくばナノテク拠点シンポジウム（2015年3月）
7. 篠崎智也, 佐藤太一, 永合祐輔, 石黒亮輔, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 前野悦輝, 高柳英明、「マイクロ SQUID を用いた  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  微小片の磁場侵入特性の研究」日本物理学会第70回年次大会（2015年3月）
8. 柴田祐輔,大嶋勇輝,柏谷裕美,石黒亮輔,柏谷聡,高柳英明,野村晋太郎 「走査型 Nb-SQUID 顕微鏡を用いた  $^4\text{He}$  無冷媒冷凍機中の局所磁束観察 II」日本物理学会第70回年次大会(2015年3月)。
9. 大嶋勇輝,伊東駿,野村晋太郎,三沢和彦、「GaAs 単一ヘテロ接合ホールバーへのベクトル波形整形波照射効果」日本物理学会第70回年次大会（2015年3月）

<外部資金>

1. 科学研究費 新学術領域研究（研究領域提案型）研究分野：対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象（領域代表：前野 悦輝）「量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究」研究課題番号：25103704，平成26年度：直接経費 2,300,000円（研究代表者：野村 晋太郎）
2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「ベクトル整形パルス励起による端電流制御」研究課題番号：26610079，平成26年度：直接経費 1,700,000円（研究代表者：野村 晋太郎）

## IX-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助教	森下將史
研究員	友利ひかり（科学技術振興機構さきがけ専任研究者）
大学院生	青木 仁、伊藤 優、片倉健太（数理物質科学研究科物理学専攻修士課程 2 年） 田中宏和、平出璃音可（同修士課程 1 年）
卒業研究	柴田倭宏（物理学類 4 年）

低温物性実験グループでは、グラフェンや単分子架橋系などのナノあるいはメソスコピックな導体系の電気伝導、微小ジョセフソン接合を利用した局所磁気計測および吸着ヘリウム薄膜の研究を行っている。博士課程修了後科研費研究員として在籍していた友利ひかりが、2014 年 10 月に科学技術振興機構さきがけ研究員（研究領域：素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクス創成）に採用された。神田准教授が受け入れ教員となり、「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」を研究テーマとし、引き続き当グループで研究を行うことになった。

### 【1】グラフェンの電気伝導

炭素の 2 次元原子層膜であるグラフェンの基礎物性の解明と、電子デバイス応用のための基盤技術の構築を目的として、以下の研究を行った。

#### (1) グラフェンへの局所ひずみ導入による電気伝導の制御

グラフェンには、格子ひずみによって伝導電子に対する実効的なゲージ場（ベクトルポテンシャル・スカラーポテンシャル）を生じるという特殊な性質がある。これをうまく利用するとグラフェンの電子状態を変調し、伝導ギャップを誘起して電子デバイスに応用することも可能となる。我々はこれまでに、グラフェンと基板の間にレジスト LOR でできたナノ構造を挿入することにより、グラフェンに任意のパターンの局所歪みを制御性よく導入する方法を開発してきた。しかしながら、レジスト LOR のナノ構造形成時の過剰な電子線照射によってグラフェンがダメージを受けていることがラマン分光と電気伝導測定から明らかとなった。そこで今年度は、低電子線量でナノ構造を形成するためのプロセス開発を行い、最終的に、レジスト HSQ (Hydrogen Silsesquioxane) の使用によって従来の 100 分の 1 の電子線量でレジストナノ構造を形成することに成功した。レジストナノ構造形成後には、欠陥の生成に由来するラマン D バンドが見られないことを確認した。今後はこの構造を用いてひずみを導入したグラフェンの電気伝導測定を行い、伝導ギャップの観測を目指す。

## (2) グラフェンへの電極接続の影響の評価とその軽減

グラフェンに電極金属を接続すると、両者の仕事関数の差によって、電極金属からグラフェンにキャリア(電子またはホール)が注入される。その結果、電極直下のグラフェン部分と電極から離れたグラフェン部分のキャリア密度に差が生じる。この電極金属からグラフェンへのキャリアの浸み出しは、見かけの電界効果移動度の大幅な減少をもたらすだけでなく、相対論的超伝導近接効果をはじめとするグラフェン特有の新奇物理現象の実験的検証を困難にしている。

そこで我々は、電極接続による局所キャリアドーピングを軽減することを目的として、グラフェンと電極との界面に多層グラフェン(MLG)を挟み込む手法を開発した。MLGは、他の金属に比べて単層グラフェンとの仕事関数の差が小さく、状態密度も小さいので、キャリア注入を少なくできることが期待される。

実験では、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上に劈開法によって形成した MLG を酸素プラズマエッチングにより整形し、単層グラフェン上に転写することで、グラフェン/MLG/金属(Cr/Au)接合からなる FET 構造を得た。また比較のために、MLG 界面層のない FET、サイドアーム構造を持つ FET も同一グラフェン上に作製した(図 1)。室温真空中の電気伝導率のバックゲート依存(4端子測定、図 2)では、サイドアーム構造を持つ FET においては Si 基板上で通常見られる V 字型の特性が見られるのに対し、MLG 界面層の無い FET においては V 字型は大きく崩れる。これは主に、電極からの局所電子ドーピングに起因する。一方 MLG 界面層を持つ FET では、V 字特性が回復し、電界効果移動度はサイドアーム構造を持つ FET と同等になった。このことから、MLG 界面層はグラフェン FET の特性向上に有効であることが示された。

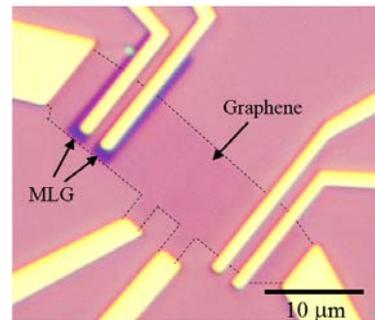


図 1 : 試料の光学顕微鏡写真

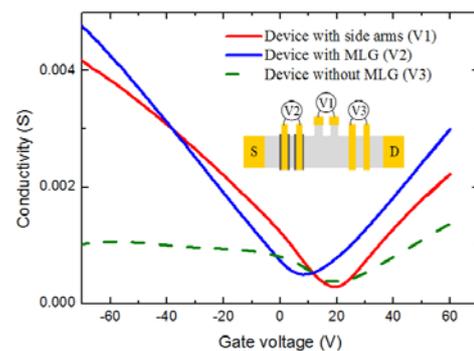


図 2 : 3 種のデバイス構造における電気伝導率のゲート電圧依存性。

## (3) 電子線照射によって生じるラマン D バンドの特徴とその起源の探求

グラフェンを用いた電子デバイスを作製する際には、電子線リソグラフィや電子顕微鏡観察などによるグラフェンへの電子線照射は不可避である。 $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上のグラフェンに電子線を照射すると、ラマン D バンドが出現することが知られているが、その詳細はわかっていない。特に、構造欠陥生成(炭素原子の弾き飛ばし(ノックオン))に必要なエネルギー(100keV 程度)よりも小さな加速電圧の電子線でも D バンドが生じており、その起源に興味もたれる。本研究では D バンドの起源を明らかにすることを最終目的としてさまざまな環境下のグラフェンのラマン分光測定を行った。

実験では、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上にグラフェンを形成し、50keV, 30keV, 10keV の電子線を照射し

た。また、対照実験として、構造欠陥を生成することが知られている酸素プラズマを照射した場合についても調べた。電子線を照射した場合には、すべての加速電圧で D バンドの形成が確認され、長時間レーザーを照射すると D バンド強度が減少する様子が観測された。一方、酸素プラズマの場合には、レーザー照射による D バンドの減少は確認されなかった。このことから、SiO<sub>2</sub>/Si 基板上にあるグラフェンに電子線を照射した場合、格子欠陥以外の原因で D バンドが形成されていると推察される。

## 【 2 】金属ナノコンタクトにおける熱現象

単原子ポイントコンタクトや単分子架橋系では nm オーダーの接合両端に  $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{eV}$  の電位差が集中する中で伝導が生じており、強い非平衡状態が起きていると考えられる。このような系でのエネルギー散逸についてはこれまでにいくつかの報告があり、局所過熱 (overheating) による接合部構造の不安定化によるコンダクタンスの揺らぎや破断寿命の低下が議論され、局所温度の増大やエネルギー散逸の非対称性が評価されている。しかし、これまでの実験で測定された局所温度はすべて格子温度である。強い非平衡状態においては、電子系と格子系は必ずしも同じ温度を持つとは限らず、区別して考える必要がある。我々は以前超伝導 MCBJ の電流電圧特性に特徴的な構造を見だし、電子系が超伝導状態から常伝導状態へ遷移したことによる構造、つまり、電子温度の過熱によるものであることを示した。今年度は Pb 及び Pb-Sn 合金による超伝導原子ポイントコンタクトの IV 特性を広い電圧範囲で調べ、以前に調べた Nb, Al, Sn と同様な過熱による超伝導・常伝導転移を確認した。また転移を起こす臨界電力の温度変化を調べるとともに、MBJ の熱伝導を簡単なモデルでシミュレートし、実験結果と矛盾しない結果を得た。さらに超伝導状態での過剰電流の評価から原子ポイントコンタクトの平均透過率を評価したところ、Pb-Sn と Pb で有意な差があり、合金による不純物散乱の影響であると考えられる。

さらに、この過熱による電子系相転移を利用し、コンタクト近傍で独立の微小温度計を超伝導 MCBJ 試料に取り付け電子系および格子系の局所温度計測を企図し準備を進めた。まず温度計として AuGe 抵抗温度計を検討し、組成を調整することで、室温～液体ヘリウム温度の領域で良好な感度を持つ  $200 \text{nm} \times 250 \text{nm} \times 60 \text{nm}$  の寸法をもつ極微温度センサーを得た。ついで電子線リソグラフィーで加工した Al-MCBJ 試料の上にこのセンサーを配置することを目指し、作製条件の検討を行った。

## 【 3 】グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における domain wall の流動性と Dirac 粒子系 (森下)

原子レベルで平坦なグラファイト表面に吸着した単原子層ヘリウム薄膜は、理想的な2次元系を与える。この系ではヘリウムの高い量子性のために、他の吸着系には見られない特異な吸着構造や、それを反映した物性が期待できる。実際、ヘリウム3 (<sup>3</sup>He) 薄膜では、特異な吸着構造がリング交換相互作用の競合に強く影響し、多彩な磁性の出現に関与していることが明らかになっている。一方、Bose 粒子系であるヘリウム4 (<sup>4</sup>He) 薄膜では、超固体など、新奇な

物理現象の出現が期待されるが、測定手段に乏しく、情報が著しく不足しているのが現状である。

本研究では、 $^4\text{He}$  薄膜の状態や吸着構造の調査を行う新たな測定手段として、グラファイト上に吸着した単原子層の  $^4\text{He}$  薄膜に少量の  $^3\text{He}$  を混入して熱容量測定を行っている。 $^4\text{He}$  は低温ではフォノンに由来する小さな熱容量しかもたないが、混入した  $^3\text{He}$  は Fermi 粒子であるために、その運動の自由度を反映して比較的大きな熱容量をもち、間接的に  $^4\text{He}$  薄膜に関する情報が期待できる。

薄膜の面密度を増していくと、整合固相である  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  相の面密度近傍で、熱容量はほぼゼロとなり、 $^3\text{He}$  が局在したことを示す。しかし、さらに面密度を増大させると再び熱容量が増大し、 $^3\text{He}$  が局在してはいないことを示唆する。従来、この面密度領域で  $^4\text{He}$  薄膜は固相であると考えられており、 $^3\text{He}$  の非局在は予測に反する結果である。また、より高面密度の領域で熱容量が温度の自乗に比例するなど、 $^3\text{He}$  が2次元 Fermi 流体としては異常な振る舞いを示す。これは、 $^4\text{He}$  薄膜が一様に融解して  $^3\text{He}$  が自由に運動しているわけではないことを示している。この面密度領域では、( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相の吸着サイトに関する) domain wall(DW)構造が安定な構造のひとつと考えられている。観測事実を説明するひとつの可能性は、DW の内部でのみ、ヘリウム原子が流動性を示すことである。DW 構造には、DW が平行に配列した striped DW 構造と、蜂の巣状に配列した honeycomb DW 構造が存在する。DW が流動性を有する場合、溶解した  $^3\text{He}$  原子は零点エネルギーを小さくするために DW 内に集り、striped DW 構造では  $^3\text{He}$  は1次元 Fermi 流体、或いは朝永-Luttinger 液体として振る舞うことが期待される。一方、honeycomb DW 構造の場合、 $^3\text{He}$  の運動の自由度は graphene 中の電子と良く似ており、 $^3\text{He}$  が Dirac 粒子として振る舞う可能性が期待できる。このとき、線形分散を反映して熱容量は温度の自乗に比例することとなり、観測された異常を説明できる。DW の構造、 $^3\text{He}$  の振る舞い、熱容量についてまとめると表1のようになる。

表1. domain wall の構造による  $^3\text{He}$  の振る舞いと熱容量の分類

構造	面密度	$^3\text{He}$ の振る舞い	低温	高温
striped	低	Tomonaga-Luttinger 液体	$C \propto T$	$C \approx N_3 k_B / 2$
honeycomb	高	Dirac fermion	$C \propto T^2$	$C \approx N_3 k_B$

昨年度に引き続き測定を行うことにより、表1のとおり熱容量が観測されることが確認された。これは、DW 中でのみヘリウム原子が流動性を示すことを強く示唆する結果である。また、高面密度領域 ( $9 \text{ nm}^{-2}$  以上) で、再び熱容量がほぼゼロとなり、 $^3\text{He}$  が局在すること、即ち  $^4\text{He}$  薄膜が固化することも確認された。

Dirac 粒子として振る舞っていると  $^3\text{He}$  原子は全て同じ速さで動き回っていることになるが、その速さを熱容量から見積もることができる。この値は、 $^3\text{He}$  の混入量が少ない方が大きくなっている。また、薄膜の面密度が  $7.3 \text{ nm}^{-2}$  でこの値は極大となり、 $8.4 \text{ nm}^{-2}$  近傍で最大となる。 $7.3 \text{ nm}^{-2}$ 、 $8.4 \text{ nm}^{-2}$  という面密度は honeycomb DW 構造の  $7 \times 7$ 、 $4 \times 4$  の周期性に対応し、蜂の巣格子の乱れが少ないほど速さが大きくなるとの期待に一致する。また、測定に用いているグラ

ファイト基盤が 10 nm 程度の大きさの結晶の集まりであるため、周期構造の小さい方が蜂の巣構造を良く定義でき、より速さが大きくなっていると考えられる。以上の結果も、DW のみが流動性を有しているとの仮説を支持する。

< 学位論文 >

( 修士論文 )

片倉健太: グラフェン電界効果トランジスタにおける電極接続の軽減 ( 数理物質科学研究科, 2015 年 3 月 )

( 卒業論文 )

柴田倭宏: Pb 系原子ポイントコンタクトにおける過熱効果、物理学類、2015 年 3 月

< 論文 >

1. S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, S. Nomura, Circularly Polarized Near-Field Optical Mapping of Spin-Resolved Quantum Hall Chiral Edge States, Nano Letters 15, 2417-2421 (2015).

< 講演 >

国際会議

1. Akinobu Kanda, Hikari Tomori, Youiti Ootuka,  
“Electron transport in graphene with one-dimensional local strain induced by dielectric nanostructures”,  
CECAM Workshop on graphene's strain engineering: Establishing connections between Condensed Matter Physics, Relativistic Quantum Field Theory, and Computational Mechanics, ETH, Zurich, Switzerland, July 14-16, 2014.
2. Hikari Tomori, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda,  
“Introduction of designed local strain to graphene using dielectric nanostructures”,  
CECAM Workshop on graphene's strain engineering: Establishing connections between Condensed Matter Physics, Relativistic Quantum Field Theory, and Computational Mechanics, ETH, Zurich, Switzerland, July 14-16, 2014
3. M. Morishita,  
“Fluidity of Domain Walls in Dilute  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  Mixture Films”,  
27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27) (Buenos Aires, August 7, 2014).
4. K. Katakura, Y. Ito, H. Tomori, Y. Ootuka and A. Kanda,  
“Characterization of Graphene/Metal Interface and Its Modification by Insertion of

- Thin Nano-Carbon Layer”,  
27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2014), ヒルトン福岡シーホーク、福岡市, Nov. 5-7,2014
5. H. Tomori, R. Hiraide, H. Tanaka, K. Katakura, Y. Itou, Y. Ootuka and A. Kanda,  
“Electron Transport in Graphene FETs with Small Spatial Variation of One-Dimensional Local Strain”,  
27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2014), ヒルトン福岡シーホーク、福岡市, Nov. 5-7,2014
  6. A. Kanda, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka,  
“Characterization of graphene/metal interface and its modification by insertion of thin nano-carbon layer”,  
APS March Meeting 2015, Henry B. Gonzalez Convention Center (San Antonio, USA), March 2-6, 2015
  7. H. Tomori, R. Hiraide, H. Tanaka, Y. Ito, K. Katakura, Y. Ootuka and A. Kanda,  
“Electron transport in graphene with uniaxial local strain”,  
APS March Meeting 2015, Henry B. Gonzalez Convention Center (San Antonio, USA), March 2-6, 2015
  8. Akinobu Kanda,  
“Strain-Engineered Electron Transport in Graphene”,  
2015 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Nanoscience and -technology, University of Duisburg-Essen (Germany), Mar. 16-17, 2015
  9. R. Hiraide, H. Tomori, Y. Ootuka, A. Kanda,  
“Improved method of inducing local strain in graphene for FET application”,  
2015 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Nanoscience and -technology, University of Duisburg-Essen (Germany), Mar. 16-17, 2015

#### 国内会議

1. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における Dirac 粒子系」, 物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」(東京大学物性研究所, 2014年4月18日).
2. 神田晶申, 「グラフェンにおける局所格子ひずみによる物性制御」, 第82回表面科学研究会原子膜研究の最前線, 東京工業大学、東京, 2014年7月23日
3. 廣瀬桃子, 大賀和人, 大塚洋一, Nbを用いたトンネル接合型マイクロ SQUID の開発 II, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大学、2014.9.8
4. 青木仁, 柴田倭宏, 大塚洋一, 超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大学、2014.9.9
5. 柴田倭宏, 青木仁, 大塚洋一, 超伝導原子ポイントコンタクトにおける過熱効果, 日本物理学

会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.9

6. 深津晋, 一宮彪彦, 井通暁, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 岸澤眞一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 下田正, 真梶克彦, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山澗志, 長谷川修司, 味野道信, 物理チャレンジ 2014 報告:IV 第 2 チャレンジ実験問題, 日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7
7. 田中宏和, 平出璃音可, 大塚洋一, 友利ひかり, 神田晶申, 「電子線照射したグラフェンのラマンスペクトル」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学、札幌, 2014 年 9 月 17-20 日
8. 平出璃音可, 田中宏和, 片倉健太, 大塚洋一, 友利ひかり, 神田晶申, 「周期的 1 軸ひずみを導入したグラフェン電界効果トランジスタ構造の作製と電気伝導評価」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学、札幌, 2014 年 9 月 17-20 日
9. 友利ひかり, 平出璃音可, 田中宏和, 大塚洋一, 神田晶申, 「緩やかに変化する 1 軸局所ひずみを導入したグラフェンの電気伝導特性」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学、札幌, 2014 年 9 月 17-20 日
10. 友利ひかり, 平出璃音可, 田中宏和, 大塚洋一, 神田晶申, 「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」, グラフェンの電気伝導に関する勉強会, 奈良女子大学, 2014 年 12 月 15-16 日
11. 神田晶申, 片倉健太, 伊藤優, 大塚洋一, 「グラフェンの超伝導近接効果の観測に向けた最近の実験」, グラフェンの電気伝導に関する勉強会, 奈良女子大学, 2014 年 12 月 15-16 日
12. 神田晶申, 「SiC 上グラフェンの伝導測定」, 第 7 回九大グラフェン研究会, 九州大学応用力学研究所, 2015 年 2 月 10 日
13. 片倉健太, 伊藤優, 田中宏和, 平出璃音可, 大塚洋一, 友利ひかり, 神田 晶申, 「グラフェン電界効果トランジスタにおける電極接続の影響の軽減」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川), 2015 年 3 月 11-14 日
14. 林真吾, 森田康平, 梶原隆司, ビシコフスキー アントン, 飯盛拓嗣, 小森文夫, 田中宏和, 神田晶申, 田中悟, 「SiC 高指数面ファセット上に現れるグラフェン擬 1 次元構造」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川), 2015 年 3 月 11-14 日
15. 友利ひかり, 平出璃音可, 田中宏和, 伊藤優, 片倉健太, 大塚洋一, 神田晶申, 「空間変化するひずみのあるグラフェンの電気伝導特性」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学(東京), 2015 年 3 月 21-24 日
16. 片倉健太, 伊藤優, 友利ひかり, 大塚洋一, 神田晶申, 「グラフェンの輸送特性に対する電極接続の影響とその軽減」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学(東京), 2015 年 3 月 21-24 日
17. 林正彦, 吉岡英生, 友利ひかり, 神田晶申, 「架橋構造のグラフェン・ナノリボンにおける形状による歪みのコントロール」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学(東京), 2015 年 3 月 21-24 日

18. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における Dirac 粒子系」, 日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学, 2015 年 3 月 23 日).

<受賞>

1. H. Tomori, R. Hiraide, H. Tanaka, Y. Ito, K. Katakura, Y. Ootuka and A. Kanda: MNC2013 Award for Most Impressive Poster (Nov. 4, 2014)

<外部資金>

1. 神田晶申: 科学研究費補助金 基盤研究 B 「歪み誘起ゲージ場を用いたグラフェンのエネルギーギャップの生成と制御」(H25~H27)、直接経費 240 万円
2. 神田晶申: 科学研究費補助金 新学術領域研究 「単層/多層グラフェンにおける超伝導近接効果」(H26~H27)、直接経費 270 万円
3. 友利ひかり: 戦略的創造研究推進事業さきがけ(科学技術振興機構)「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」(H26~H30)、直接経費 970 万円

## IX-6. 構造科学グループ

教授

西堀 英治

### 【 1 】 放射光X線回折データを用いた電子密度解析の研究

#### (1) Hydrogen Maleate の特異な水素結合の解析(論文 1)

二つの酸素に挟まれた空間に水素が位置する Hydrogen Maleate の水素位置、水素電子密度分布の解明を SPring-8 の単結晶ビームラインを使って行った。単結晶回折データの測定と多極子展開解析により、通常の独立原子モデルの構造解析では検出が不可能な水素位置を決定することに成功した。このデータを、西オーストラリア大との共同研究により開発中の Hirshfeld atom 法で解析し、水素位置、水素の電子密度分布を精密に得ることに成功した。

#### (2) $\alpha$ ボロンの精密電子密度分布解析

周期表に存在する単体固体の中で、室温、常圧での安定相が未知な単体ボロン  $\alpha$  相について結合形態を、電子密度研究により調べた。これまでの報告の中で最も高い逆空間分解能  $d > 0.3 \text{ \AA}$  のデータを多重の粉末回折データにより実現し、これまでの複数の電子密度報告の矛盾点の原因を解明し、電子密度を得ることに成功した。その結果、B12 クラスタ内の金属的な結合、クラスタ間の強弱 2 種類の 2 中心、3 中心結合を電子密度として可視化することに成功した。また、この研究で、結合長の  $1/4$  以下の分解能のデータが定量的な電子密度解析に必要となることを示した。

### 【 2 】 分子性新材料の構造決定の研究

新規に合成された分子性物質の構造決定は、重要である。放射光単結晶および粉末 X 線回折により決定した。

#### (1) 金属錯体一次元鎖とナノチューブ複合体の熱電特性

熱電特性を示す金属錯体一次元鎖について、実験室を用いた単結晶回折実験では見出せなかった金属原子の部分占有を SPring-8 の単結晶粉末回折データから実験的に観測した。この構造に基づき、金属原子を Co, Zn, Ni と変化させた一連の物質群の構造決定に成功した。一次元鎖構造が確定され、この一次元鎖をカーボンナノチューブに巻きつけた複合材料が熱電特性を示すことが分かった。

#### (2) ドナー・アクセプター接合分子の構造決定による第二高調波発生の起源

Si-Si によって接合されたドナー・アクセプター接合分子の粉末試料が第二高調波発生 (SHG) を示し、その機構解明が注目されていた。大型の単結晶を作成し単結晶構造解析を行ったところ、対称心をもつ結晶構造が得られ、SHG の発生機構が未解明だった。合成条件を変えて作成された微結晶の放射光単結晶構造解析により、SHG を示す粉末の中に、対称心を持たない結晶構造を持つ物質が存在することを見出した。得られた対称心のない結晶構造から SHG の起源について議論した。

### (3) 粉末試料からの遺伝的アルゴリズムによる構造決定

フェロセン・アントラキノン共役接合錯体は、溶媒などを吸着する多孔性材料の形成など多彩な物性、機能を示すことから注目を集めている。フェロセンとアントラキノンにフェニル基を付加した物質が合成されたが、微粉末しか得られず構造が決定できなかった。本グループで開発した粉末試料からの遺伝的アルゴリズムによる構造決定法を放射光粉末回折データの解析に利用して3次元構造を決定することに成功した。

## 【 3 】 機能性酸化物の構造科学研究

サーモクロミック材料や誘電体など機能性酸化物についても放射光を利用した構造研究を国際共同研究として推進した。

### (1) W ドープ VO<sub>2</sub> サーモクロミック材料の構造評価

太陽光の効率的な取り込みと遮蔽によりエアコンの利用効率を高め得るサーモクロミックガラスは、省エネの観点から注目されている。サーモクロミック材料の候補の一つに、室温付近で金属―絶縁体転移を示し、太陽光の透過率が変化する強相関電子系 VO<sub>2</sub> がある。この物質は、相転移温度を W のドープなどで制御できることから、幅広く研究されてきた。中国科技院広州エネルギー研究所のグループは低コストでのサーモクロミック材料の開発のために、ワンステップの水熱合成法により簡便に W ドープ量を制御して合成された VO<sub>2</sub> ナノロッドの合成に成功した。この物質の構造および W ドープに伴う相転移温度評価を放射光 X 線回折により調べた。ドープ量の増加に伴う相転移温度の変化を決定するとともに、仕込み組成と生成物の W ドープ量を精密に評価した。この研究に基づき、ナノロッドを分散させたサーモクロミックガラスも作成され特性が評価された。

### (2) Pb フリーの誘電体材料の開発と構造決定

環境への配慮から進められている Pb フリーの誘電体材料の開発を、イギリスのリバプール大、アメリカ・ヒューストン大、理研と共同で推進した。リバプール大で材料開発を行った博士の学生を日本の理研に招き、その学生に放射光実験および構造解析を指導する形で研究を進めた。Bi と Ca で Pb を置き換えたペロブスカイト構造について、組成変化に伴う構造変化を系統的に調べた。その結果、誘電率がリラクサーの高まるモルフォトロピック相境界において、これまでに発見されてきたペロブスカイトとは全く異なる空間群を持つことを、放射光粉末回折で発見し、電子線回折、収束電子回折による空間群の精密決定を通して、最終的に構造を決定した。また誘電率測定用のペレットサンプルに電場を印可しての回折実験測定、そのペレットの回折データの温度依存性の測定から、圧電特性が見られる軸方向を実験的に決定した。

< 論 文 >

(査読論文)

1. M. Woinska, D. Jayatilaka, M. A. Spackman, A. J. Edwards, P. M. Dominiak, K. Wozniak, E. Nishibori, K. Sugimoto and S. Grabowsky. "Hirshfeld atom refinement for modelling strong hydrogen bonds." *Acta Cryst.* (2014). **A70**, 483-498.
2. Eiji Nishibori\*, Hiroshi Hyodo, Kaoru Kimura, Masaki Takata. "Revisit: High resolution Charge Density Study of  $\alpha$ -rhombohedral boron using third-generation SR data at SPring-8" *Solid State Sciences* (2015) In press.
3. Ryota Matsuoka, Ryojun Toyoda, Ryota Sakamoto\*, Mizuho Tsuchiya, Ken Hoshiko, Tatsuhiko Nagayama, Yoshiyuki Nonoguchi, Kunihiisa Sugimoto, Eiji Nishibori, Tsuyoshi Kawai and Hiroshi Nishihara\*." Bis(dipyrrinato)metal(II) coordination polymers: Crystallization, exfoliation into single wires, and electric conversion ability. " *Chemical Science* (2015) **6**, 2853-2858.
4. Masaki Shimada, Yoshinori Yamanoi\*, Tomonori Matsushita, Takashi Kondo, Eiji Nishibori, Akari Hatakeyama, Kunihiisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara\*. "Optical Properties of Disilane-Bridged Donor-Acceptor Architectures: Strong Effect of Substituents on Fluorescence and Non-linear Optical Properties." *J. Am. Chem. Soc.* **137** (2015) 1024-1027
5. Eiji Nishibori, Shinobu Aoyagi, Makoto Sakata, Ryota Sakamoto and Hiroshi Nishihara.. "Crystal structure of (Z)-1-(ferrocenylethynyl)-10-(phenylimino)anthracen-9(10H)-one from synchrotron X-ray powder diffraction." *Acta Cryst.* (2014). **E70**, 573-576
6. Ru Chen, Lei Miao\*, Haoliang Cheng, Eiji Nishibori\*, Cheng Yan Liu, Toru Asaka, Yuji Iwamoto, Masaki Takata and Sakae Tanemura.. "One-step hydrothermal synthesis of  $V_{1-x}W_xO_2(M/R)$  nanorods with superior doping efficiency and thermochromic properties." *J. Mater. Chem. A.* **3** (2015) 3726-3738.
7. Pranab Mandal, Alicia Manjon-Sanz, Alex J. Corkett, Tim P. Comyn, Karl Dawson, Timothy Stevenson, James Bennett, Leonard F. Henrichs, Andrew J. Bell, Eiji Nishibori, Masaki Takata, Marco Zanella, Michelle R. Dolgos, Umut Adem, Xinming Wan, Michael J. Pitcher, Simon Romani, T. Thao Tran, P. Shiv Halasyamani, John B. Claridge,\* and Matthew J. Rosseinsky\*. "Morphotropic Phase Boundary in the Pb-free  $(1-x)BiTi_{3/8}Fe_{2/8}Mg_{3/8}O_{3-x}CaTiO_3$  System: Tetragonal Polarization and Enhanced Electromechanical Properties. " *Advanced Materials.* (2015) **27**, 2883-2889.
8. Daisuke Ogawa, Kitaura, T. Saito, Shinobu Aoyagi, Eiji Nishibori, Makoto Sakata, T. Nakamura and Hisanori Shinohara, "Observation and Characterization of Fragile Organometallic Molecules Encapsulated in Single-Wall Carbon Nanotubes." *Journal of Nanomaterials.* 539295 (2014).

<国際会議>

1. Eiji Nishibori, Structural Studies of Functional Materials Using Synchrotron X-Ray Diffraction. 2015 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Nanoscience and -technology, March 17, 2015, Duisburg, Germany. (招待講演)
2. Eiji Nishibori, Application of maximum-entropy electrostatic potential in Materials Science. Congress and General Assembly of the International Union of crystallography. August 5-12, 2014, Montreal, Quebec, Canada. (招待講演)
3. Eiji Nishibori, Element-selective charge density for materials science using synchrotron X-ray multi-wavelength anomalous powder diffraction data. International Union of Materials Research Societies- The IUMRS International Conference in Asia 2014, August 24-30, 2014, Fukuoka, Japan

<国内会議>

1. 西堀英治「Current Status of Accurate structural studies by Synchrotron X-ray Diffraction.」日本顕微鏡学会第70回記念学術講演会シンポジウム英語セッション世界結晶年企画：電子顕微鏡による精密結晶構造解析 —高精度化への挑戦— 2014/5/12, 幕張メッセ国際会議場 (招待講演)
2. 西堀 英治 「放射光X線を用いたナノ空間を有する物質の構造科学研究」平成26年度TIMS研究交流会 2014/7/8, 筑波大学 大学会館
3. 守友 浩、柴田恭幸、小林渡、西堀英治、「層状酸化物  $AMO_2$  の電子レベルの構造解析」第55回電池討論会、2014/11/19, 京都国際会館 (京都)
4. 西堀英治「エネルギー変換・貯蔵物質部門の国際戦略」第1回 CiRfSE ワークショップ 2015/3/12-13, 筑波大学総合研究棟 B

<その他>

1. 西堀英治「結晶学の基礎 -IYCr2014 を迎えて-」第6回日本放射光学会 放射光基礎講習会「初心者のための放射光入門講座」2014/8/1-2, 東京大学工学部

## XI 物理教育および物理教育の研究

### 【1】物理教育

#### (1) 学類教育 (都倉康弘)

平成 26 年度は、4 月には 65 名が 1 年次に入学し、また 66 名の 4 年次学生が各研究室に配属され卒業研究を行った。平成 26 年度の卒業生は 66 名であり、その進路は、大学院進学が 54 名、就職が 10 名 (民間企業 7 名, 教員・公務員 3 名), その他 (進学準備中など) 2 名である。

物理学類の教育は、カリキュラム委員会にて審議・検討し、学類教育会議に諮り最終的な決定を行う。平成 26 年度も、平成 25 年度から実施された 2 学期制に対応した新カリキュラムに基づき進め、逐次検証を進めている。また、近年の入学生の広範なスペクトルに対応するため、能動的な学習を促進するための科目 (課題探究実習セミナー) を継続して開講し、主要科目においては講義と演習を一体化した形式での授業を進めている。さらに、1 年次での大学の物理でのつまづきをなくすため、夏休みに 1 学期科目 (力学, 電磁気学) の補習を行った。また、教育の効率化と学生の能動的学習の支援のため、e-ラーニングを活用している。特に専門分野に特有の英語の教育のためのシステムを開設している。2 学期制移行に伴い 7 月末～8 月の気温が  $30^{\circ}$  を越える過酷な時期に行われる物理実験に配慮して、実験室に空調装置を配置した。

またこれまで 1 年生の科目についてのみ学生による授業評価を実施してきたが、平成 26 年度からは物理学実験を含む大部分の科目について授業評価を実施し、その評価結果を担当教官にフィードバックするほかクラス連絡会で教員・学生の参加のもと教育の質の向上のための議論を行った。

物理学類の在籍者は、1 年次 65 名, 2 年次 63 名, 3 年次 76 名, 4 年次 69 名である。本年度に行われた入学試験は、実施時期の順に、編入学試験 (志願者 10 名, 合格者 3 名), 国際バカロレア特別入試 (志望者なし), アドミッションセンター入試 (志願者 8 名, 合格者 2 名), 国際科学オリンピック特別入試 (志願者 2 名, 合格者なし), 推薦入試 (志願者 33 名, 合格者 15 名), 個別学力検査・前期日程 (志願者 124 名, 合格者 46 名), 私費外国人留学生入試 (志願者 4 名, 合格者 1 名) である。2015 年 4 月には 62 名が入学した。個別学力検査 (前期日程) 志願倍率は例年より少し少なめで 2.9 倍と推薦入試が 2.2 倍であった。

## (2) 大学院教育 (今井 剛)

物理学専攻では、専門分野における独創的な研究能力と科学技術に対する柔軟な応用力に加えて、近年は国際的な視野や俯瞰力を持ったグローバル性を具えた研究者・高度職業人を養成することを目標に教育活動を行っている。社会人を対象にした早期修了プログラム、ダブル・デグリー、デュアル・デグリー、インターシップ等の多様な教育に対応している。

教育の向上に関しては、学類と同様にカリキュラム委員会にてその内容を審議し、教員会議に諮り最終的な審議、承認を行っている。平成26年度は、仏国グルノーブル大学とのダブル・デグリープログラムが始動した。

大学院入試は、7月の推薦入試(前期課程のみ、定員15名)と、8月と2月に一般入試(前期課程定員35名、後期課程定員20名)を行っている。今年度の入試結果は下の表の通りであり、例年よりも多くの受験者が8月期に集まった。先の5月に行われたオープンキャンパスでも、例年の1.5倍の参加者があり、大盛況であった。各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外の参加者が主体である。

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)
7月 (前期推薦)	30 (12)	17 (4)
8月+2月 (前期)	95+12 (50+7)	62+9 (25+5)
8月+2月 (後期)	2+13 (0+4)	2+12 (0+3)

平成26年度の就職進学状況は下の表のようになっている。前期課程から後期課程への進学率が高いことであるが、ここ2-3年は少し減少気味である。後期課程修了者では研究員等として研究を続ける学生が多いことが物理学専攻の特徴である。

### 前期課程

進学	企業	独法	教員	公務員	その他
13	29	0	2	3	7

### 後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	その他
0	7	1	1	0	0

## 【2】体験学習（小沢 顕）

物理学類では、大学における物理学の教育内容を高校生に知ってもらうために、体験学習を毎年実施している。平成26年度は、8月7日（木）に実施し、60名の参加者があった。学類長の説明のあと、物理学に関する講義4件を開講し、その後、物理学実験（参加者は4テーマの内から一つ選択）を行った。実験終了後、質疑応答と修了式を行い、さらに希望者は学内センターの見学を行った。

具体的な内容と時間進行は以下の通りである。

9:30～9:40	物理学類長挨拶 および 事務連絡	都倉康弘
9:40～10:00	物理学類説明、実験内容説明、アンケート	小沢顕, 中嶋洋輔
10:05～10:40	【講義1】 素粒子	山崎剛
10:45～11:20	【講義2】 原子核	矢花一浩
11:25～12:00	【講義3】 宇宙	中井直正
12:00～13:00	昼 食	
13:00～13:35	【講義4】 物性	岡田晋
13:40～13:50	実験の組み分け	中嶋洋輔
13:50～16:30	【物理実験】 ① 水と固体の比熱 ② 放射線と宇宙線 ③ 極低温現象 ④ 光の干渉と回折	東山和幸 長江大輔 大塚洋一 冨本慎一
16:35～17:00	質疑応答	都倉康弘, 小沢顕
17:05～17:20	修了式	都倉康弘, 小沢顕
17:30～18:00	センター見学 計算科学研究センターまたはプラズマ研究センター	

右端が担当者であるが、その他に多数の学群生、大学院生、事務方の協力を得た。最後にアンケートを回収した。講義、実験に対して、ほとんどの参加者が興味を持ってもらえたようであるが、必ずしも内容を理解できた訳ではない。今後改善していきたい。

### 【3】カリキュラム関係（小沢 顕）

平成 26 年度中のカリキュラム関係の報告は以下の通りである。

#### 1. 学類カリキュラム

##### （1）授業評価について

平成 26 年度より全ての学類授業で授業評価を行うことになり、そのためのアンケートを作成し、実施した。

##### （2）生物学類授業のコードシェアに関して

平成 27 年度より、生物学類の「分子進化学 1」「分子進化学 2」の授業をコードシェアすることになった。さらに、「分子進化学 1」を生物学の教職科目に加えることにした。

##### （3）総合科目に関して

平成 29 年度より、総合科目 III を開設する必要がある。「現代物理学への招待 I」「現代物理学への招待 II」「現代物理学への招待 III」の内容を検討し、この一部を総合科目 III に移す方向で検討を始めている。

##### （4）他学類向けの講義に関して

他学類向けの「基礎」のつく科目については、高校で「物理」を履修していない者を対象とし、高校で「物理」を履修した者は「基礎」のついていない科目を履修するようにする。これは、平成 27 年度の「授業科目一覧」には反映されていないので、平成 28 年度の「授業科目一覧」及び「シラバス」の備考欄に記述する。

#### 2. 大学院カリキュラム

##### （1）授業評価について

大学院の授業のためのアンケートを作成し、実施した。

##### （2）「数理物質科学研究科オナーズプログラム」について

平成 27 年度より数理物質科学研究科で新オナーズプログラムがスタートする。

##### （3）研究科倫理教育セミナー「研究倫理をどう守るか」に学位論文を控えた修士 2 年と博士後期 3 年生を参加させた。

#### 3. 新たな教育方法の開拓と実践

##### （1）学生の能動的な学習を喚起させるために、前年度に引き続いて「課題探求実習」を実施している。

##### （2）物理学の教育では、講義による知識の吸収と、知識をさらに深く理解するための演習形式の学習を統合した形の授業を力学、電磁気学、統計力学で実施している。

##### （3）講義資料の閲覧やレポートの提出などに、学習管理システム manaba を積極的に活用している。

##### （4）現代社会において必須である英語の強化の観点から、英語を母国語とする講師の授業を引き続き開講している。平成 27 年度から、科学英語担当の専任外国人 1 名を助教として採用している。

#### 4. 教養教育、リメディアル教育

- (1) 高校で物理を習っていない主に文科系の学生を対象とした総合科目「現代人のための科学 I」、「初めて学ぶ物理学 I・II」を開講している。また、より広い学生を対象とした高度な内容まで含んだ「現代物理学への招待」も開講している。平成 29 年までには、「現代物理学への招待」の一部を総合科目 III として開講する予定である。
- (2) 1 年次春学期の科目「力学 1」、「電磁気学 1」、「基礎力学 1」、「基礎電磁気学 1」の補習を夏休み（平成 26 年 9 月 24, 25 日）に実施した。合計 9 名の参加があった。

# 《大学院資料》

## 大学院生・卒業研究生・学振特別研究員 員数表

平成26年度

	博士						卒研 生	* 学振		* TA	合計
	M1	M2	D1	D2	D3	小計		PD	DC		
素粒子理論	3	4	0	0	2	9	3	0	{ 0 }	[ 9 ]	12 { 0 } [ 9 ]
宇宙理論	5	5	2	2	2	16	7	1	{ 3 }	[ 7 ]	24 { 3 } [ 7 ]
原子核理論	3	1	1	0	1	6	2	0	{ 2 }	[ 5 ]	8 { 2 } [ 5 ]
非平衡統計物理	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[ 0 ]	0 { 0 } [ 0 ]
量子物性理論	0	2	0	1	1	4	3	0	{ 1 }	[ 2 ]	7 { 1 } [ 2 ]
ナノ量子物性	1	0	0	0	0	1	1	0	{ 0 }	[ 1 ]	2 { 0 } [ 1 ]
計算物性物理	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[ 0 ]	0 { 0 } [ 0 ]
ナノ構造物性 (D1ナノ, D2ナノ・D3ナノ)	2	3	3	2	1	11	2	0	{ 0 }	[ 5 ]	13 { 0 } [ 5 ]
量子輸送研究 (D1ナノ, D2ナノ, D3ナノ)	2	1	2	1	1	7	3	0	{ 0 }	[ 3 ]	10 { 0 } [ 3 ]
生命物理	0	2	0	0	0	2	4	0	{ 0 }	[ 2 ]	6 { 0 } [ 2 ]
素粒子実験	6	9	2	2	1	20	8	0	{ 0 }	[ 15 ]	28 { 0 } [ 15 ]
宇宙観測	6	2	1	1	0	10	3	1	{ 1 }	[ 10 ]	14 { 1 } [ 10 ]
原子核高エネ	6	3	3	2	3	17	5	0	{ 0 }	[ 9 ]	22 { 0 } [ 9 ]
原子核低エネ	1	3	1	1	3	9	0	0	{ 0 }	[ 4 ]	9 { 0 } [ 4 ]
磁性物性	2	3	0	1	0	6	4	0	{ 0 }	[ 2 ]	10 { 0 } [ 2 ]
ナノフォトニクス (D3ナノ)	5	1	0	0	1	7	4	0	{ 0 }	[ 5 ]	11 { 0 } [ 5 ]
光ナノ物性 (D3創)	3	3	0	0	1	7	3	0	{ 0 }	[ 3 ]	10 { 0 } [ 3 ]
強相関物性	2	9	1	1	1	14	3	0	{ 0 }	[ 6 ]	17 { 0 } [ 6 ]
低温物性	2	3	0	0	0	5	1	0	{ 0 }	[ 4 ]	6 { 0 } [ 4 ]
プラズマ	7	11	0	0	3	21	11	0	{ 0 }	[ 10 ]	32 { 0 } [ 10 ]
物質材料	1	1	/	/	/	2	0	0	{ 0 }	[ 0 ]	2 { 0 } [ 0 ]
合計	57	66	16	14	21	174	67	2	{ 7 }	[ 102 ]	243 { 7 } [ 102 ]
(ナノ・創)	0	0	5	3	4	12	0	0	{ 0 }	[ 4 ]	12 { 0 } [ 4 ]

\*学振欄の{ }内数字はDC1, DC2で内数、{ }なし数字は、PDで外数

\*[ ]は大学院生のため内数

## 学位論文取得者一覧

### 【博士論文】

<課程博士> [ ] 内は指導教員名  
数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 山田 真徳 [金谷 和至]  
A study of the Omega-Omega interaction using the central potential in Lattice QCD  
(格子QCDでの中心力ポテンシャルを用いたオメガバリオン間の相互作用に関する研究)
- 2) 趙 栄貴 [石塚 成人]  
Improvement of the Brillouin fermion action for heavy quark  
(重いクォークの物理に向けたブリルアンフェルミオン作用の改良)
- 3) 小松 勇 [梅村 雅之]  
Absorption efficiencies of antenna complexes in photosynthetic organisms exposed to the photoenvironment of extrasolar planets  
(太陽系外惑星の光環境にさらされた光合成生物のアンテナ複合体の吸収効率)
- 4) 田中 賢 [梅村 雅之]  
A new ray-tracing scheme for radiation hydrodynamic simulations on highly parallel architectures  
(並列プロセッサに最適化されたレイトレーシング法による輻射流体シミュレーション)
- 5) 関澤 一之 [矢花 一浩]  
Multinucleon Transfer Reactions and Quasifission Processes in Time-Dependent Hartree-Fock Theory  
(時間依存Hartree-Fock理論による多核子移行反応と準核分裂過程)
- 6) 尾澤 岬 [初貝 安弘]  
Numerical Study of Glassy Systems: Fragility of Supercooled Liquids, Ideal Glass Transition of Randomly Pinned Fluids, and Jamming Transition of Hard Spheres  
(ガラス系の数値的研究：過冷却液体のフラジリティ、ランダムピンニング系の理想ガラス転移、剛体球系のジャミング転移)
- 7) 木内 健司 [受川 史彦]  
Search for the Standard Model Higgs boson decaying to a bottom-quark pair with the ATLAS detector  
(ATLAS検出器を用いたボトム・クォーク対に崩壊する標準模型ヒッグス粒子の探索)
- 8) 市村 和也 [中嶋 洋輔]  
Study of End-loss Ion Flux in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror for Divertor Simulation  
(ダイバータ模擬の為のGAMMA 10/PDXタンデムミラーにおける端損失イオン束に関する研究)

9) 武田 寿人 [中嶋 洋輔]

Numerical Simulation Study of Plasma Flow in the GAMMA 10/PDX End-cell by  
Using a Fluid Code

(流体コードを用いたGAMMA 10/PDXエンドセルにおけるプラズマ流の数値シミュレーション研究)

【修士論文】

<博士課程修士> [ ] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 宮本 貴也 [金谷 和至]  
格子QCDを用いた  $\Lambda c$ -N核子間相互作用の研究
- 2) 酒井 慧 [藏増 嘉伸]  
テンソル繰り込み群の開発と応用
- 3) 寺松 宏平 [石塚 成人]  
I=2  $\pi\pi$  散乱における HAL method での演算子依存性
- 4) 鈴木 遊 [吉江 友照]  
カノニカル法を用いた格子QCDにおける高次キュムラントの計算
- 5) 小野間 章友 [梅村 雅之]  
バリオンとダークマターの相対速度が及ぼす初期構造形成への影響
- 6) 山崎 健太郎 [梅村 雅之]  
ブラックホール降着円盤における輻射抵抗による磁気回転不安定性について
- 7) 渡邊 歩 [梅村 雅之]  
宇宙大規模構造における高温ライマン $\alpha$  吸収体の物理的性質
- 8) 加藤 一輝 [森 正夫]  
Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性
- 9) 村田 貴紀 [森 正夫]  
銀河形成初期のアウトフローと銀河形状
- 10) 五畠 祐希 [矢花 一浩]  
Gogny力を用いたHFBによる質量数 $A \leq 50$ 領域における中性子過剰原子核の構造
- 11) 大野 修平 [初貝 安弘]  
フォトニック結晶におけるバルク・エッジ対応
- 12) 關 大地 [初貝 安弘]  
ナノグラフェン境界の電子状態の理論
- 13) 木暮 聖太 [岡田 晋]  
ナノカーボン複合構造体の物質設計と物性解明
- 14) 白川 裕規 [岡田 晋]  
シリコン系絶縁膜中の格子欠陥のSiデバイスへの影響の理論的考察
- 15) 藤田 弦暉 [岡田 晋]  
ナノ構造中における電子輸送の理論的研究

- 16) 酒井 一樹〔都倉 康弘〕  
Round-Robin差動位相シフト量子鍵配送の改良プロトコルおよび鍵生成率への散逸の影響
- 17) 氏家 謙〔重田 育照〕  
トレオニン合成酵素における基質特異性決定過程の理論解明：熱力学積分法による自由エネルギー解析
- 18) 田中 弥〔重田 育照〕  
ウリジンシチジンキナーゼの基質認識機構についての理論的解明
- 19) 萩原 睦人〔受川 史彦〕  
HL-LHC用ATLASシリコンマイクロストリップセンサーの陽子照射による放射線耐性の評価
- 20) 市村 龍哉〔金 信弘〕  
ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の研究開発
- 21) 臼井 純哉〔金 信弘〕  
HL-LHCでのATLAS実験に用いるn-on-p型プラナーピクセルセンサーのテストビームによる性能評価
- 22) 奥平 琢也〔金 信弘〕  
ニュートリノ崩壊光探索のためのニオブとアルミニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の開発研究
- 23) 金丸 昌弘〔金 信弘〕  
ニュートリノ崩壊探索ロケット実験の設計のためのシミュレーション解析
- 24) 本多 俊介〔原 和彦〕  
2層埋込酸化膜構造をもつSOIピクセル検出器の基礎特性および放射線耐性の研究
- 25) 本田 卓也〔原 和彦〕  
ILC用細分割電磁カロリメータのための光検出器MPPCの応答特性評価
- 26) 村雨 梓〔原 和彦〕  
国際リニアコライダー実験に用いるシンチレータ電磁カロリメータのシミュレーションによる性能評価
- 27) 北本 翔子〔中井 直正〕  
南極10m級テラヘルツ望遠鏡の電波カメラ系反射鏡群の構造設計
- 28) 小林 和貴〔中井 直正〕  
南極10m級テラヘルツ望遠鏡の強度較正法に関する研究
- 29) 沢畑 克樹〔小沢 顕〕  
陽子過剰Si、Ar同位体の荷電変換断面積の測定
- 30) 泉 大希〔笹 公和〕  
PHITSを用いたAMS測定条件の評価と宇宙線生成核種の測定

- 31) 新井 郁也〔和田 道治〕  
超重元素の精密質量測定のためのイオンサーフィン型高周波イオンガイドガスセルの開発
- 32) 佐藤 航〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験における超前方光子測定用電磁カロリメーター試作機のデータ収集系の構築と性能評価
- 33) 野中 俊宏〔江角 晋一〕  
高時間分解能飛行時間測定器Multi-gap Resistive Plate Chamber(多段型MRPC)の開発；データ収集システムの構築と宇宙線による性能評価
- 34) 細川 律也〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験 EMCAL/DCAL/PHOS 検出器によるジェット及び光子 LEVEL-1 トリガーの開発
- 35) 齋藤 裕亮〔小野田 雅重〕  
リチウムイオン二次電池正極 $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ の元素置換効果
- 36) 安田 直人〔池沢 道男〕  
GaAs中の単一窒素発光中心の共鳴励起
- 37) 赤羽 隆弘〔守友 浩〕  
P2型 $\text{Na}_x\text{MO}_2$ の構造物性
- 38) 片倉 康輔〔守友 浩〕  
誘電体包埋型金属薄膜導波路における長距離伝搬型表面プラズモン
- 39) 加藤 佳祐〔守友 浩〕  
フェムト秒時間分解非同径ポンプ-プローブ法の開発と局所励起表面プラズモン波束の可視化
- 40) 後藤 謙典〔守友 浩〕  
配位高分子におけるイオンインターカレーションの研究
- 41) 高橋 洋輔〔守友 浩〕  
低分子ヘテロ接合型有機薄膜太陽電池の電荷ダイナミクス
- 42) 濱口 純〔守友 浩〕  
プルシアンブルー類似体における $\text{Cs}^+$ インターカレーションの研究
- 43) 大嶋 勇輝〔野村 晋太郎〕  
ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果
- 44) 塚本 知九馬〔野村 晋太郎〕  
顕微円偏光励起による遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の発光スペクトルの研究
- 45) 渡邊 寛之〔野村 晋太郎〕  
裏面ゲート付き薄膜 $\text{MoS}_2$ の光伝導特性の研究

- 46) 片倉 健太〔大塚 洋一〕  
グラフェン電界効果トランジスタにおける電極接続の影響の軽減
- 47) 加藤 俊介〔今井 剛〕  
GAMMA10磁場配位におけるフルート揺動に関するMHDシミュレーション
- 48) 窪田 遼人〔今井 剛〕  
低密度プラズマ内で発生するフルート不安定性に関する粒子シミュレーション
- 49) 野原 涼〔坂本 瑞樹〕  
GAMMA 10/PDX西エンド部におけるHeI線強度比計測及びH $\alpha$ 線空間分布計測によるプラズマ診断
- 50) 吉川 基輝〔坂本 瑞樹〕  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験における静電プローブを用いたイオン温度の評価
- 51) 岩元 美樹〔中嶋 洋輔〕  
GAMMA10/PDXエンド部におけるカロリメーターを用いた熱流計測
- 52) 細田 甚成〔中嶋 洋輔〕  
GAMMA 10/PDXエンド部における不純物ガス入射実験による非接触プラズマの生成と分光計測
- 53) 加藤 敬輝〔假家 強〕  
ECH用2周波数ジャイロトロンの開発及び、GAMMA 10/PDXにおけるECH印加時の端損失電子流束計測
- 54) 森下 雅央〔吉川 正志〕  
GAMMA 10/PDXにおける多チャンネルH $\alpha$ 線計測器を用いたトモグラフィー計測

# 物理学セミナー

平成26年度

	開催日	講師	題目
第1回	10月1日	中井 直正 (宇宙観測)	宇宙メーザー
第2回	10月8日	池沢 道男 (物性実験)	単一光子源
第3回	10月15日	毛利 健司 (素粒子理論)	2D Open-Closed Topological Field Theory
第4回	10月22日	吉川 耕司 (宇宙物理)	宇宙の大規模構造
第5回	10月29日	岡田 晋 (物性理論)	ナノ物質の構造と物性
第6回	11月12日	仲野 友英 (プラズマ) (連携大学院)	核融合の今と未来, それを支える現場の研究
第7回	11月19日	受川 史彦 (素粒子実験)	ヒッグス粒子研究の今後
第8回	11月26日	中務 孝 (原子核理論)	エキゾチック変形核の物理
第9回	12月3日	笹 公和 (原子核実験)	宇宙線生成核種の加速器質量分析法による検出

## 大学院関係経費

1. TA経費 数理物質科学研究科 物理学専攻分 6,268,827 円
2. TA経費 数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻、  
ナノサイエンス・ナノテクノロジー（物理学分野）分  
198,450 円

平成26年度科学研究費助成事業交付決定一覧  
(科学研究費補助金・学術研究助成基金助成金)

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額 (千円)	
新学術領域研究	公補助金	教授	岡田 晋	26107509	計算科学に基づく新奇原子層物質複合系の物性解明と物質設計	2,600
"	計補助金	教授	金 信弘	25105007	宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発	11,500
"	公補助金	教授	重田 育照	25104716	Siナノドットの非線形光学特性変化に対する動力学的解析	1,500
"	公補助金	教授	重田 育照	26102525	キユミュラント粗視化動力学によるタンパク質動的秩序形成過程の理論研究	2,600
"	計補助金	教授	重田 育照	26107004	理論と実験の協奏的アプローチによる複合スピン励起子変換制御	15,000
"	公補助金	教授	矢花 一浩	25104702	光と電子のダイナミクスを記述する第一原理マルチスケールシミュレーション法の開発	1,500
"	公補助金	准教授	江角 晋一	25105504	高温高密度クォーク物質のQCD臨界点探索	1,400
"	公補助金	准教授	神田 晶申	26107508	単層/多層グラフェンにおける超伝導近接効果	2,700
"	公補助金	准教授	根村 英克	25105505	格子QCDによるハイペロン相互作用の研究とハイパー核への展開	900
"	公補助金	准教授	野村晋太郎	25103704	量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究	2,300
基盤基盤(A)	一般補助金	教授	今井 剛	26249141	原型炉ECHに向けたマルチMWジャイロトロン発振の研究	7,300
"	"補助金	教授	岡田 晋	25246010	ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明	7,900
"	"補助金	教授	中井 直正	26247019	大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測	16,900
"	"補助金	教授	初貝 安弘	26247064	トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性：固体物理から冷却原子まで	12,000
"	"補助金	准教授	笹 公和	24246156	加速器質量分析法を用いた人為起源の長寿命放射性核種分析による環境影響評価	7,400
基盤研究(B)	一般補助金	副学長	三明 康郎	25287048	粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索	1,400
"	"助成金					900
"	"補助金	教授	坂本 瑞樹	26289352	照射損傷タングステンの水素吸蔵とその低減法の開発	800
"	"助成金					1,400
"	"補助金	教授	中嶋 洋輔	24360378	タンデムミラー端部及び高出力中性粒子ビームを用いたダイバータ・ELM模擬研究	2,600
"	"助成金					1,400
"	"補助金	教授	中務 孝	25287065	原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明	4,000
"	"助成金					1,500
"	"補助金	教授	矢花 一浩	23340113	固体中のフェムト・アト秒電子ダイナミクスに対する第一原理計算	2,500
"	"補助金	准教授	神田 晶申	25286021	歪み誘起ゲージ場を用いたグラフェンのエネルギーギャップの生成と制御	2,400
"	"助成金					0
"	"補助金	講師	中條 達也	25287047	LHC-ALICE実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発	4,200
"	"助成金					1,000
基盤研究(C)	一般助成金	名誉教授	舛本 泰章	26400309	時間分解スピン回転をプローブとした高速電子移動の研究	1,300
"	"助成金	教授	石橋 延幸	25400242	弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの研究	800
"	"助成金	教授	受川 史彦	25400295	ハドロン衝突における重いクォーク生成の物理	1,300
"	"助成金	教授	大塚 洋一	24540314	ナノコンタクトを利用した微小領域のエネルギーフローと単分子磁石の研究	1,000

平成26年度科学研究費助成事業交付決定一覧  
(科学研究費補助金・学術研究助成基金助成金)

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額 (千円)	
基盤研究(C) 一般	助成金	准教授	石井 理修	25400244	格子QCDによる核力・ハイペロン力(反)対称LS力と負パリティ相互作用の研究	700
" "	助成金	准教授	小野田雅重	24550207	バナジウムポリアニオン系二次電池正極材料の開発	900
" "	助成金	准教授 (連携大学院)	河合 孝純	26390060	リチウムのグラファイトインターカレーションにおける固液界面反応の物理	2,000
" "	助成金	准教授	谷口 伸彦	26400382	物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象	600
" "	助成金	准教授	寺崎 順	26400265	QRPAを用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算	1,300
" "	助成金	准教授	原 和彦	25400294	アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定	800
" "	助成金	准教授	森 正夫	25400222	輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築	800
" "	補助金	講師	谷口 裕介	22540265	格子上の非摂動論的な繰り込みの実践	500
" "	助成金	助教	佐藤 勇二	24540248	重力/ゲージ理論双対性の可積分構造に基づいたグルーオン散乱振幅の研究	700
" "	助成金	助教	庄司 光男	26410002	トレオニン合成酵素の全反応機構の理論的解明	2,700
" "	助成金	研究員	小鍋 哲	26390007	ナノ物質の新奇な光電・熱電効果の理論的研究	1,900
挑戦的萌芽研究	助成金	教授	小沢 顕	26610056	不安定核電気双極子モーメント測定への挑戦	2,200
" "	助成金	教授	西堀 英治	25600148	ナノビーム回折による精密原子配列決定法の開発	200
" "	助成金	教授	初貝 安弘	25610101	マヨナラ表示による幾何学的位相とトポロジカル秩序変数	1,100
" "	助成金	教授	守友 浩	25620036	プルシャンブルー類似体へのナトリウムイオンインターカレーション	1,100
" "	助成金	准教授	笹 公和	26600138	炭素14マッピング直接測定を目指したレーザーアップレーション加速器質量分析法の開発	1,600
" "	助成金	准教授	野村晋太郎	26610079	ベクトル整形パルス励起による端電流制御	1,700
若手研究(A)	補助金	講師	久保 敦	26706018	通信帯フェムト秒表面プラズモン波束の顕微映像化と非線形増幅	6,200
	助成金					4,100
" "	補助金	助教	小林 航	23684022	リチウムイオンポリマー電池素子を用いた遷移金属酸化物の物性制御	2,100
若手研究(B)	助成金	准教授	山崎 剛	25800138	量子色力学を基にしたクォーク多体系としての原始核の研究	600
" "	助成金	助教	久保 敏弘	26870080	メソスコピック系における測定の反作用とトポロジカルな準粒子	1,000
" "	助成金	助教	森口 哲朗	25871237	脳虚血性病態理解のための非侵襲的小動物O-15ガスPET検査システムの構築	500
合 計					157,300	

※ 金額は当初の交付決定額で直接経費のみ  
 ※ 網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

平成26年度 受託研究

NO	職名	氏名	委託者名	研究題目	金額 (円)
1	教授	石橋 延幸	(独)日本学術振興会	素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理分野にかかる学術研究動向に関する調査研究	1,690,000
2	教授	岡田 晋	(独)科学技術振興機構	グラファイト複合構造体の基礎物性解明とデバイス設計指針の開発	14,820,000
3	教授	久野 成夫	大学共同利用機関法人自然科学研究機構	野辺山45m鏡および筑波大30cm鏡による銀河面サーベイ観測の推進	4,550,000
4	教授	都倉 康弘	総務省	集積化可能な電気制御スピン量子ビットで構成される量子インターフェースの研究開発	273,000
5	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	大学間連携VLBI観測事業に係る研究「先端的天文学研究の推進—高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明—」	5,507,000
6	教授	中務 孝	(独)科学技術振興機構	核構造計算による核反応モデルの高精度化	3,000,000
7	教授	守友 浩	(独)科学技術振興機構	水溶液中アニオンの高速・高密度貯蔵技術の開発	520,000
8	講師	久保 敦	(独)科学技術振興機構	カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス	15,210,000
合 計					45,570,000

平成26年度 受託事業

NO	職名	氏名	委託者名	研究題目	金額 (円)
1	教授	中井 直正	(独)日本学術振興会	自作の望遠鏡で宇宙を見よう：「ひらめき☆ときめき サイエンス〜ようこそ大学の研究室へ〜KAKENHI」(研究成果の社会還元・普及事業)	403,000
2	講師	中條 達也	(独)日本学術振興会	平成26年度二国間交流事業：フランスとの共同研究(CNRS)「電磁カロリメータ検出器によるクォーク・グルーオンプラズマ超高温相の物性研究」	2,490,000
3	助教	佐藤 勇二	(独)日本学術振興会	平成26年度二国間交流事業：ハンガリーとの共同研究(HAS)「ゲージ理論/重力理論双対性における可積分性と強結合ゲージ理論ダイナミクス」	2,470,000
4	助教	庄司 光男	東洋紡株式会社	サルコシンオキシターゼの基質特異性と触媒反応機構の理論解明に関する学術指導	300,000
合 計					5,663,000

平成26年度 共同研究

NO	職名	氏名	共同研究相手方名	研究題目	金額 (円)
1	教授	守友 浩	TOTO株式会社	ブルジャンブルー類似体膜によるイオン吸脱着素子の開発	2,200,000
2	准教授	神田 晶申	(独)科学技術振興機構	ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝	10,501,000
合 計					12,701,000

平成26年度 奨学寄附金

NO	職名	氏名	寄付者等名	寄付の目的	金額 (円)
1	教授	西堀 英治	(独)理化学研究所	研究助成のため	603,539
2	教授	守友 浩	守友浩:(原寄附者)公益財団法人三菱財団	「ネットワークポリマー正極材料におけるリチウムイオン動力学的研究」に対する研究助成	2,500,000
3	教授	守友 浩	守友浩:(原寄附者)公益財団法人新技術開発財団	「放射性Csイオンの高速除去技術と濃縮技術の開発」に対する研究助成	2,880,000
4	教授	守友 浩	公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団	「配位高分子を用いたナトリウムイオン電池材料の開発」に関する研究	2,000,000
5	准教授	池沢 道男	公益財団法人光科学技術研究振興財団	「半導体中の等電子不純物の共鳴励起による超コヒーレントな光子の発生」に対する研究助成	400,000
6	助教	小林 航	公益財団法人東燃ゼネラル石油奨励・奨学財団	「イオンモデルに基づいた高性能ナトリウムイオン電池正極材料の開発」に対する研究助成	1,000,000
合 計					9,383,539

平成26年度 その他

NO	職名	氏名	機関等名	事業名称等	金額 (円)
1	教授	守友 浩	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	筑波大-KEK連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて	3,000,000
合 計					3,000,000

平成26年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	講師	久保 敦	2014年応用物理学会秋季学術講演会Poster Award	フェムト秒レーザーにより局所的に励起された表面プラズモンの観察	9月
2	研究員	柴田恭幸	第36回応用物理学会論文奨励賞	Sodium Ion Diffusion in Layered Na <sub>x</sub> CoO <sub>2</sub>	9月
3	教授	大塚洋一	MNC 2013 Award (Most Impressive Poster)	Effect of Electron Beam Irradiation on Raman Spectra and Transport Properties in Graphene	11月
4	准教授	神田晶申	MNC 2013 Award (Most Impressive Poster)	Effect of Electron Beam Irradiation on Raman Spectra and Transport Properties in Graphene	11月
5	研究員	友利ひかり	MNC 2013 Award (Most Impressive Poster)	Effect of Electron Beam Irradiation on Raman Spectra and Transport Properties in Graphene	11月
6	講師	久保 敦	筑波大学・若手教員奨励賞		12月
7	教授	初貝安弘	第20回(2015年)日本物理学会論文賞	Chern Numbers in Discretized Brillouin Zone: Efficient Method of Computing (Spin) Hall Conductances	3月

## 役割分担（平成26年度）

### 【物理学域】

物理学域長	矢花
グループ長	藏増、梅村、中務、初貝、重田、 受川、中井、小沢、守友、今井
理論グループ懇談会議長	石橋
実験系教授懇談会世話人	今井
カリキュラム委員長	小沢
カリキュラム委員	小沢、梅村、今井、中井、受川、 野村、石橋、矢花、都倉、中嶋
物理学域広報委員会	岡田
物理学域教育研究倫理委員会	矢花、今井、都倉、藏増、梅村、 中務、初貝、受川、中井、小沢、 守友
物理学域図書係	中務
学生支援対応チーム	矢花、今井、都倉、小沢
学域計算機委員会	新井、石塚、橋本、中條
物理学域スペース調査検討委員会	藏増、梅村、中務、初貝、受川、 中井、小沢、守友、今井
校正線源管理責任者	矢花
校正線源保管責任者	小沢
自然系学系液体窒素タンク管理委員	小野田
科学の芽賞	原、久保
朝永記念室	金谷、受川
実験廃棄物取扱責任者	東山
工作室管理担当	神田
高圧ガスボンベ管理者	中嶋、小沢、神田

### 【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	金谷
研究科長	木越(化学)
物理学専攻長	矢花
物理学専攻学務委員	今井
ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻長	山部(物工)
系長室会議構成員	金谷、矢花
系人事委員会総会委員	金谷、矢花、都倉、今井、 (梅村)
系運営委員会委員	金谷、矢花、都倉(、今井)
研究科運営委員会委員	金谷、矢花、今井(、都倉)
研究科学務委員会	今井
研究科就職委員会	今井
系広報委員会委員	矢花、今井
系図書委員会委員	中務
系施設・安全管理委員会委員	矢花
系情報環境委員会	矢花、新井
系総合研究棟B棟管理委員会委員	岡田
系総合研究棟B棟ドラフト管理委員会	野村
系研究倫理委員会委員	今井
研究科学生相談室員	森
専攻eラーニング担当教員	今井

### 【物理学類】

物理学類長	都倉
物理学類学務委員	小沢
物理学実験責任者	中嶋
学類クラス担任（1年）	坂本、谷口(裕)
（2年）	藏増、久保(敦)
（3年）	瀬田、東山
（4年）	石橋、中嶋

### 【理工学群】

入学試験実施委員会	原、吉江
全学学群教育課程委員会	小沢
全学学群教職課程委員会	小野田
学生担当教員	江角
スポーツフェスティバル運営委員会	南
理工学群FD委員(FD窓口教員)	小沢
理工学群総合政策室委員	初貝
理工学群広報委員会	岡田
アドミッションセンター専門委員	岡田
教職実践演習担当教員	新井
ハラスメント相談員	野村
教育実習校訪問指導教員	(4年担任)
キャリア支援室員	池沢
キャリア支援担当教員	中嶋
自然系学類計算機委員会	橋本

### 【センター】

計算科学研究センター長	梅村
数理物質融合科学センター長	金谷
研究基盤総合センター運営委員会	大塚
研究基盤総合センター低温部門運営委員会	神田
研究基盤総合センター工作部門運営委員会	池沢
研究基盤総合センター分析部門運営委員会	守友
アイトープ環境動態研究センター運営委員会	小沢
プラズマ研究センター運営委員会	藏増、中井
プラズマ研究センター運営協議会	藏増、中井
計算科学研究センター運営委・運営協議会	都倉
計算科学研究センター人事委員会	金谷、都倉
学際物質科学研究センター運営委員会	矢花
学生生活支援室員	東山

### 【全学委員会委員等】

筑波大学学長補佐室	大塚
教育社会連携推進室	受川
ハラスメント防止対策委員会	大塚
キャリア支援室担当教員会議構成員	今井
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	小沢
つくばグローバルサイエンスウィーク実地委員	金
産学連携推進プロジェクト審査委員会委員	守友

## 物理学域人事異動

(平26.4.1～平27.3.31)

### 【物理学域に来られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
久野 成夫	教授	H26.4.1	国立天文台
中務 孝	教授	H26.4.1	理化学研究所
西堀 英治	教授	H26.5.1	理化学研究所
山崎 剛	准教授	H26.4.1	名古屋大学
大川 英希	助教	H26.8.1	ブルックヘブン国立研究所
森口 哲朗	助教	H26.10.1	国立循環器病研究センター
小野 倫也	准教授	H26.10.1	大阪大学
伊敷 吾郎	助教	H26.11.1	京都大学
Oliver Busch	助教	H26.12.16	ハイデルベルグ大学
大野 浩史	助教	H26.4.1	ブルックヘブン国立研究所
日野原 伸生	助教	H26.6.1	ノースキャロライナ大学
Alexander Wagner	助教	H26.6.1	筑波大学

### 【物理学域を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
石井 理修	准教授	H26.4.30	大阪大学
長江 大輔	助教	H26.12.31	理化学研究所
有光 敏彦	教授	H27.3.31	退職
瀬田 益道	講師	H27.3.31	関西学院大学
永井 誠	助教	H27.3.31	筑波大学研究員
久保 敏弘	助教	H27.3.31	筑波大学研究員
益井 宙	助教	H27.3.31	Central China Normal University

	グループ		担当センター		グループ		担当センター		
理論	素粒子	教授	石橋延幸 金谷和至 藏増嘉伸 石塚成人 根村英克 山崎 剛 吉江友照 谷口裕介 伊敷吾郎 佐藤勇二 毛利健司 大野浩史	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ	宇宙観測	教授	中井直正 久野成夫 瀬田益道 永井 誠		
		准教授				原子核	教授		三明康郎 小沢 顕 新井一郎 江角晋一 笹 公和 中條達也 長江大輔 益井 宙 森口哲朗
		講師			物性		教授	守友 浩 大塚洋一 西堀英治 小野田雅重 池沢道男 野村晋太郎 神田晶申 東山和幸 久保 敦 富本慎一 森下将史 小林 航	TIMS
		助教				准教授			
	宇宙物理	教授 准教授 講師 助教	梅村雅之 森 正夫 吉川耕司 Alexander Wagner	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ	実験	プラズマ	教授	今井 剛 坂本瑞樹 中嶋洋輔 假家 強 吉川正志 小波蔵純子 沼倉友晴 平田真史 南龍太郎 池添竜也	プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター
	原子核	教授 准教授 講師 助教	矢花一浩 中務 孝 寺崎 順 橋本幸男 日野原伸生	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ			講師		
物性	教授 准教授 助教	有光敏彦 岡田 晋 都倉康弘 初貝安弘 小野倫也 谷口伸彦 苅宿俊風 久保敏弘 吉田 恭	TIMS 計算科学セ	助教					
生命物理	教授 助教	重田育照 庄司光男	計算科学セ 計算科学セ						
素粒子	教授 准教授 講師 助教	受川史彦 金 信弘 原 和彦 佐藤構二 武内勇司 大川英希							

研究員

舛本泰章	物性実験
小鍋 哲	物性理論
柴田恭幸	物性実験
金子紘之	宇宙観測
武政健一	素粒子実験
SALAK Dragan	宇宙観測
友利 ひかり	物性実験
富田陽子	物性理論
池田義雅	原子核実験
温 凱	原子核理論

連係大学院

宇治進也	NIMS
迫田和彰	NIMS
胡 曉	NIMS

連携大学院

位地正年	NEC	物理, ナノ
河合孝純	NEC	物理, ナノ
山下 眞	NTT	物理, ナノ
後藤秀樹	NTT	物理, ナノ
和田道治	理研	物理
坂本慶司	原研	物理
仲野友英	NEC	物理, ナノ
丸山敏毅	原研	物理
井手俊介	原研	物理
宮本良之	産総研	物理
山本 剛	NEC	物理, ナノ
横尾 篤	NTT	物理, ナノ

技術職員

大川和夫	
加藤純雄	
平田久子	シニアスタッフ

客員教員

新井康夫	KEK
大見和史	KEK
高崎史彦	KEK
幅 淳二	KEK
宮武宇也	KEK
田中真伸	KEK
尾坂 格	理化学研究所
青木慎也	京都大学
宮崎州正	名古屋大学
白石賢二	名古屋大学

事務職員

飯村美智子	教務
米山啓子	総務
中井佳代子	会計・研究支援
石井浩子	会計

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2014（平成26）年度

発行 2015年9月

発行者 筑波大学数理物質系物理学域

〒305-8571 茨城県つくば市天王台1-1-1

TEL 029-853-4033

FAX 029-853-6618

ISSN 2189-7557