

ISSN 2187-4824

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2013 (平成25) 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	24
III	宇宙物理理論グループ	56
IV	宇宙観測グループ	78
V	原子核理論グループ	89
VI	原子核実験グループ	102
VII	物性理論グループ	
VII-1	非平衡統計物理グループ	139
VII-2	量子物性理論グループ	143
VII-3	ナノ量子物性グループ	151
VII-4	ナノ構造物性グループ	155
VII-5	量子輸送研究グループ	163
VIII	生命物理グループ	170
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	178
IX-2	半導体物性グループ	184
IX-3	強相関物性グループ	194
IX-4	表面物性グループ	203
IX-5	低温物性グループ	215
X	プラズマ研究グループ	223

— 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	251
	【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	256
物理学域資料	266

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、吉江 友照、石井 理修、根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、毛利 健司

研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介

大学院生 (7名)

【人事異動】

金谷和至教授が数理物質系長に就任した(2013年4月1日)。

藏増嘉伸准教授が教授に昇任した(2013年4月1日)。

宇川彰教授が理化学研究所計算科学研究機構(AICS)副機構長として転出した(2014年3月31日)。

山崎剛博士が数理物質系准教授として着任する(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ユアトラック助教として着任する(2014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、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の研究を推進しているWHOT-QCD Collaborationや、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同してカイラルフェルミオンを用いた研究を推進しているJLQCD Collaborationなどで、活発な研究を行った。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)が統括責任者を努める分野 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 年度は、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努める「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。

超弦理論の分野では弦の場の理論、超弦理論とゲージ理論との対応という 2 つの関連するテーマを中心として研究が行われた。最近この分野においては、D-ブレーンと呼ばれるソリトン解の研究を通じて、弦理論の非摂動的定式化としての弦の場の理論や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされる等の大きな発展があった。この状況の下で、弦の場の理論の次元正則化とループ振幅、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等についての研究を行った。

【1】格子場の理論

(宇川 彰、金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、吉江 友照、石井 理修、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、そのうちの一つである「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」の責任者を藏増が務めている。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、電磁相互作用や up と down クォークの質量差を取り入れた大規模シミュレーションの実現を意味する。これにより、QCD の基本パラメータであるクォーク質量を高精度で決定することが可能になる。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、宇川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、ゲージ配位生成の本格計算を継続している。DDHMC(Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo)法によるゲージ配位生成においては、 96^4 の格子サイズ、0.1 fm の格子間隔を採用し、2+1 フレーバー ($m_u = m_d \neq m_s$) QCD のシミュレーションを実行している。平成 24

年度中に、人為的に設定した初期状態から出発して熱平衡状態に到達することができた。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268、GPU部ピーク演算性能713Tflops、CPU部ピーク演算性能89Tflops)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安定な(強い相互作用で崩壊しない)ハドロンの質量の計算結果を実験値と比較したものである。既に0.1%オーダーの統計誤差に到達していることがわかる。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、 π 中間子質量 (m_π)、 K 中間子質量 (m_K)、 Ω バリオン質量 (m_Ω) を採用している。 m_π と m_K に対しては更に数%程度の実験値へのチューニングが必要であることが見てとれるが、その補正は今後 reweighting 法と呼ばれる計算手法を用いて行う予定である。

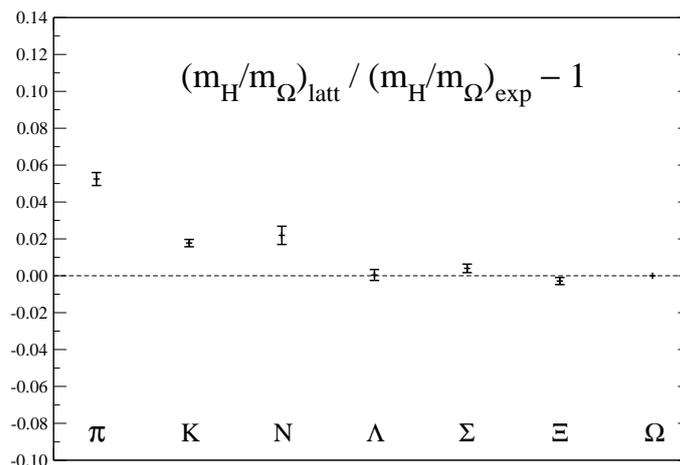


図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られた安定ハドロン質量 (バリオン質量との比) と実験値との比較。

ハドロン質量の計算が0.1%オーダーの統計誤差に到達したことは、本研究開発課題の目標である原子核の直接構成に基づく束縛エネルギーの測定および2体・3体バリオン間ポテンシャルの計算にとって本質的に重要である。というのも、重いクォーク質量を用いた先行研究により、軽原子核の束縛エネルギーを20%ないしはそれ以下の統計誤差で計算するためには、核子質量が0.1%オーダーの統計誤差で得られている必要があることがわかっている。

格子 QCD 共通コード開発

格子 QCD 共通コード Bridge++ の開発を進めた (論文 1)。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コードである。様々な格子作用やアルゴリズムを取り扱うことが可能であり、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。最先端の研究に必要なパフォーマンスを実現でき、なおかつ使い易いものを目指している。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/>)。

本年度は、コード全体に大きく手が入れた。種々の物理量測定が追加され、またファクトリー化等のコード構造化がより一層推し進められた。2013年7月に Bridge++ ver.1.1.0 としてメジャーアップデートが行われた。その後も、コードの修正、改良が進められている。最新版は、ver.1.1.3 である。

(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、宇川は名古屋大学山崎特任助教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 0.5GeV 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 0.14GeV に相当) よりもかなり重い。現在、物理点へ向けてクォーク質量依存性を調べるために、 中間子質量 0.3GeV 相当のクォーク質量での計算を遂行中である (論文 2)。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 0.5GeV での結果と 0.3GeV 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。今後、中間子質量 0.3GeV の結果の誤差を小さくするとともに、平成 26 年度は「京」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む。

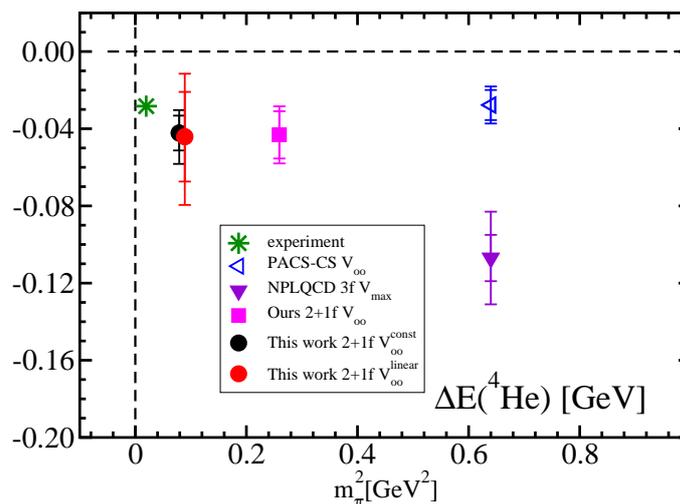


図 2: ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーの 中間子質量依存性。白抜きはクエンチ近似の結果を表す。

(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 (ϵ'/ϵ) 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 π 中間子に崩壊する過程での崩壊振幅の計算が必要である。崩壊過程には、終状態のアイソスピンが $I = 0$ と $I = 2$ の二つの場合があり、それぞれの崩壊振幅を A_0 と A_2 と呼ぶ。

石塚、宇川、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 (論文 3)。計算は、 π 中間子質量 $m_\pi = 280 \text{ MeV}$ のもとで行った。 A_0 の計算では、非連結ダイアグラムからの寄与を求める必要がある。このダイアグラムの存在により、崩壊振幅の統計誤差が非常に大きくなることが知られていた。この計算では、ホッピング定数展開法と不完全収束法を用いて、統計揺らぎを小さくすることに成功した。

得られた結果と実験値は以下である。

	結果	実験値
$\text{Re}A_2 (\times 10^{-8} \text{ GeV})$	2.426 ± 0.038	1.479 ± 0.004
$\text{Re}A_0 (\times 10^{-8} \text{ GeV})$	60 ± 36	33.2 ± 0.2
$\text{Re}A_0/\text{Re}A_2$	25 ± 15	22.45 ± 0.06
$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) (\times 10^{-3})$	0.79 ± 2.54	1.65 ± 0.26

$\text{Re}A_2$ が実験値と大きくずれているが、これは計算が実際の quark 質量より重い所で行われた為であると考えられる。質量依存性は、有効理論から $\text{Re}A_2 \propto (m_K^2 - m_\pi^2)$ の形をしていると予想されており、これを実際に数値計算で確かめることが、今後の課題として残された。 $\text{Re}A_0$ の統計誤差はいまだに大きい、 A_0 の値が A_2 より非常に大きくなるという $\Delta I = 1/2$ 則の兆候が見えている。CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) 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 π 中間子の演算子の改良を検討中である。

(4) チャームバリオンの研究

物理点直上の格子 QCD シミュレーションを行い、チャームクォークを含むバリオンの検証及び予言を与えた (論文 5)。本計算により、チャームクォーク 1 つを含むバリオン質量スペクトルは実験値を再現する事が分かった。他方、チャームクォークを 2 つ含むバリオン Ξ_{cc} の質量値は、報告されている実験値と有意に異なった。 Ξ_{cc} の実験値は 1 つの実験グループからしか報告されておらず、他の実験グループによる検証では既存の実験値付近にシグナルは発見されていない。本計算も、他の実験同様、既存の実験報告値に疑義を呈しており、今後の検証が待たれる。また、チャームクォークを 2 個ないし 3 個含む Ξ_{cc} 以外の未発見バリオンに対する質量予言も行った。

(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、京都大学基礎物理学研究所青木教授らとの共同研究で、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。

有限温度・有限密度 2 フレーバー QCD におけるカイラル相転移

QCD の有限温度・有限密度相構造を研究する上で、軽い u, d クォークのみを持つ 2 フレーバー QCD のカイラル極限近傍の相転移は重要な役割を担ってきた。通常考えられてきたシナリオでは、ゼロ温度で量子効果で陽に壊れている軸性 $U(1)$ 対称性が有限温度相転移近傍でも十分強く壊れ、その結果、2 フレーバー QCD の有限温度相転移は 3 次元 $O(4)$ スピン系と同じユニバーサリティー・クラスに属する 2 次相転移になる。実際、筑波大のグループを中心とした (改良) Wilson クォークを用いた一連の研究により、 $O(4)$ のスケーリング関数と臨界指数で 2 フレーバー QCD のカイラル凝集のクォーク質量と温度依存性がよく説明されることが示されている。またスタガード・クォークを用いた BNL-Bielefeld グループの研究でも、QCD が $O(4)$ スケーリングに従うことが報告されている。他方、青木・深谷・谷口の最近の研究により、軸性 $U(1)$ 対称性が高温相で有効的に回復するだろうことが議論された。これは、2 フレーバー QCD の有限温度相転移が 1 次転移である可能性を示唆する。しかし、その場合のカイラル・スケーリングは $O(4)$ とは大きくずれるはずであり、上記の結果と矛盾する。

この研究では、2 フレーバー QCD のカイラル・スケーリングを再度検証し、またそれを有限密度に拡張した (図 3、論文 6)。 $16^3 \times 4$ 格子と $16^3 \times 24$ 格子で $m_{PS}/m_V \approx 0.65$ と 0.80 に相当する数点でシミュレーションし、有限密度効果は、我々の以前の研究と同様に、reweighting 係数の評価に Taylor 展開を利用した reweighting 法を使って計算した。詳細は、論文 6 とその引用文献を参照。

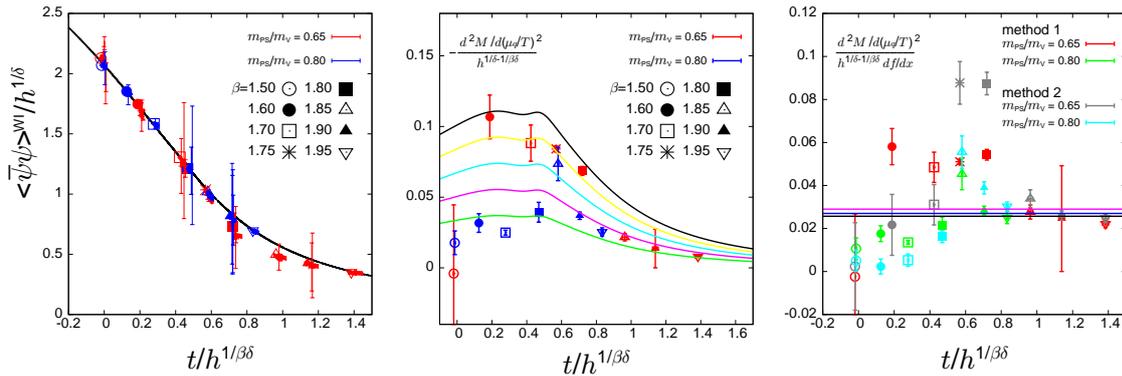


図 3: 2 フレーバー QCD の有限温度・有限密度カイラル相転移近傍のスケーリング (論文 6): (左図) カイラル凝集の $O(4)$ スケーリング。 $\mu_q/T < 1$ の全データが示されている。誤差の大きなデータは $\mu_q/T \sim 1$ のもの。曲線は $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数。(中央) カイラル凝集の μ_q/T に関する 2 次微分係数。method 1 の結果。 $\mu_q/T < 1$ (右図) 係数 c 。

化学ポテンシャル μ_q によるカイラルの破れの効果は、最低次で温度による破れの効果と同じであり、 μ_q/T が小さい領域におけるスケーリング解析では、有効温度変数を

$$t = \beta - \beta_c + \frac{c}{2} \left(\frac{\mu_q}{T} \right)^2$$

のように補正することで吸収できると期待される。(β は格子上のゲージ結合定数で、スケール変換を通じて温度を動かす役割を果たす。) 有限密度でのスケーリングの検証は、上記の問題を考察する上で非自明な情報を提供すると期待される。さらに、この補正に現れる係数 c は、有限温度相転移が有限密度で化学ポテンシャルとともにどの様に移動するかを決めるものであり、高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルオン・プラズマの現象論的研究に重要である。

図3左図に、 $\mu_q/T < 1$ におけるカイラル凝集の結果を示す。曲線は $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数。様々な温度や化学ポテンシャル、クォーク質量の結果を $O(4)$ 臨界指数を使って再編すると、 $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数をよく再現することがわかる。

図3中央に、カイラル凝集の μ_q/T に関する2次微分係数を示す。 $\mu_q/T < 1$ のデータを $(\mu_q/T)^2$ の1次関数でフィットして評価した (method 1)。曲線は、様々な c の場合の $O(4)$ スケーリング関数の μ_q/T に関する2次微分係数。微分係数を直接評価する方法 (method 2) でも同様の結果を得た。相転移点近傍では統計誤差や系統誤差がまだ大きい、高温両域 (主に図の右側のデータ) では $c \approx 0.0290$ に調整 (マゼンタの曲線) すればひとつのユニバーサルな曲線に乗る傾向が見られる。図3右図は、それを c へのフィットとして表したもので、マゼンタの線が $c = 0.0290$ で、青い線が、全データの平均 $c = 0.0273(42)$ である。これから、プレリミナリな結果として $-(1/T_c)[d^2T_c/d(\mu_q/T)^2] \approx 0.05-0.06$ を得た。

まだ領域によって統計誤差も系統誤差も小さくないが、有意な領域の誤差の範囲で、有限密度でも QCD のデータが $O(4)$ スケーリングと矛盾しないことがわかった。ユニバーサリティー・クラスに関する明確な結論を引き出すためには、この研究を進展させ、格子体積や格子間隔をシステムティックに変化させてスケーリングの性質を確定する必要がある。

ヒストグラム法による重クォーク QCD の有限温度・有限密度相転移

有限温度・有限密度 QCD の相図を判定するうえで、観測量のヒストグラムやその対数として定義される有効ポテンシャルは、最も直感的な情報を提供するが、変数の広い領域で有効ポテンシャルを精度よく評価する必要があり、統計的に大きな課題を含んでいる。他方、系のパラメータ依存性を調べる上で強力な手法である reweighting 法では、系の作用に現れる物理量に関するヒストグラムを必ず計算する。我々は、これらの物理量のヒストグラムと reweighting 法を組み合わせることにより、様々なパラメータにおけるヒストグラムをつなぎあわせ、変数の広い領域で有効ポテンシャルを精度よく評価することにより、相転移次数を容易に判定する解析方法 (「ヒストグラム法」) を開発した。その最初の検証として、方法のテストを兼ねて、クォークが重い領域の QCD の相構造を研究した。2011 年に行った密度ゼロでの研究を進展させて、多数点のシミュレーション結果を結合させる multipoint reweighting 法を用い、さらに有限密度に拡張して、QCD の相構造を導いた (論文 7)。

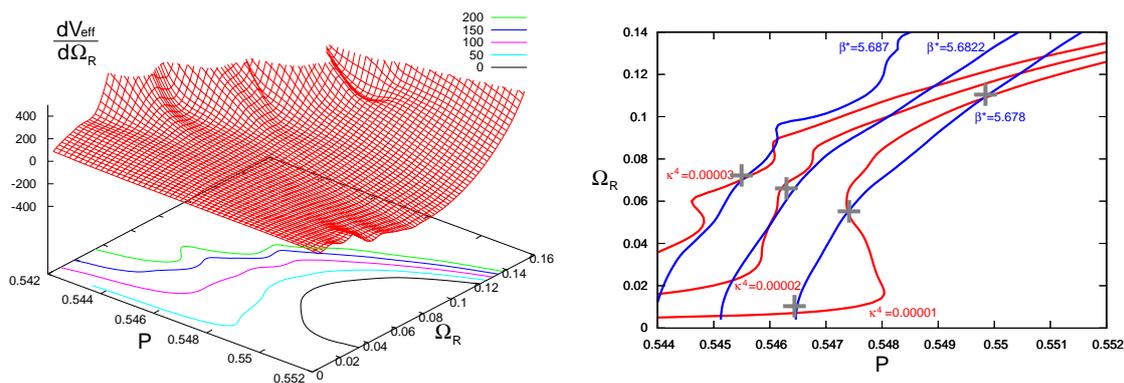


図 4: ヒストグラム法によるクォークが重い領域の QCD における有限温度相構造の研究 (論文 7)。(左) プラケット (ゲージ場のエネルギー) とポリアコフープ (重いクォークのエネルギー) に関する有効ポテンシャルのポリアコフープに関する微分と、ポリアコフープ方向の傾き一定の線。(右) 前述の有効ポテンシャルにおけるプラケット方向とポリアコフープ方向の傾き一定の線。詳細は本文参照。

クォークが重い領域では、クォークが重い極限から reweighting することにより、SU(3) 純ゲージ理論のシミュレーションとホッピングパラメータ展開が適用出来る。この研究では、プラケット (ゲージ場のエネルギーの自由度に対応する) に関する有効ポテンシャル、ポリアコフープ (重いクォークのエネルギーの自由度に対応する) に関する有効ポテンシャル、及び、両者の 2 重分布に関する有効ポテンシャルをシミュレーションと multipoint reweighting 法により評価した。クォークが重い極限の 1 次相転移は、クォークを軽くしたり密度を上げるなどするとクロスオーバーに変化すると期待されている。1 次相転移領域の端の 2 次の臨界点の位置を、有効ポテンシャルの振る舞いから特定した。(クォークが軽い現実的な QCD において、物理点のクロスオーバー転移が密度やクォーク質量を変化させた時に 1 次相転移に変化する臨界点の特定は現象論的に重要である。この研究はそのモデルケースとして行っている。)

図 4 に、プラケットとポリアコフープの 2 重分布に関する有効ポテンシャルの傾きに関する結果を示した。reweighting 法により、ゲージ結合パラメータやクォーク質量を動かすと、有効ポテンシャルの傾きにそれぞれある定数が増加することが示される。つまり、傾き一定の曲線は、別のパラメータ点における傾きゼロの曲線と読み替えることができる。2 つの方向の傾きが伴にゼロの点は安定な基底状態の相や準安定相、および、鞍点に相当する。傾きゼロの曲線が 3 点で交差するパラメータ点は 1 次相転移近傍であり、それが 1 点だけで交差するようになれば、そのパラメータ点はクロスオーバー領域に有る。それらの領域の端が臨界点である。

3 種類の有効ポテンシャルにより計算された臨界点の位置は相互にコンシステントで、それらの解析を組み合わせることで、臨界点を (ここで導入した重いクォークの近似の範囲で) 精度よく特定できた。なお、有限密度の効果と

しては、有限密度のクォーク位相を評価した結果、臨界点の位置に関しては極めて小さいことが示された。

この成果を受けて、クォークが軽い領域における QCD の有限密度相構造の解明に向けて研究を進めている。

(6) 有限密度 QCD

有限密度 QCD 研究のためには、非ゼロ化学ポテンシャル領域での格子 QCD 計算が必要となるが、化学ポテンシャルの導入は「符号問題」を引き起こしてしまうことが知られている。藏増、宇川は、金沢大学武田助教、理研計算科学研究機構 (AICS) 中村研究員および Jin 特別研究員との共同研究のもと、行列式の高速度計算手法を開発し、reweighting 法を用いて 4 フレーバー有限密度 QCD に対して有限サイズスケール解析を行った。4 フレーバー QCD では、ある有限のクォーク質量領域において一次相転移を起こすことが期待されているが、それを示せるか否かは我々の計算手法の良いベンチマークテストとなる。シミュレーションでは、 $O(a)$ 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を採用し、「時間方向」の格子サイズを 4 に固定し、空間格子サイズを $V = 6^3 \sim 10^3$ まで変化させた。Plaquette や Polyakov loop などの様々な物理量に対する感受率のピークの高さの V 依存性を調べ、その依存性が線形であることから、一次相転移であることの確証を得た。これは世界で初めての有限密度 QCD に対する有限サイズスケール解析の応用であり、その有効性を実証できた意義は大きい (論文 8)。次のステップとして、我々は 3 フレーバー有限密度 QCD における臨界終点 (Critical End Point) の同定計算を試みた。4 フレーバーの場合と同じクォーク作用とゲージ作用を採用し、「時間方向」の格子サイズを 6 に固定し、空間格子サイズを $L^3 = 8^3, 10^3, 12^3$ と変化させた。化学ポテンシャルを $\mu=0.1$ として、 (μ, T) (クォーク質量-温度) 平面上の相転移を系統的に調べ、有限サイズスケール解析手法の一つである尖度 (kurtosis) 交叉法によって臨界終点の位置を決定することに成功した。図 5 は、Plaquette の kurtosis の L 依存性であり、異なる L に対応する線の交点が臨界終点を表す (論文 9)。

(7) 有限温度における $U(1)_A$ 対称性

2 個のクォークを含む $N_f = 2$ QCD において、 $SU(2) \times SU(2)$ のカイラル対称性の他にアノマリーで破れていた $U(1)_A$ 対称性も有限温度で回復する可能性が高いことが先行研究から明らかになった。昨年度は $N_f = 2$ QCD の低エネルギー有効理論である中間子有効理論を用いた相転移次数の研究を青木、深谷両氏と共に行った。具体的には、有限温度における有効理論として $SU(2) \times SU(2)$ カイラル対称性と共 $U(1)_A$ 対称性を保持している理論を構成し、摂動展開と ϵ 展開を用いて求めた繰り込み群の流れから許される相転移の次数を調査した。中間子的な量で書かれた order parameter が熱力学的極限で全て消えるように構成された有効理論においては、繰り込み群方程式に安定な赤外固定点が存在せず、 $N_f = 2$ QCD の相転移の次数は一次であることが強く示唆される (論文 12)。

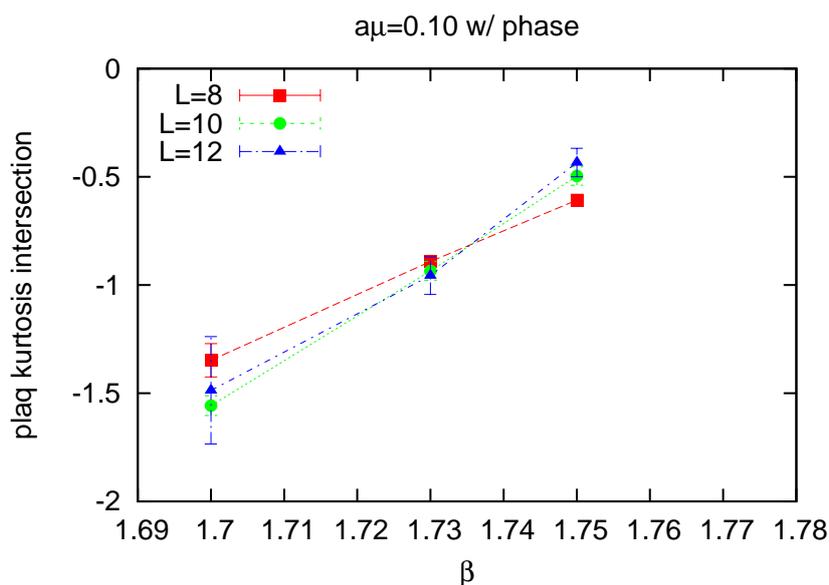


図 5: Plaquette に対する kurtosis の 依存性。異なる L に対応する線の交点が臨界終点を表す。

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

2つの核子間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に斥力芯と呼ばれる近距離での斥力、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。石井、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 13 では、3 体力を HAL QCD の方法を用いて計算する場合、その理論的基礎となる 3 体（以上）の NBS 波動関数の漸近形と S 行列の位相差との関係を明らかにしたものである。論文 14 では、HAL QCD の方法で求められたポテンシャルから計算した位相差と Lüscher の有限体積法で求められた位相差が良く一致する事を $I = 2$ の $\pi\pi$ 散乱の場合に示した。論文 15 は、HAL QCD の方法で得られたポテンシャルを用いて核物質の状態方程式や中性子星の最大質量などのクォーク質量依存性を計算したものである。論文 16 では、HAL QCD の方法をチャームクォークを含んだメソン間の相互作用に応用し、4 体クォーク状態の存在の可能性を研究した。

以下では、石井、根村、佐々木、及び青木教授の学生である山田の 2013 年度の研究成果を紹介する。

格子 QCD による反対称 LS 力

Momentum wall source と cubic group を駆使して、格子 QCD により、負パリティセクタのハイペロン力と反対称 LS 力を研究した。格子 QCD 計算には、CP-PACS/JLQCD 生成の flavor SU(3) limit の 2+1 flavor ゲージ配位を用い

た。計算の都合上、flavor 既約表現 1 を除いた $27 \oplus 10 \oplus 10^* \oplus 8$ 表現についてのポテンシャルを求め、それを $N\Lambda$ - $N\Sigma$ 結合チャンネルポテンシャルの形に変形した。この段階では、反対称 LS 力は対称 LS 力に比べて非常に小さい物であったが、 $N\Sigma$ sector を integrate out することによって有効 $N\Lambda$ ポテンシャルを求めることによって、反対称 LS 力は大きくなった。現象論的に、対称 LS 力と反対称 LS 力の cancellation が期待されており、我々の結果はこれに対してポジティブである。

一般化されたバリオン間ポテンシャルの高速計算コードの開発

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機で高速に動くプログラムの開発を進めた。物理点になるべく近い格子 QCD 計算では、フレーバ SU(3) 対称性の破れを直接扱う必要があるため、計算すべきチャンネルが膨大になり、その各チャンネルの計算を系統的に効率よく行うことが求められる。また、こうした計算には大型計算機の使用が不可欠であるため、大型計算機上の計算効率の向上は、全体の研究の進捗を左右する重要な要素である。より具体的には、NBS 波動関数を求める際の数値計算の主要部分 (Wick contraction を計算する部分) のアルゴリズムの抜本的な整備をまずすすめた。核子だけでなく、 Λ や Σ 、 Ξ など、ハイペロンを含む複数 (例えば 52 チャンネル) の NBS 波動関数を、一度の計算で同時にかつ効率よく計算することのできるアルゴリズムを開発した。クォーク演算子の内部自由度とフェルミ統計性に起因する演算の繰り返しの回数を、unified contraction 法よりも数分の一程度に短縮することに成功した。このアルゴリズムを、C++ で書かれたプログラムとして実装することにも成功しており、格子 QCD 共通コード (Bridge++) と組み合わせて計算することが可能である。大型計算機 (BlueGene/Q) 上で、分散メモリ用の並列処理 (MPI) と共有メモリ用の並列処理 (OpenMP) を同時に利用したハイブリッド並列実行が可能であり、MPI 並列数とスレッド並列数の様々な組み合わせにおいて、安定して効率よく計算が行えることを確認した。

ハイペロン間相互作用の研究

ストレンジネス (S) を含むバリオン間相互作用の研究は、バリオン間の近距離斥力の起源を明らかにする上で重要である。佐々木らは、HAL QCD collaboration によるポテンシャルの導出方法を用いて、 $\Xi\Xi$ 間に働く相互作用についての研究を行った。この系は NN 系とフレーバーに関して共役関係になっており、バリオン間力の対称性を調べるうえで重要となっている。

計算は PACS-CS collaboration によって生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位を用い、中間子質量が 700MeV, 570MeV, 410MeV のに対応する 3 つの異なるクォーク質量について結果の解析を行った。これらをそれぞれ Esb1, 2, 3 と呼ぶことにし、SU(3) 対称性の破れもこの順に大きくなっている事に注意する。

図6は、準備段階ではあるが、Esb1, 2, 3のゲージ配位により得られた 1S_0 の $\Xi\Xi$ 間ポテンシャル(左図)と、そのポテンシャルを用いて計算された $\Xi\Xi$ の散乱位相差を示している。この図から、クォーク質量が軽くなり、SU(3)の破れが大きくなるにつれてポテンシャルの近距離斥力が徐々に強くなり、この影響で散乱位相差が斥力的に移り変わっていく様子を確認する事が出来た。

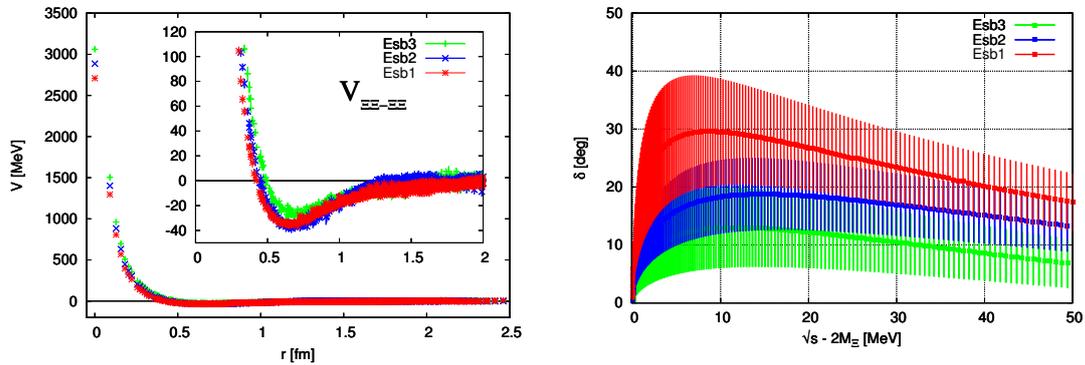


図6: 1S_0 チャンネルにおける $\Xi\Xi$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

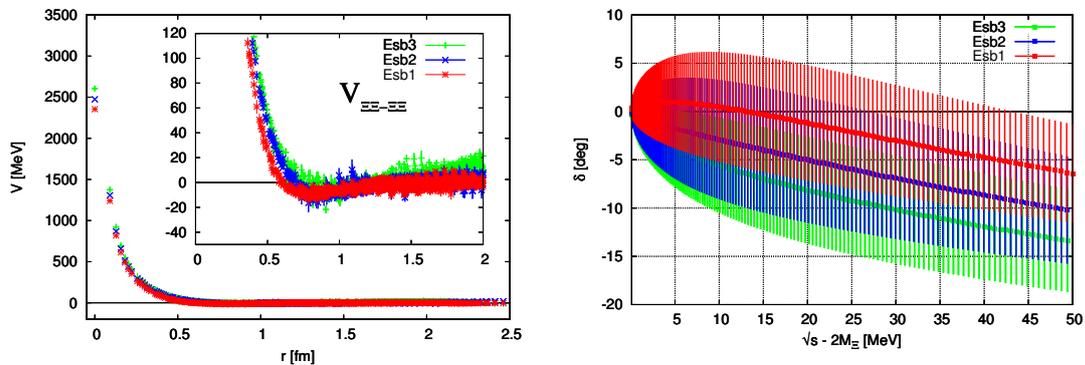


図7: 3S_1 チャンネルにおける $\Xi\Xi$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

図7は、先ほどと同様に 3S_1 の $\Xi\Xi$ 間ポテンシャル(左図)と、そのポテンシャルを用いて計算された $\Xi\Xi$ の散乱位相差を示している。ここでは、 1S_0 の場合と事なり、得られたポテンシャルは強い斥力的な性質を示すことが分かった。この性質は構成子クォーク模型で予想された性質と一致しており、バリオン内のクォーク自由度によるパウリ斥力の存在を示していると言える。また、この状態はフレーバー10次元表現に属し、 NN 系の重陽子状態が属する $\bar{10}$ 次元表現とは共役関係にあるが、この系には束縛状態が存在しない事が明らかとなった。

今後は、他の系についても解析をすすめ、中間子交換模型との差異を明らかにしつつ、2バリオン系における束縛状態の有無などを調べようと考えている。

Ω - Ω バリオン間相互作用の研究

Ω バリオンは、クォーク模型の分類におけるフレーバー 10 重項のなかで唯一強い相互作用で安定なバリオンである。山田らは、 Ω - Ω のポテンシャルを HAL QCD collaboration による核力ポテンシャルの導出方法を使い計算した。昨年に引き続き、クォーク模型の計算で強い引力があると予想されるトータルスピン $J = 0$ の状態の計算を行った。

前回までの計算では、CP-PACS/JLQCD collaborations が生成した 2+1 フレーバーの現実より重いクォーク質量 (中間子質量 875[MeV] に対応)、体積としては 1 辺 1.934(26)[fm] のゲージ配位を用いていたが、今回の計算ではより体積の大きい 1 辺 2.902(42)[fm] の PACS-CS collaboration が生成したゲージ配位 (中間子質量 700[MeV] に対応) を用いた。

結果は中心に斥力芯があり中距離には引力ポケットが存在していることがわかる (図 8)。前回と同様に強い引力であることは間違いないが、束縛するかどうかはギリギリのポテンシャルであるので、今後も慎重に解析を進めていこうと考えている。

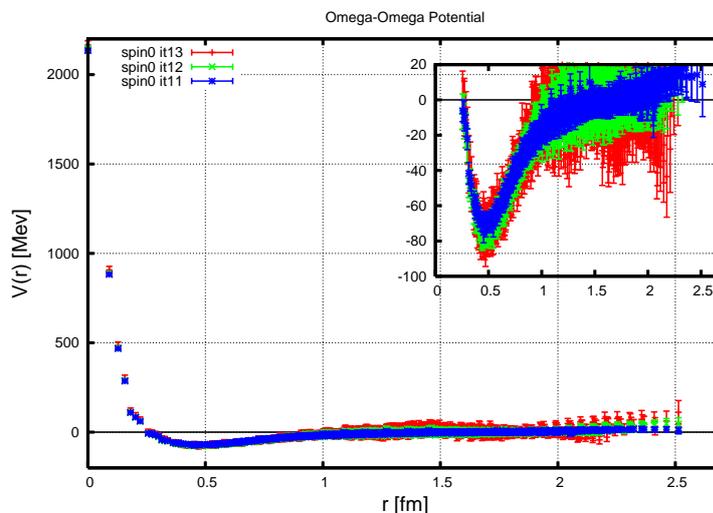


図 8: $J = 0$ である Ω - Ω 間のポテンシャル V [MeV]。横軸はバリオン間の距離 r [fm]。

(9) 重いクォークに対する改良型フェルミオン作用

KEK を中心とした JLQCD collaboration では重いクォーク系の精密計算に向けて、残余質量の小さいドメインウォールフェルミオン作用を用いて細かい格子の配位生成が進められている。それと平行して進められているのが、趙が担当している重いクォークを扱うための改良型フェルミオン作用の開発である。趙は高エネルギー加速器機構の橋本省二教授、野秋淳一特任助教らと共に、ブリルアンフェルミオンと呼ばれる新しいタイプのフェルミオン定式化に注目し、この離散化誤差を削減する改良を行った (論文 25)。改良型フェルミオンを用いた分散関係や固有値分布は連続理論に近い性質を持っていることが明らかになっている。

図9は、自由場上で分散関係を示している。緑はウィルソフェルミオン、青はブリルアンフェルミオン、マゼンダは改良型ブリルアンフェルミオンを表す。横軸は運動量、縦軸は運動量を表しており、各フェルミオン作用に関して運動量の方向 $(1,0,0), (1,1,0), (1,1,1)$ を同時にプロットしている。) またクエンチ近似配位 ($a = 0.052 - 0.099\text{fm}$) を用いたスケーリングテストを英国サウサンプトン大学のグループ (UKQCD collaboration) と共同で行っており共著論文を作成中である。さらにブリルアンフェルミオンや改良型フェルミオン作用の摂動的性質を調べるため、米国 Brookhaven National Laboratory の Christoph Lehner 氏と共同で PhySyHCAL (A Physics System based on Hierarchical Computer Algebra) を用いた研究を進めている。

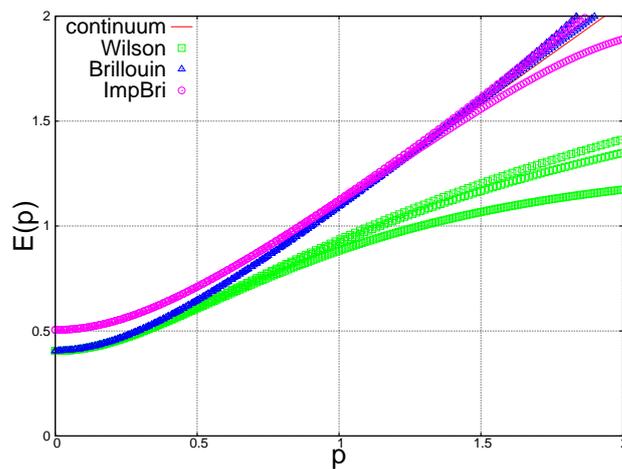


図 9: 自由場上で分散関係。 $m_q a = 0.5$ 。

(10) 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 (Caltech) と共同で行った。前年度の、有限カットオフをもつコンフォーマル理論の相構造の解明に続き、(a) 有限格子サイズの $N_f = 7, 8, 12, 16$ QCD のコンフォーマル領域の真空は、空間方向のポリヤコフラインが非自明な $Z(3)$ twisted の値を取ることに (論文 26)、(b) $N_f = 2$ QCD の高温相にもコンフォーマル領域が存在すること (論文 27)、(c) $N_f = 2$ 高温相に於けるコンフォーマル領域の温度 T/T_c と、コンフォーマル領域のフレーバー数 N_f には、中間子伝搬関数の対応関係があること (論文 26) を示した。

(11) 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) 京都大学基礎物理学研究所拠点及び理化学研究所仁科加速器研究センター拠点の新設、(b) HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携システムの構築 (仮想組織管理サーバ改修を含む)、(c) 監視システム Zabbix の導入、などである。

【2】超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。特に超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上(岡山光量子研)らとのこれまでの研究で、次元正則化を用いた計算により、tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができることを示している。今年度はボゾン弦の場合にこの結果を拡張し、次元正則化を用いた計算によりループ振幅についても第一量子化の計算と一致する結果を得ることができることを示した(論文 28)。

(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、このような極小曲面が等質サイン・ゴールドン模型と呼ばれる2次元可積分模型の熱力学的ベータ仮説方程式で記述されることを示した。また、その結果および g -関数(境界エントロピー)と Y -関数(スペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比)の関係を用いることにより、運動量が2、3次元空間に制限される場合に、対応するウィルソンループが正多角形となる極限の周りで maximally helicity violating (MHV) 振幅を解析的に評価する方法を定式化した。

佐藤は初田(DESY)、伊藤(東京工業大)、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 30)。

論文

1. S. Ueda, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Bridge++: an object-oriented C++ code for lattice simulations, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 412.
2. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Multi-nucleon bound states in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 230.

3. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 474.
4. K. Sasaki, N. Ishizuka, M. Oka, T. Yamazaki, Scattering lengths for two pseudoscalar meson systems, Phys. Rev. D89 (2014) ref. 054502.
5. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, Charmed baryons at the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 87, No. 9 (2013) ref. 094512.
6. T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, S. Yoshida (WHOT-QCD Collaboration), Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 450.
7. H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno, T. Umeda, Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density, Phys. Rev. D 89, No.3 (2014) ref. 034507.
8. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Finite size scaling study of $N_f = 4$ finite density QCD on the lattice, Phys. Rev. D88 (2013) ref. 094508.
9. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Finite size scaling study for 3 and 4-flavor QCD with finite chemical potential, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 203.
10. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Zeros of QCD partition function from finite density lattices, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 204.
11. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Grassmann Tensor Renormalization Group Approach to One-Flavor Lattice Schwinger Model, arXiv:1403.0642[hep-lat].
12. S. Aoki, H. Fukaya, and Y. Taniguchi, 1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 139.
13. Sinya Aoki, Noriyoshi Ishii, Takumi Doi, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Asymptotic behavior of Nambu-Bethe-Salpeter wave functions for multi-particles in quantum field theories, Phys. Rev. D88 (2013) ref. 014036.
14. T. Kurth, N. Ishii, T. Doi, S. Aoki and T. Hatsuda, Phase shifts in $I = 2$ $\pi\pi$ -scattering from two lattice approaches, JHEP1312 (2013) ref. 015.

15. Takashi Inoue, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD collaboration), Equation of State for Nucleonic Matter and its Quark Mass Dependence from the Nuclear Force in Lattice QCD, *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) ref. 112503.
16. Yoichi Ikeda, Bruno Charron, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Charmed Tetraquarks T_{cc} and T_{cs} from Dynamical Lattice QCD Simulations, *Phys. Lett.* B729 (2014) 85.
17. N.Ishii, 2+1 Flavor QCD Results of Nuclear Forces, *Few Body Syst.* 54 (2013) 1071.
18. N.Ishii for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD, *Proceedings of Science (Chiral Dynamics 2012)* ref. 025 in press.
19. N.Ishii, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from lattice QCD, *Proceedings of Science (Lattice 2013)* ref. 234.
20. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, Lambda N and Sigma N interactions from lattice QCD, *Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems* 54 (2013) 1223.
21. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, An Implementation of Hybrid C++ Code for the Four-Point Correlation Function of Various Baryon-Baryon Systems, *Proceedings of Science (Lattice 2013)* ref. 426.
22. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Studies of multi-strangeness baryon-baryon interactions from lattice QCD, *Proceedings of Science (Lattice 2013)* ref. 233.
23. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to baryon-baryon interactions with strangeness on the lattice, To be appeared in *Few-Body Systems*.
24. M. Yamada, Omega-Omega Interaction on the Lattice, *Proceedings of Science (Lattice 2013)* ref. 232.
25. Y.G. Cho, S. Hashimoto, J.I. Noaki, A. Jüttner and M. Marinovic, $O(a^2)$ -improved actions for heavy quarks and scaling studies on quenched lattices, *Proceedings of Science (Lattice 2013)* ref. 255.
26. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, Global Structure of Conformal Theories in the SU(3) Gauge Theory, arXiv:1310.5049[hep-lat].

27. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, Conformal Behavior in QCD, arXiv:1304.4345[hep-lat].
28. N. Ishibashi and K. Murakami, Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Bosonic String Field Theory in Noncritical Dimensions, JHEP 1309 (2013) ref. 053.
29. T. Baba and N. Ishibashi, Energy from the gauge invariant observables, JHEP 1304 (2013) ref. 050.
30. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, Quantum Wronskian approach to gluon scattering amplitudes at strong coupling, preprint UTHEP-662.
31. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, Nuclear Physics B Proceedings Supplement, in press.
32. 佐藤 勇二, AdS 空間中の極小曲面とグルーオン散乱振幅, RIMS Kokyuroku (数理解析研究所講究録) 1880 (2014) 42.

学位論文

[博士論文]

1. 馬場 隆行

「Energy from the gauge invariant observables (弦の場の理論の古典解における、エネルギーとゲージ不変観測の関係)」

研究成果発表 (講演)

[国際会議]

1. Yuji Satoh, 「MHV amplitude around the regular-polygonal limit」(招待講演),
Lectures at Eotvos Spring School on Recent Advances in AdS/CFT (Eotvos University, Budapest, Hungary, May 27-31, 2013).
2. Yuji Satoh, 「MHV amplitude around regular-polygonal limit」(招待講演),
Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory (Kavli IPMU at University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Aug. 26-Sep. 6, 2013).
3. N. Ishii, 「Lattice QCD approach to Nuclear Physics」(招待講演),
13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2013) (Rome, Italy, Sep. 30-Oct. 4, 2013).

4. N. Ishii, 「Baryon-baryon interaction from Lattice QCD」(招待講演),
Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar
2013 (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).
5. Y. Kuramashi, 「Lattice QCD – From Quarks to Nuclei –」(招待講演),
University of Tsukuba and Beihang University Collaboration Meeting on Nu-
clear Physics (Tsukuba, Japan, Nov. 11-12, 2013).
6. Y. Kuramashi, 「Elementary Particle Physics in Future HPC」(招待講演),
The 4th AICS International Symposium (Kobe, Japan, Dec. 2-3, 2013).
7. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge string field theory and dimensional
regularization」(招待講演),
KEK Theory Workshop 2014 (KEK, Tsukuba, Japan, Feb. 18-21, 2014).
8. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」,
International Lattice Data Grid 19 (TV workshop hosted by INTF, Italy, May
5, 2013).
9. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Lattice QCD approach to the strangeness
 $S = -2$ two-baryon system」,
THE 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE PHYSICS OF EX-
CITED NUCLEONS (Valencia, Spain, May 27 - 30, 2013).
10. Y. Kuramashi, 「2+1 Flavor Lattice QCD Simulation on K Computer」,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
11. Yusuke Taniguchi, 「1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition
of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis」,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
12. Yong-Gwi Cho, 「 $O(a^2)$ -improved actions for heavy quarks and scaling studies
on quenched lattices」,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
13. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved
Wilson fermion」,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
14. T. Umeda, Y. Nakagawa, S. Aoki, H. Saito, K. Kanaya, H. Ohno, T. Hatsuda,
S. Yoshida, Y. Maezawa (WHOT-QCD Collaboration), 「Scaling properties
of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with

- improved Wilson fermions」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
15. Hana Saito (WHOT-QCD Collaboration), 「 QCD phase transition at finite T and μ in the heavy quark region」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 16. N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「 The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from Lattice QCD」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 17. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「 Studies of multi-strangeness baryon-baryon interactions from lattice QCD」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 18. M. Yamada, 「 Omega-Omega interaction on the Lattice」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 19. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「 Coupled channel approach to baryon-baryon interactions with strangeness on the lattice」 , The 22nd European Conference on Few Body Problems in Physics (Krakow, Poland, Sep. 9-13 2013).
 20. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「 Hypernuclei on the Lattice」 ,
Forth International Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA2013) (Kemer, Antalya, Turkey, Sep. 29 - Oct. 6, 2013).
 21. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「 Strangeness $S = -2$ baryon-baryon interactions on the lattice」 ,
ECT* Conference: Strangeness in the Universe? Theoretical and experimental progress and challenges (Trento, Italy, Oct. 21-25, 2013).
 22. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「 Recent developments on LQCD studies of nuclear force」 ,
The Seventh International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (Beijing, China, Oct. 27-30, 2013).
 23. Yusuke Taniguchi, 「 The order of finite temperature phase transition of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis」 ,
German-Japanese Seminar 2013: Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).

24. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」, International Lattice Data Grid 21 (TV workshop hosted by CSSM, Australia, Dec. 13, 2013).
25. Yuji Satoh, 「Remainder function of N=4 SYM and massless TBA」, Workshop on Progress in the Synthesis of Integrabilities Arising from Gauge-String Duality (KKR hotel Biwako, Ootsu; Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Mar. 4-7, 2014).
26. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Study of hyperon potentials from 2+1 Lattice QCD」, The Third Korea-Japan on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC (Incheon, Korea, Mar. 20-21, 2014).

[国内学会、研究会]

1. 石橋 延幸 「弦の場の理論」(招待講演), 場の理論の進展 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2013年5月18日).
2. 佐藤 勇二 「AdS 空間中の極小曲面とグルーオン散乱振幅」(招待講演), RIMS 研究集会「部分多様体の微分幾何学の深化」(京都大学数理解析研究所, 京都, 2013年6月24日-26日).
3. 石井 理修 「時間相関と空間相関」(招待講演), 日本物理学会 2013年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013年9月20-23日).
4. 藏増 嘉伸 「PACS-CS Project and beyond」(招待講演), 新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013年12月20-21日).
5. 滑川 裕介 「格子 QCD によるヘビーハドロン」(招待講演), 「ヘビークォークハドロンと原子核のスペクトルと構造」研究会 (高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2014年2月26-28日).
6. 谷口 裕介 「Two flavor QCD の有限温度相転移次数の有効理論による解析」, 日本物理学会 2013年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013年9月20-23日).
7. 石井 理修, 村野 啓子, 根村 英克, 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration 「格子 QCD による反対称 LS 力」, 日本物理学会 2013年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013年9月20-23日).
8. 平沼 孝一郎, 石井 理修, 岡 真 「波動関数等価ポテンシャルの微分展開」, 日本物理学会 2013年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013年9月20-23日).
9. 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration 「格子 QCD によるハイペロン間ポテンシャルの性質」, 日本物理学会 2013年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013年9月20-23日).

10. 趙 栄貴 「ブリルアンフェルミオンを用いた格子上での重いクォークの定式化の開発」,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
11. 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 中間報告会 (東京, 2013 年 10 月 3-4 日).
12. 石塚 成人 「格子 QCD による共鳴状態の研究」,
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013 年 12 月 20-21 日).
13. 吉江 友照 「LDG/JLDG と HPC」,
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013 年 12 月 20-21 日).
14. 谷口 裕介 「1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition of
 $N_f = 2$ QCD from effective theory」,
計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 研究会「Lattice QCD at finite temperature
and density」 (高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2014 年 1 月 20-22 日).
15. 吉江 友照 「ILDG/JLDG の進捗」,
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 (富
士ソフトアキバプラザ, 秋葉原, 2014 年 3 月 3-4 日).
16. 石井 理修, 村野 啓子, 根村 英克, 佐々木 健志, 井上 貴史 for HAL QCD Col-
laboration 「格子 QCD による反対称 LS 力 (II)」,
日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大学, 平塚, 2014 年 3 月 27-30 日).
17. 根村 英克 HAL QCD Collaboration 「格子 QCD による一般化核力研究のため
の高速アルゴリズムの検討」,
日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大学, 平塚, 2014 年 3 月 27-30 日).

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-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-
2013 年 8 月 20 日-24 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都
2. 計算基礎科学連携拠点・HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構
造」主催
HPCI 戦略プログラム分野 5 全体シンポジウム,
2014 年 3 月 4 日-5 日, 富士ソフトアキバプラザ 6 階セミナールーム 1, 東京

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. 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)」のグローバルネットワークへの参加
7. 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
8. 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
研究科特別研究員	武政 健一
大学院生	14 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 に参加している。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, ニュートリノ崩壊の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の増強を経て, 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 fb^{-1} である。この全データを用いた物理解析もほぼ終了し, 最終結果を論文として公表する段階にある。以下には, 2013 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後 20 年近くが経過し, 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。トップクォーク対が 1 つの荷電レプトンと 4 つのジェットを含む終状態に崩壊するチャンネル (lepton+jets チャンネル) は, 崩壊分岐比および信号対雑音比がともに高く, 精度の良い測定が可能である。積分輝度 8.7 fb^{-1} から 9.3 fb^{-1} 相当のデータを用いて, $m_{\text{top}} = 173.16 \pm 0.57 \pm 0.74 \text{ GeV}/c^2$ という最終結果を得た (図 1)。相対的な精度は 0.54% であり, 実験前の予測を大きく上回る。

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 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。2013 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

欧州セルレン研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は, 2011 年は重心系エネルギー 7 TeV, 2012 年は 8 TeV での陽子陽子衝突を行い, 現在は 2015 年 4 月からの設計エネルギー

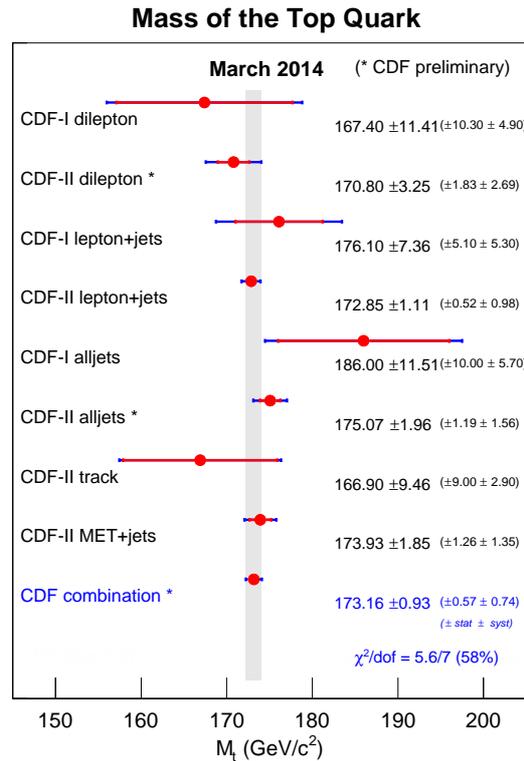


図 1: CDF 実験によるトップクォークの質量の測定。

(13–14 TeV) での衝突実験のために加速器を増強中である。ATLAS 実験グループはヒッグス粒子を発見後、ヒッグス粒子を様々な崩壊モードで測定することにより、標準模型ヒッグスと矛盾しないかの検証を続けるととも 2015 年からの LHC 衝突のために検出器を増強している。また、2023 年以降は、LHC は設計値を超えた高輝度実験、HL-LHC 加速器に増強する予定である。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、素粒子の標準模型では唯一未確認であり、ATLAS 実験はその発見を最大の目標としてきたが、2012 年末には新たに発見した粒子がヒッグス粒子と矛盾しないことを示した。この”発見”の段階では、ヒッグス粒子が 2 つの光子、2 つの Z ボソン、2 つの W ボソンに崩壊するモードが主であり、ヒッグス粒子がゲージボソンに質量を与えると明確に示した。標準模型ではヒッグス粒子はフェルミ粒子にも質量を与えているが、その検証の重要性は極めて高く、昨年度と比較し τ 対に崩壊する解析に重要な進展が得られた。

τ 粒子にはハドロン終状態 (τ_h) とレプトン終状態 (τ_ℓ , $\ell=e, \mu$) に崩壊するモードがある。レプトン終状態にはニュートリノが含まれるので τ の再構成精度が限定的でありハドロン終状態では背景事象となるジェット除去が課題となるなど崩壊モード毎の詳細な事象の理解が重要である。最も大きな背景事象である $Z \rightarrow \tau\tau$ とは質量の違いを用いて区別するため、背景事象の除去と質量再構成精度が共に必要となる。

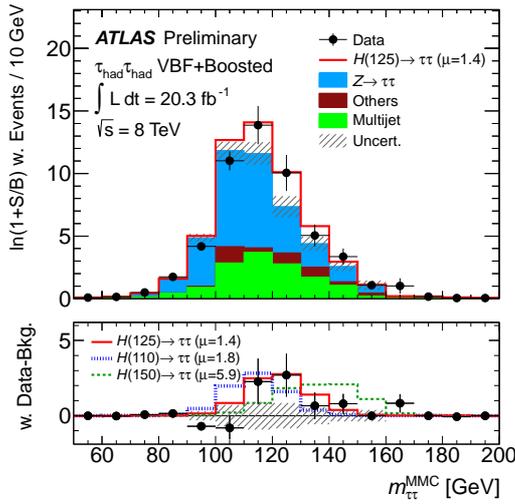


図 2: $\tau\tau$ 終状態の候補事象で再構成した不変質量分布。データの分布を標準模型より 1.4 倍多いヒッグスの生成と背景事象の和と比較。(下) 背景事象からの超過分をヒッグスの質量をいくつか変えてフィットした結果。

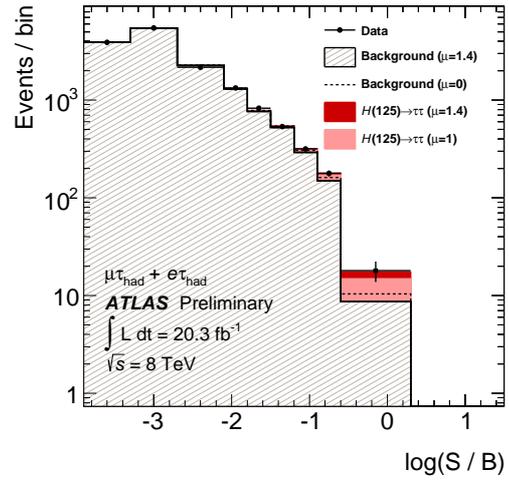


図 3: τ_h と τ_ℓ 候補を最終状態にもつ事象に対してヒッグスらしさ (S), 背景事象らしさ (B) の比 S/B の対数を横軸にした事象数分布。ヒッグスからの崩壊と考えられる事象の超過が見られる。

図 2 は終状態に 2 つの τ 候補を含む事象の質量分布を示す。事象の多くは、 $Z \rightarrow \tau\tau$ であるが、 $125 \text{ GeV}/c^2$ の標準模型ヒッグスと矛盾しない超過が得られた。この解析では背景事象をより精密に理解し BDT (= Boosted Decision Tree) などの統計手法を駆使している。終状態に τ_h と τ_ℓ 候補を含む事象のヒッグスらしさと背景事象らしさの比 (S/B) で区別した事象数分布を図 3 に示す。S/B が 1 に近いヒッグス観測に感度のあるデータ点は背景事象数から明らかな超過を示し、生成量は標準模型の場合よりやや多い $\mu = 1.4$ が最確値である。

他の τ 崩壊モードも総合的に評価し、また昨年度までに測定済みのヒッグスの他の崩壊チャンネルと併せて、標準模型が予言する生成に対して観測された事象数の比 (μ) を図 4 に示す。 $\tau\tau$ に関しては、ATLAS 単独で約 3σ の有意度で観測できた。CMS の結果と合わせるとレプトンへ質量を与えることもほぼ確定した。これは標準模型でのヒッグスモデルの重要な検証結果である。

図 5 は、各崩壊モード毎ではなくボソンとの結合およびフェルミオンとの結合、または両者の比など、モデルを仮定して全データをフィットして得られた結合定数の標準模型との比を表す。多くは標準模型の値 (= 1) の結果が得られ、標準模型との一致度 (P_{SM}) は 9% 以上となった。

図 4 が示すように、いくつかのチャンネルで標準模型 ($\mu = 1$) と測定値にずれがあるが、統計的に十分に有為であるとはいえない。また、ボトムクォーク対への崩壊は感度がない。現在、解析方法を最適化することで、ボトムクォーク対への崩壊を観測しクォークの質量もヒッグスが与えるかの検証の最終段階にある。引き続き 2014 年からの物理ランでは、統計精度や系統誤差をより小さくし、より精密に標準模型の検証を行う。

ヒッグスのスピン-パリティ J^P の測定は、 ZZ 終状態が最も感度があるが、他の主な発見モードである $\gamma\gamma$ および WW 終状態も加えいくつかの J^P の仮定に対するデータの一致度を評価した。

図 6 は、 ZZ 終状態を用いてヒッグス粒子のスピン-パリティ 0^+ と対照のために 0^- に対す

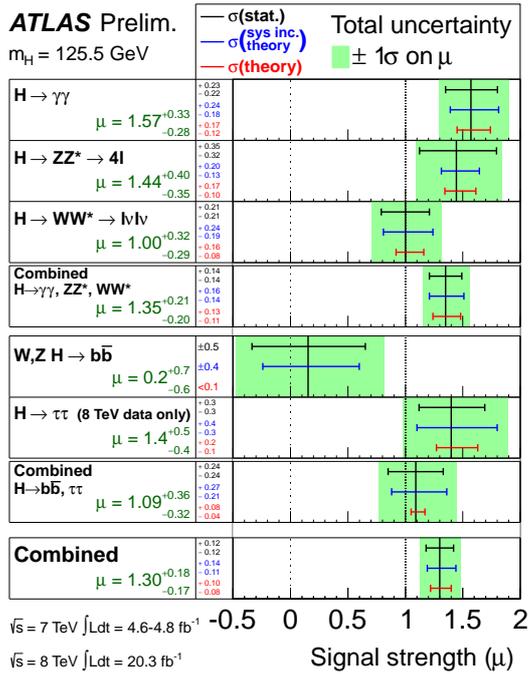


図 4: 崩壊モード毎のヒッグス生成数の標準模型との比。不確かさは帯で示され、統計不確かさ、理論を含む系統不確かさ、理論のみの不確かさを誤差棒で示してある。

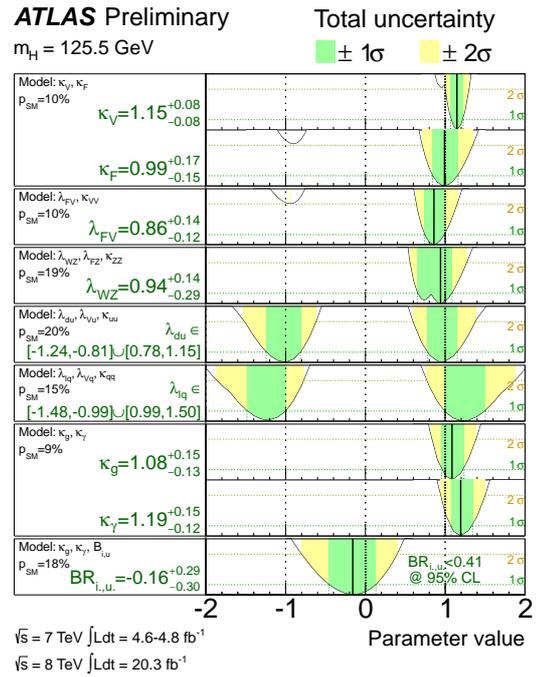


図 5: ヒッグスとの結合定数。 κ_A は $A = V, F$ の標準模型との結合比、 λ_{AB} は A と B の結合比の標準模型との比、 $B_{i,u}$ は光子生成のループに現れる未知の粒子の生成（標準模型では 0）を示す。

る仮定のもとに、 ZZ 終状態を用いその様々運動学量を BDT 変数で表したものである。 0^+ に対して 0^- の一致度が低い。

図 7 は 3 つの終状態を統合して、 $0^-, 1^+, 1^-, 2^+_{m}$ に対する一致度を示す。 2σ から 3.4σ の確度でこれらを排除している。ここで 2^+_{m} はグラビトン型のスピン 2 のモデルの中で最も 0^+ と区別しにくいモデルを採用している。

(2) 標準模型を超える物理の探索

エネルギー最前線の LHC 実験では、標準模型を超える粒子が生成される期待がありその探索は注目されている。またヒッグス粒子は質量のあるものと結合するので、暗黒物質粒子など未知の粒子の存在にも制限を与えることができる。

図 5 に示された未知の粒子への分岐比 $B_{i,u}$ からその上限が 0.41 (95%CL) と得られた。これに $Zh \rightarrow ll + E_T^{\text{miss}}$ のチャンネルを加えると上限は 0.39 まで下る。この上限値を用いると、未知の粒子として WIMP (暗黒物質の候補) を想定し、ヒッグスが WIMP 対に崩壊する確率に制限を与えることができる。WIMP との結合の強さは WIMP のタイプ (スカラー型、ベクター型、マヨラナ型) と質量に依存するが、それらを指定すると結合の上限値が確定できる。図 8 は他の実験の測定結果と比較するために、結合の上限値を WIMP と核子との反応断面積の上限値に焼き直したもので WIMP の質量を横軸にして WIMP のタイプ毎に 95%CL を示したものである。

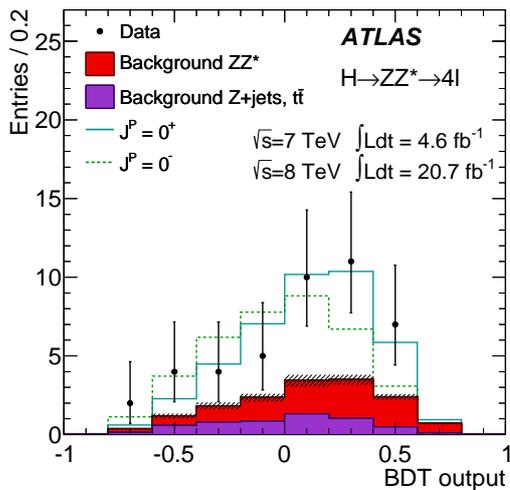


図 6: ZZ 終状態で 0^+ と 0^- に対する BDT 値の分布。BDT に用いた運動学量の内、特に感度の高いのは、最も横運動量の高い崩壊レプトンの崩壊角と軽い方 (off-shell) の Z 粒子質量分布。

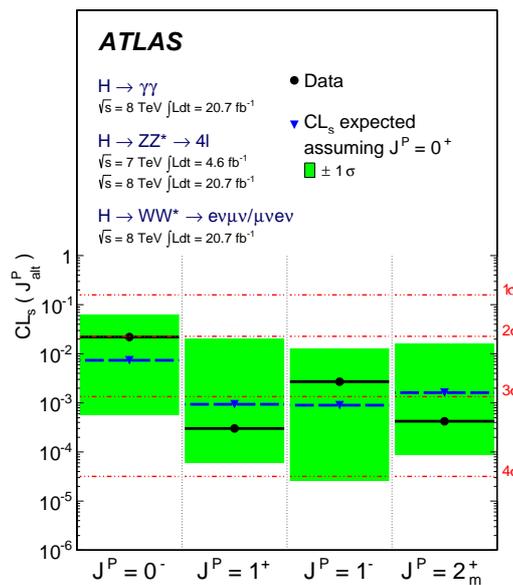


図 7: Z, WW, $\gamma\gamma$ 終状態での、いくつかのスピ
ン-パリティ仮定での一致度の比較。データ (実
線) およびヒッグスが 0^+ であるとした場合の
実験の感度予想 (破線) がほぼ一致している。

超対称性 (SUSY) は階層性の問題を解決するために最も注目され、対応する SUSY 粒子が 1 TeV の質量領域に存在することが期待されている。また、最も軽い中性 SUSY 粒子は暗黒物質の候補に成り得るので宇宙論にも重要な探索とみなされる。SUSY の様々なモデルに従い探索を行い昨年度報告からいくつかの探索領域の進展が見られるが、8 TeV における兆候は見られない。

余剰次元は理論モデルおよび設定パラメータによりまた探索モードにより最大 $6.2 \text{ TeV}/c^2$ までの質量を棄却した。

その他、新しいゲージボソン、新しいクォーク、レプトクォーク、クォーク励起状態など、様々な探索を行ったが、標準模型を超える粒子は観測されていない。

重いこれらの粒子は、重心系エネルギーが高いほど生成されやすく、衝突エネルギーが 13 ~ 14 TeV に増強され来年から始まるデータ収集ランでの探索が期待されている。

(3) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC は当初の設計エネルギー (14 TeV) と設計衝突輝度 ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を 2015 年以降に達成する計画である。その後も継続して統計精度を向上させるために、2023 年からは、LHC の設計値を超えた高輝度 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、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も行っている。

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) を開発している。この開発は 8 年間継続し、昨年度までの研究で、FZ 法による高抵抗の p 型シリコン基板を用い P-STOP を電極分離の構造としたセンサーを試作

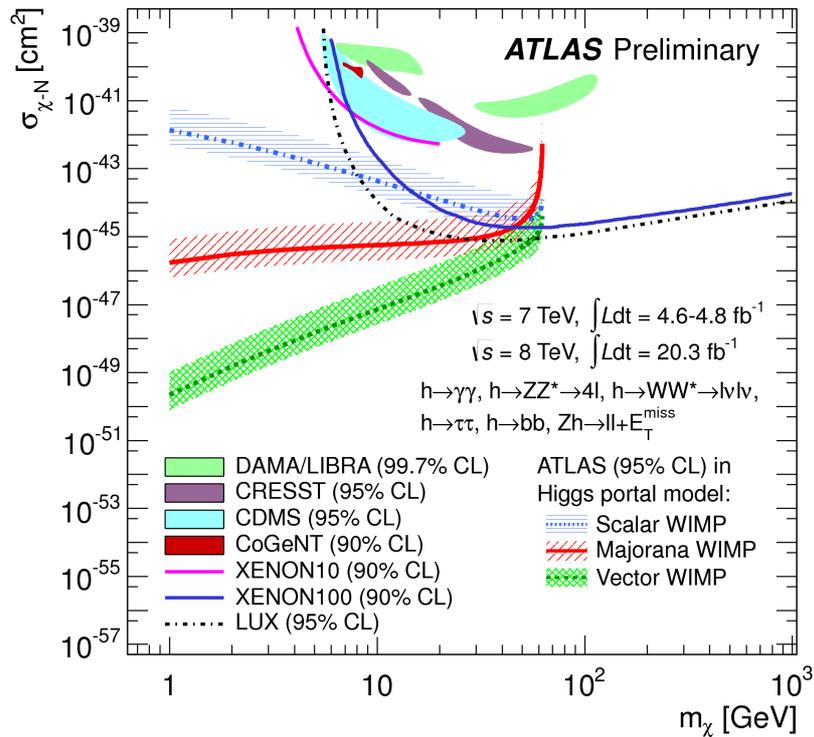


図 8: ヒッグス粒子の未知の粒子への崩壊分岐比の上限値から得られた WIMP-核子の反応断面積の上限 (95%CL)。3本の曲線は仮定した3つの WIMP タイプについての上限值で斜線部は核子の形状因子の不定性に対応する。

し、陽子線と中性子線を実際に照射し、HL-LHCの高放射線線量（ストリップ型で 1×10^{15} 1-MeV n_{eq}/cm^2 ）を受けても使用可能な設計を確立した。

現行のストリップ型シリコン検出器は電極長が 12 cm であるが、HL-LHC では粒子数の増大に耐えるため、衝突点に近い領域では 2.4 cm、外側では 4.8 cm が採用される。そのようなセンサー（ATLAS12M）を 6 インチウェハーで作製した。また放射線耐性の評価用に 1 cm 角のミニセンサーを同時に作製した。

図 9 は東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームをサンプルに照射して通過する β 線に対して収集できる電荷量を評価したものである。未照射に比べて収集電荷量は照射とともに減少するが、電圧を上げることで増加し、HL-LHC で予想される $1 \times 10^{15} cm^{-2}$ を超える照射量で十分な電荷を収集できる。

また、図 10 は照射したサンプルの暗電流を $-30^\circ C$ で測定したものである。センサーのエッジ部分は高電圧に耐えられるように従来は 910 μm の距離を確保 (STD) していたが、450 μm に短くしたサンプル (SLIM) においてもブレイクダウンしないことを示した。

p 型シリコンを用いたピクセル型センサーは製造コストが低く抑えられ、従来から使用されている放射線耐性に優れた n 電極読み出し n 基板 (n^+in-n) に匹敵する放射線耐性が期待できる。実際に $10^{16}/cm^2$ に及ぶ照射量を与え、ピクセルセンサーの応答をテストビームで評価している。図 11 は 1 ピクセル (50 $\mu m \times 250 \mu m$) の領域に渡って検出効率を評価した

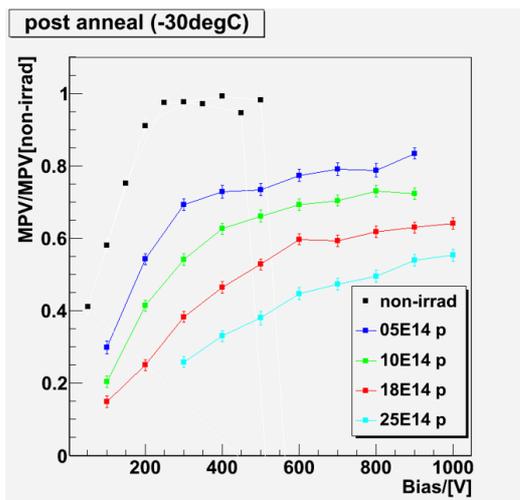


図 9: 通過する β 線で評価した収集電荷量 (未照射との比) の電圧依存性。サンプルは ATLAS12M。異なるデータは陽子照射量の違いで、数値は 1 MeV 中性子に換算した 1 cm^2 あたりの粒子数 ($1\text{-MeV } n_{eq}/\text{cm}^2$)。

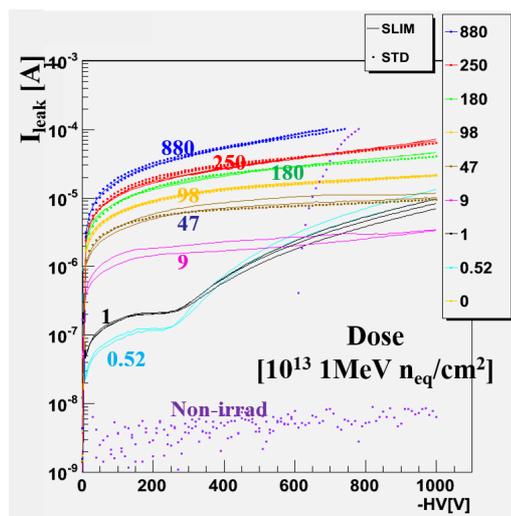


図 10: 照射したミニセンサー暗電流のバイアス電圧依存性。照射量は中性子数換算で $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を単位として与えられている。STD と SLIM に差はない。

もので、ビームが垂直入射の場合、実際に近い 15° 傾けた場合について、3 種類の電極構造について評価したものである。照射済みのセンサーについても同様な試験を継続している。

(4) Silicon-On-Insulator 技術を用いた読み出し一体型ピクセル検出器

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 2005 年以來 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開発研究を行っている。

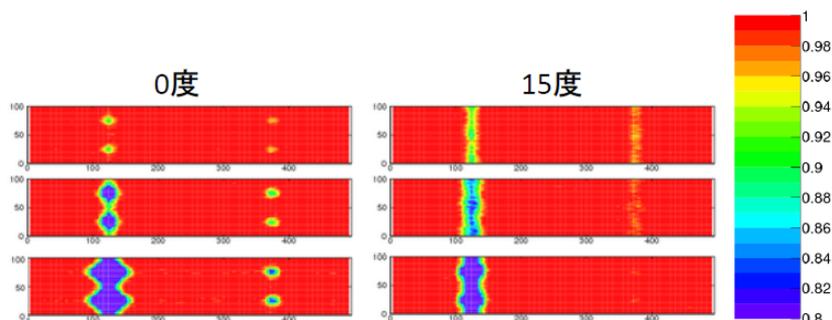


図 11: 未照射の p 型 PIXEL センサーの検出効率。効率がやや劣化する領域が隣接ピクセルとの境界に相当する。ビームの入射角度、電極設計の違いにより劣化領域が異なる。

dashed line : preirrad, VSOI2=0V

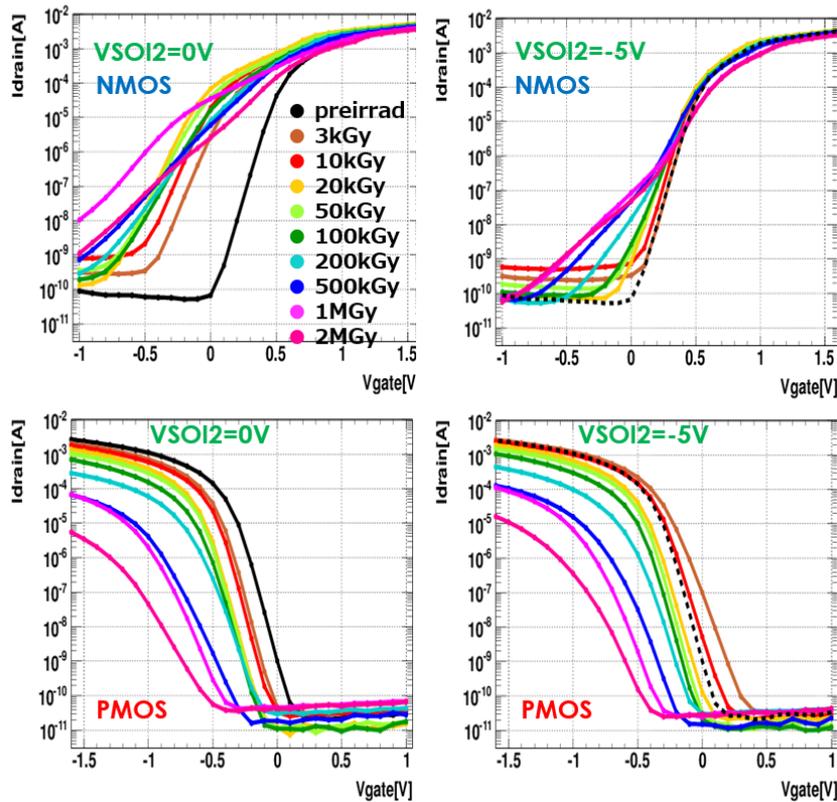


図 12: 新たに開発した 2 重 SOI 素子トランジスタの I-V 曲線。NMOS, PMOS ともに照射線量につれ I-V 曲線がバイアス電圧の負側にシフトする。中間シリコン層に負電圧を加えることにより未照射曲線に近づく。

昨年度までの研究開発で、高速な電荷収集が可能な全空乏化型ピクセル検出器を試作し、素粒子実験での衝突点近傍に設置するピクセル検出器として必要な多重散乱を抑えるために物質量を減らす薄型化の実現を行った。実際に荷電粒子の検出能力をテストビームで実証してきた。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、Lapis の FD-SOI プロセスでは、高速応答、広範囲の温度領域でも使用できる特質があるため、さまざまな分野での応用が期待できる。しかし酸化膜は、一方、正孔を蓄積し、電離性放射線線量が増えると蓄積電荷の影響を受けて近傍にあるトランジスタの特性を変化させることが分かっていた。高輝度のハドロン実験に適用するためには、この課題の解決が不可欠である。

そこで埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 重 SOI 基板を世界で初めて製作し、最下部の粒子センサー基板の上に中間 SOI シリコン層をはさんで 2 重の埋め込み酸化膜 (BOX と BOX2) を形成した。BOX2 の直上にあるトランジスタの性能は BOX2 の帯電により影響を受けるが、中間シリコン層に電圧を加えることでその変化を補償できる。

実際に補償可能であることを確かめるために、いくつかのタイプのトランジスタに Co γ 線を照射して、トランジスタ特性の線量依存性を測定した。図 12 は NMOS トランジスタのしきい値電圧の変化を線量ごとに示したものであるが、線量とともにしきい値電圧は減少す

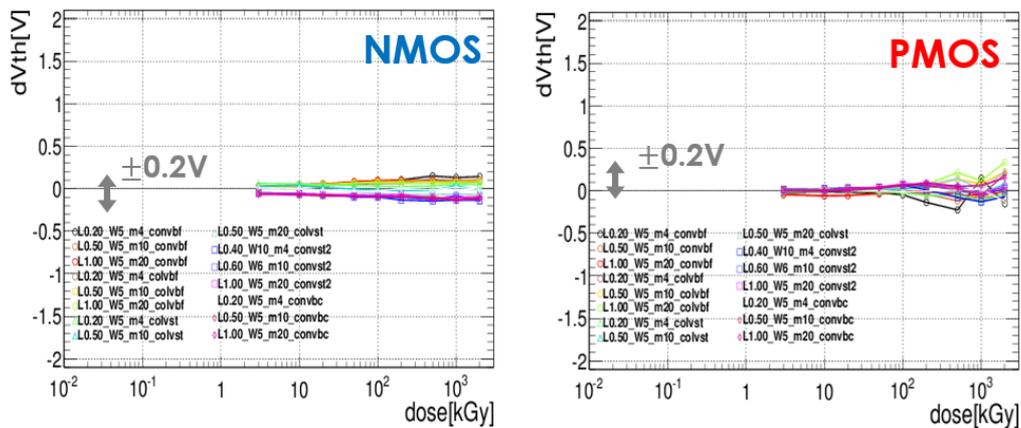


図 13: 2重 SOI 基板上に形成した FET のしきい値電圧の線量依存性。中間シリコン層の電圧が 0 V のままでは NMOS のしきい値電圧は下がり負になるが、適切な電圧を加えることで補償可能で、どの線量でも初期のしきい値電圧に戻ることを示した。

る。右図は -5 V を中間シリコン層に加えた場合で、特に NMOS では未照射の特性にほぼ回復できることを示している。PMOS は線量に依存性が大きいですが、トランジスタの種類に依らず、線量のみ依存する補償電圧を設定することでトランジスタの閾値電圧の値は未照射の値に近づけられる。図 13 はそのように補正した場合で、2 MGy までの全ての線量領域で 0.2 V の範囲内で未照射と一致する結果を表す。これより高い精度での補償を要求する場合は、トランジスタの種類によりさらに調整電圧を設定する必要があるが、原理的に SOI センサーが 1 MGy を越えて作動できることが初めて示された。

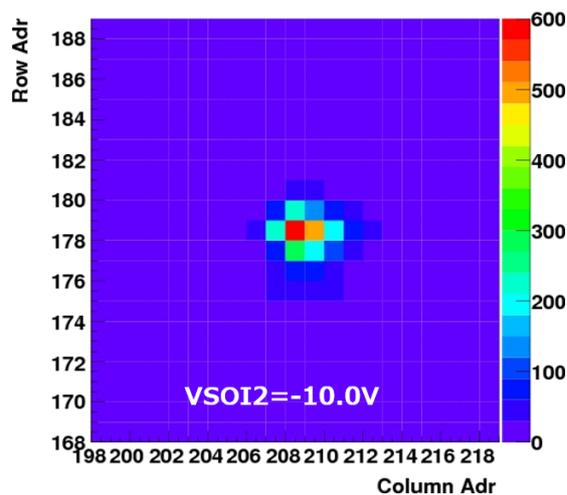


図 14: 100 kGy 照射後のピクセル検出器のレーザー光に対する応答。補償電圧を加えないと全く応答はみられないが -10 V を加えることで未照射と同等の応答を示した。

実際にピクセルセンサーを 100 kGy まで照射し光応答が得られるかの測定を行った。試

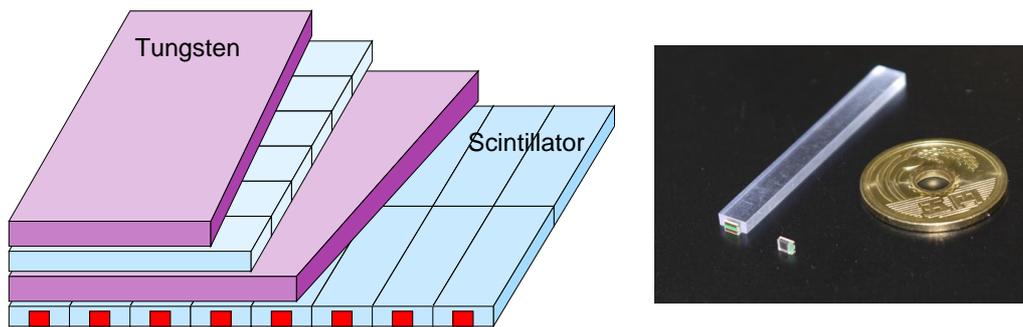


図 15: ILC(ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、シンチレータストリップ (43.5mm × 5mm × 2mm) を横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。

験したセンサーでは NMOS, PMOS にかかわらず共通の補償電圧を加えられる設計である。100 kGy 照射後のピクセル検出器は補償電圧を加えないとレーザー光に対して全く応答しないが、 -10 V を加えることで未照射と同等の応答を示した。

今までのセンサーは数 kGy の放射線で応答が著しく劣化した。2重 SOI の採用で動作する放射線線量領域が大きく広がった。また 100 kGy を超える領域では NMOS, PMOS 個別の補償電圧を加えられることが必要であるとの知見も得られた。

将来の加速器実験における放射線量として、国際リニアコライダー (ILC) ではピクセル領域では年間 1 kGy が予想されているので、2重 SOI 構造の採用により十分使用できるセンサーを設計できる目処があった。高輝度 LHC (HL-LHC) では年間 1 MGy なので、現在までの試験結果では不十分である。回路に用いられるトランジスター個別についてどの様に補償するかを検討を行う。

【3】 ILC 実験

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、またバックグラウンド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。ここ 2 年程度の間には、LHC 実験によるヒッグス粒子の発見を経て ILC 初期での物理の対象が明らかとなったことに加え、2012 年 12 月の「国際リニアコライダー (ILC) 計画」の技術設計書の最終稿の完成と 2013 年 6 月の公開、および、2013 年 9 月の国内サイト最終候補地の選定などを経て、ILC 計画は大きな進展を迎えた。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。

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

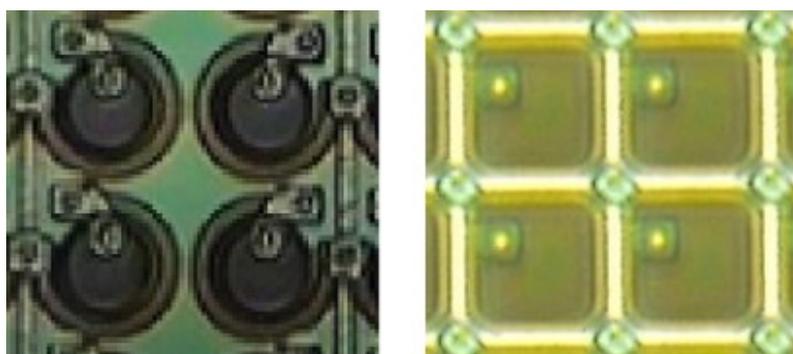


図 16: 旧型 (左) と新型 (右) の MPPC のピクセル写真。

エネルギー分解能は、 $\sigma(E)/E = 0.3/\sqrt{E(\text{GeV})}$ 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、KEK、九州大、信州大、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) の研究開発を行なっている。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 15)。

シンチレータは非常に細かいセル構造が要求されるため、読み出しのために膨大な数の光センサーが必要となる上、磁場中で使用されることもあり、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、新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) が、現状では光センサーのほぼ唯一解である。

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 サンプルを用い、MPPC 単体、および実機に近づけた形として、シンチレータのストリップと MPPC を組み合わせたモジュールでの応答特性の試験を行ってきた。

2013 年度には、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数の増加 (最大 10,000 ピクセル) を実現している (図 16)。これらは、検出効率と応答線形性の向上につながる。実際に測定を行い評価した。その一例として新型の 1,600 ピクセルと 10,000 ピクセルの MPPC の線形応答性を図 17 に示す。他にも、ノイズおよびアフターパルスが大幅に減少していることが確認された。さらに、MPPC の基礎特性として、その時間分解能を測定した。単一光電子および少数光電子に対して数百 ps の時間分解能が得られ、カロリメータに使用された場合、十分な性能を発揮することが確認された。

今後は、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、カロリメータの現実的なシミュレーションを行い、最終的に Particle Flow Algorithm を用いた際の諸性能の評価を行う。

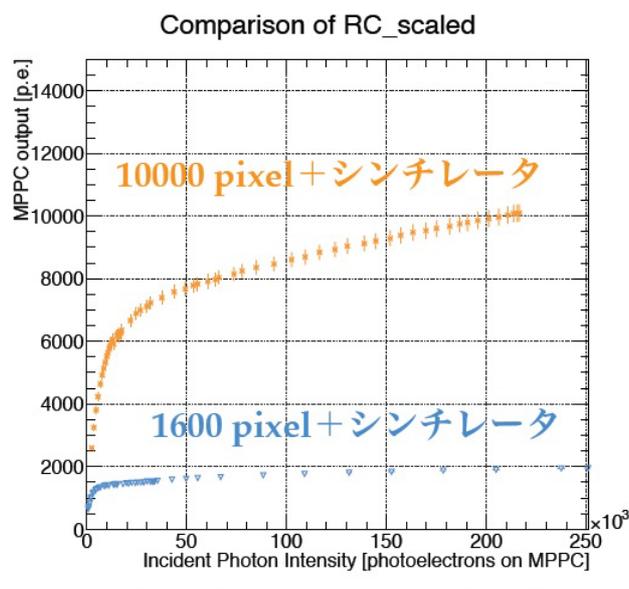


図 17: 新型の MPPC の出力応答の入射光量依存性。10,000 ピクセルでは線形性が大きく向上している。

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

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 Δ 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。

ニュートリノは、三つの異なった質量固有状態が存在し、重いニュートリノ (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2, ν_1) と光子に崩壊し得るが、この過程は、標準模型の枠内では、非常に強く抑制され、寿命は約 10^{43} 年と極めて長い。しかし未発見の右巻き結合の weak boson W_R が存在し、左巻き結合の W_L と混合しているモデルにおいては、現在の W_R の質量下限および W_L との混合角の上限を用いるとこの過程の確率は最大 10^{26} の増幅が得られ、ニュートリノの寿命は 10^{17} 年程度まで短くなる可能性がある。いずれにせよ、このような長寿命のニュートリノの崩壊を観測するには、非常に多くのニュートリノが必要となるため、世代あたり $110/\text{cm}^3$ 程度存在すると予測されている宇宙背景ニュートリノを用いる。

ニュートリノの二体崩壊で生成する光子のエネルギーを $\sim 25\text{ meV}$ とすると背景雑音となる赤外線背景輻射の光子のエネルギースペクトルに対し、ニュートリノ崩壊の信号はそのエネルギーを上限として低エネルギー側のみに裾を引くスペクトル分布として観測される。

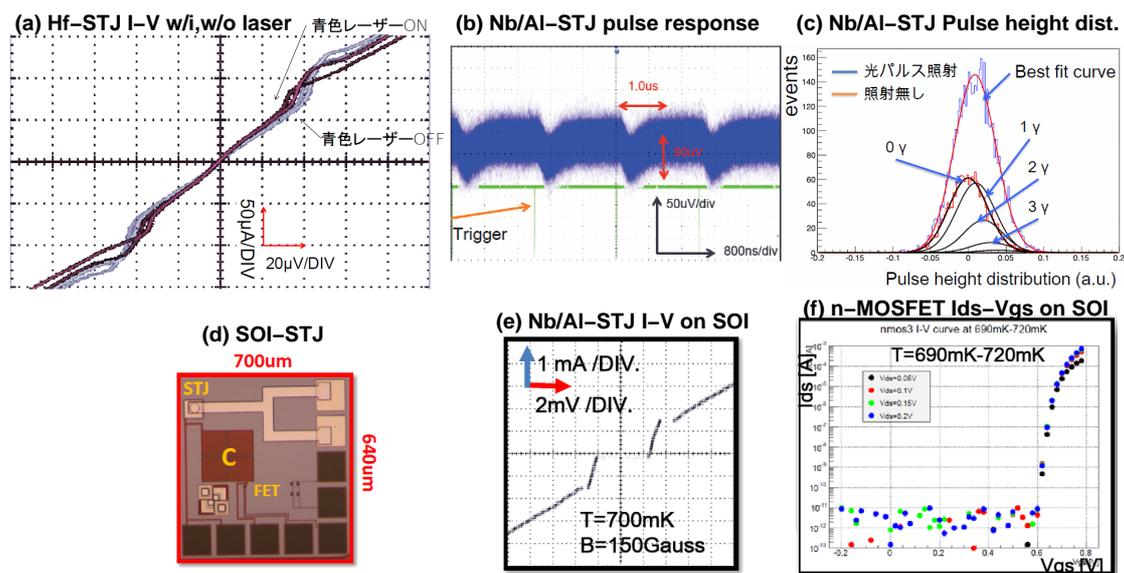


図 18: (a) Hf-STJ 試作サンプルでの可視光入射に対する I-V カーブの応答。可視光入射時にトンネル電流増加を確認。(b) Junction size $4 \mu\text{m}^2$ の Nb/Al-STJ へ可視光 (波長 465 nm) のレーザ光パルス照射したときの STJ 両端電圧の変化。温度は、約 1.8 K。STJ での検出光子数は、約 0.45/光パルス相当。(c) Nb/Al-STJ ($4 \mu\text{m}^2$) へレーザ光パルス (波長 465 nm) を 2 パルス照射した時の STJ 応答パルスを時間積分した量の分布。平均検出光子数 $N_\gamma = 0.93_{-0.14}^{+0.19}$ を得た。(d) SOI 上に形成された $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ Nb/Al-STJ。(e) SOI 上に形成された Nb/Al-STJ の I-V curve。リーク電流は、6 nA 程度であり、シリコン基板上的のものと同等である。(f) SOI 上に Nb/Al-STJ を形成したチップの n-MOSFET の極低温下における $I_{ds}-V_{gs}$ 特性。極低温下においても FET が動作しており、STJ プロセスの際の FET のダメージも見られない。

このような信号に対し感度を持つ検出器として、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 25 meV の光子一つ一つに対して 2% のエネルギー分解能を有する光検出器を提案した。

我々は、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_x-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した。リーク電流が大きいため目標とする検出器として動作させるには、更に改善の必要があるが、可視光に対する光応答のテストを開始し、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) を確認した (図 18 (a))。現在は、Hf-STJ 試作サンプルでのパルス状可視光入射に対するパルス応答の確認を目指している。

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 のギャップエネルギーを考慮すると、我々が目標としている 25 meV の光子に対して Nb/Al-STJ 単体では、十分なエネルギー分解能を得られない。そこで、分光は回折格子を用い Nb/Al-STJ のピクセルをアレイ状に並べ、各 Nb/Al-STJ ピクセルは、一光子計数のみを行わせることによってエネルギースペクトラム測定を行う。

したがって、Nb/Al-STJ に対する要求は、25 meV (波長 50 μm) の一光子を検出することであるが、現在は読み出し系のテストとして、目標よりもエネルギーの高い、可視域、近赤外域の微弱光一光子検出を目指している (図 18 (b)(c))。

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。2013 年度は、Nb/Al-STJ を形成した SOI 基板を極低温まで冷却し、SOI 上の FET、および STJ がそれぞれ動作することを確認した (図 18 (d)(e)(f))。

一光子レベルの可視域微弱パルス光に対する Nb/Al-STJ 応答は確認できたが、現在は読み出し系のノイズが支配的である。STJ・極低温アンプ一体型モジュールとして開発中の SOI-STJ により、読み出し系のノイズが軽減すれば可視光一光子、近赤外光一光子が高い S/N での検出が期待される。

【5】 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

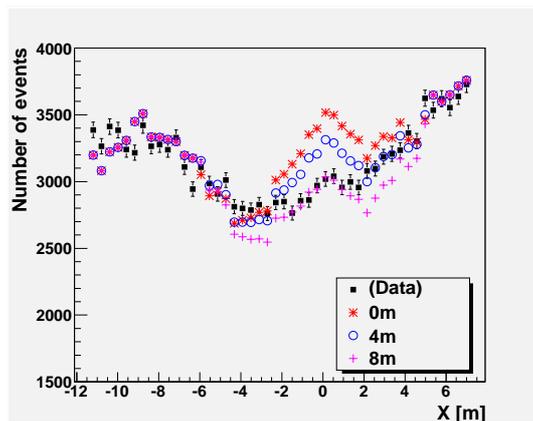


図 19: 燃料格納プール周辺の μ 粒子事象数分布のシミュレーションとの比較。シミュレーションでは燃料集合体の厚さを 0, 4, 8 m の 3 段階で示しているが、幅 6 m に渡り約 6 m から 8 m の厚さで分布していると推算される。

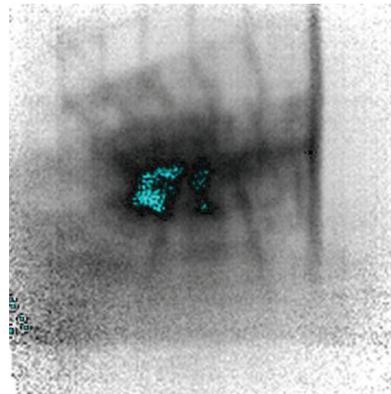


図 20: 観測された原子炉建屋内部のイメージ図全体。濃い領域は物質が多いために μ 粒子が吸収あるいは散乱され通過 μ 粒子数が少ないことを示す。青緑の部分は μ 粒子の減衰が特に大きい高密度な場所を示す。

宇宙線 μ 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 m \times 1 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。

炉心から 64 m 離れた位置で測定を行い、2012 年 7 月末までは核燃料が装填される位置に、2012 年 11 月末までは燃料プールの位置に焦点をあてて 2 地点で μ 粒子の分布を計数し

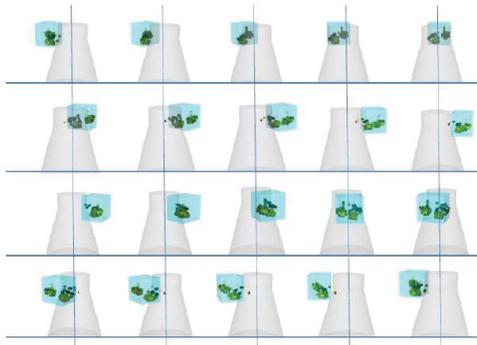


図 21: 3つの地点での観測結果を再構成した核燃料と想定される重い物質、使用済み燃料プール、および格納容器。位置と大きさの特定された使用済み燃料プール（水色）の場所と核燃料（濃い緑色）および原子炉格納容器の外形形状（ねずみ色）を18度ごとの異った視点で再構成した。

た。原子炉構造を再現する GEANT4 シミュレーションとの比較を通じて、測定全期間において、核燃料は装填されていないことを確認し、燃料格納プールに置かれた核燃料集合体の分布 (図 19) を推算した。

さらに 2013 年 7 月から 2013 年 12 月までの後半期においては、もう一台の検出器セットを炉心を中心に約 90 度回転した位置に設置して、これまでの 2 地点での測定に加えることによって、3 方向からのステレオ視での計測を行った。核燃料は、核燃料を保管するコンクリートでできた構造物や格納容器や水などと較べて高い原子番号と比重を持ち、その実効比重も 3 ぐらいで比較的大きく、 μ 粒子の減衰（物体によって吸収あるいは散乱される減少）量が大きくなること、ブロック状に固まって存在することなどから、宇宙線 μ 粒子の減衰が特定の場所で観測されるといった利点を考慮してデータ解析を行った結果、それぞれの観測地点で、原子炉建屋内部について、図 20 に示すようなイメージが得られた。さらに、3 つの地点で観測したデータを用い、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、図 21 に示す通り、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。

この前半期の結果については 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。

【6】 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
17,290 千円（直接経費 13,300 千円，間接経費 3,990 千円）（2013 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
2,080 千円（直接経費 1,600 千円，間接経費 480 千円）（2013 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
1,950 千円（直接経費 1,500 千円，間接経費 450 千円）（2013 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）（2013 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
5,980 千円（直接経費 4,600 千円，間接経費 1,380 千円）（2013 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：4,000 千円，旅費：3,500 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：2,800 千円（素粒子実験グループ向け配分額）

【7】 研究発表

(1) 原著論文

1. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
“Search for a dijet resonance in events with jets and missing transverse energy in $p\bar{p}$

- collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 092004 (2013).
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for the production of ZW and ZZ boson pairs decaying into charged leptons and jets in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 092002 (2013).
 3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Observation of D^0 - \bar{D}^0 Mixing using the CDF II Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 231802 (2013)..
 4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “A Direct Measurement of the Total Decay Width of the Top Quark,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 202001 (2013)..
 5. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Production of K_S^0 , $K^{*\pm}(892)$ and $\phi^0(1020)$ in minimum bias events and K_S^0 and Λ^0 in jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 092005 (2013)..
 6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Evidence for a bottom baryon resonance Λ_b^* in CDF data,”
 Phys. Rev. D **88**, 071101 (2013).
 7. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the leptonic asymmetry in $t\bar{t}$ bar events produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 072003 (2013).
 8. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations],
 “Combination of CDF and D0 W -Boson Mass Measurements,”
 Phys. Rev. D **88**, 052018 (2013).
 9. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Indirect measurement of $\sin^2 \theta_W (M_W)$ using e^+e^- pairs in the Z -boson region with $p\bar{p}$ collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 072002 (2013). [Erratum-ibid. D **88**, 079905 (2013).]

10. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Signature-based search for delayed photons in exclusive photon plus missing transverse energy events from $p\bar{p}$ collisions with $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 031103 (2013).
11. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the Differential Cross Section $d\sigma/d(\cos\theta_t)$ for Top-Quark Pair Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 182002 (2013).
12. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Searches for the Higgs boson decaying to $W^+W^- \rightarrow \ell^+\nu\ell^-\bar{\nu}$ with the CDF II detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 052012 (2013).
13. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Top-quark mass measurement in events with jets and missing transverse energy using the full CDF data set,”
 Phys. Rev. D **88**, 011101 (2013).
14. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the top-quark pair production cross-section in events with two leptons and bottom-quark jets using the full CDF data set,”
 Phys. Rev. D **88**, 091103 (2013).
15. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Exclusion of exotic top-like quarks with $-4/3$ electric charge using jet-charge tagging in single-lepton $t\bar{t}$ events at CDF,”
 Phys. Rev. D **88**, 032003 (2013).
16. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations],
 “Higgs Boson Studies at the Tevatron,”
 Phys. Rev. D **88**, 052014 (2013).
17. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of $R = B(t \rightarrow Wb)/B(t \rightarrow Wq)$ in top-quark-pair decays using lepton+jets events and the full CDF run II dataset,”
 Phys. Rev. D **87**, 111101 (2013).

18. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the cross section for direct-photon production in association with a heavy quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 042003 (2013).
19. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for Pair Production of Strongly Interacting Particles Decaying to Pairs of Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 031802 (2013).
20. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for Supersymmetry with Like-Sign Lepton-Tau Events at CDF,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 201802 (2013).
21. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B_d \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with the full CDF Run II data set,”
 Phys. Rev. D **87**, 072003 (2013).
22. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Combination of searches for the Higgs boson using the full CDF data set,”
 Phys. Rev. D **88**, 052013 (2013).
23. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Updated search for the standard model Higgs boson in events with jets and missing transverse energy using the full CDF data set,”
 Phys. Rev. D **87**, 052008 (2013).
24. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the cross section for prompt isolated diphoton production using the full CDF Run II data sample,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 101801 (2013).
25. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for a two-Higgs-boson doublet using a simplified model in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 121801 (2013).
26. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Search for Resonant Top-Antitop Production in the Lepton Plus Jets Decay Mode Using the Full CDF Data Set,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 121802 (2013).
27. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of W -Boson Polarization in Top-quark Decay using the Full CDF Run II Data Set,”
 Phys. Rev. D **87**, 031104 (2013).
28. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the top quark forward-backward production asymmetry and its dependence on event kinematic properties,”
 Phys. Rev. D **87**, 092002 (2013).
29. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the mass difference between top and antitop quarks,”
 Phys. Rev. D **87**, 052013 (2013).
30. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the B_c^- meson lifetime in the decay $B_c^- \rightarrow J/\psi \pi^-$,”
 Phys. Rev. D **87**, 011101 (2013).
31. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Observation of the Production of a W Boson in Association with a Single Charm Quark,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 071801 (2013).
32. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for the Higgs boson in the all-hadronic final state using the full CDF data set,”
 JHEP **1302**, 004 (2013).
33. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “ W boson polarization measurement in the $t\bar{t}$ dilepton channel using the CDF II Detector,”
 Phys. Lett. B **722**, 48 (2013).
34. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for long-lived stopped R-hadrons decaying out-of-time with pp collisions using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 112003 (2013).

35. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for charginos nearly mass-degenerate with the lightest neutralino based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 112006 (2013).
36. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for microscopic black holes in a like-sign dimuon final state using large track multiplicity with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 072001 (2013).
37. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct third-generation squark pair production in final states with missing transverse momentum and two b -jets in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 JHEP **1310**, 189 (2013).
38. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, 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).
39. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for excited electrons and muons in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,”
 New J. Phys. **15**, 093011 (2013).
40. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Dynamics of isolated-photon plus jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Nucl. Phys. B **875**, 483 (2013).
41. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of top quark polarization in top-antitop events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 232002 (2013).
42. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of jet shapes in top-quark pair events at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2676 (2013).
43. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top quark charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1311**, 031 (2013).

44. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data,”
 Phys. Lett. B **726**, 120 (2013).
45. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, 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).
46. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the differential cross-section of B^+ meson production in pp collisions
 at $\sqrt{s} = 7$ TeV at ATLAS,”
 JHEP **1310**, 042 (2013).
47. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the Azimuthal Angle Dependence of Inclusive Jet Yields in Pb+Pb
 Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. Lett. **111**, 152301 (2013).
48. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Performance of jet substructure techniques for large- R jets in proton-proton collisions
 at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 JHEP **1309**, 076 (2013).
49. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the high-mass Drell–Yan differential cross-section in pp collisions
 at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **725**, 223 (2013).
50. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the distributions of event-by-event flow harmonics in lead-lead
 collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 JHEP **1311**, 183 (2013).
51. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $t\bar{t}$ resonances in the lepton plus jets final state with ATLAS using 4.7 fb^{-1}
 of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Phys. Rev. D **88**, 012004 (2013).
52. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Triggers for displaced decays of long-lived neutral particles in the ATLAS detector,”
 JINST **8**, P07015 (2013).
53. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for resonant diboson production in the $WW/WZ \rightarrow \ell\nu jj$ decay channels
 with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Phys. Rev. D **87**, 112006 (2013).

54. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the production cross section of jets in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1307**, 032 (2013).
55. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for nonpointing photons in the diphoton and E_T^{miss} final state in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 012001 (2013).
56. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the inclusive jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV and comparison to the inclusive jet cross section at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2509 (2013).
57. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement with the ATLAS detector of multi-particle azimuthal correlations in p +Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV,”
 Phys. Lett. B **725**, 60 (2013).
58. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for third generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1306**, 033 (2013).
59. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Characterisation and mitigation of beam-induced backgrounds observed in the ATLAS detector during the 2011 proton-proton run,”
 JINST **8**, P07004 (2013).
60. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for WH production with a light Higgs boson decaying to prompt electron-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 New J. Phys. **15**, 043009 (2013).
61. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Improved luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2518 (2013).
62. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a light charged Higgs boson in the decay channel $H^+ \rightarrow c\bar{s}$ in $t\bar{t}$ events using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2465 (2013).
63. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the cross-section for W boson production in association with b -jets

in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1306**, 084 (2013).

64. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of k_T splitting scales in $W \rightarrow \ell\nu$ events at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **73**, 2432 (2013).
65. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
Phys. Rev. D **87**, 112003 (2013).
66. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of hard double-parton interactions in $W(\rightarrow l\nu)+ 2$ jet events at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
New J. Phys. **15**, 033038 (2013).
67. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for long-lived, multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **722**, 305 (2013).
68. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for single b^* -quark production with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
Phys. Lett. B **721**, 171 (2013).
69. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Multi-channel search for squarks and gluinos in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **73**, 2362 (2013).
70. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“A search for prompt lepton-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **719**, 299 (2013).
71. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Observation of Associated Near-side and Away-side Long-range Correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Proton-lead Collisions with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **110**, 182302 (2013).
72. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for charged Higgs bosons through the violation of lepton universality in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment,”
JHEP **1303**, 076 (2013).

73. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a heavy narrow resonance decaying to $e\mu$, $e\tau$, or $\mu\tau$ with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC,”
 Phys. Lett. B **723**, 15 (2013).
74. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of Upsilon production in 7 TeV pp collisions at ATLAS,”
 Phys. Rev. D **87**, 052004 (2013).
75. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the tau+jets channel using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2328 (2013).
76. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the neutral Higgs bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1302**, 095 (2013).
77. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of angular correlations in Drell-Yan lepton pairs to probe Z/γ^* boson transverse momentum at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **720**, 32 (2013).
78. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in events with three charged leptons at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **87**, 052002 (2013).
79. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and $ZZ\gamma$ couplings with the ATLAS detector,”
 JHEP **1303**, 128 (2013).
80. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for resonances decaying into top-quark pairs using fully hadronic decays in pp collisions with ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 JHEP **1301**, 116 (2013).
81. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of isolated-photon pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1301**, 086 (2013).
82. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Searches for heavy long-lived sleptons and R-Hadrons with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Phys. Lett. B **720**, 277 (2013).

83. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for supersymmetry in events with photons, bottom quarks, and missing transverse momentum in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **719**, 261 (2013).
84. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for contact interactions and large extra dimensions in dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **87**, 015010 (2013).
85. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Extra Dimensions in diphoton events using proton-proton collisions recorded at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 New J. Phys. **15**, 043007 (2013).
86. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for long-lived, heavy particles in final states with a muon and multi-track displaced vertex in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **719**, 280 (2013).
87. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **719**, 242 (2013).
88. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of Z boson Production in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 022301 (2013).
89. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Jet energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV recorded in 2010 with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2306 (2013).
90. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for pair production of heavy top-like quarks decaying to a high- p_T W boson and a b quark in the lepton plus jets final state at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **718**, 1284 (2013).
91. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for pair-produced massive coloured scalars in four-jet final states with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2263 (2013).

92. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a jet and missing transverse momentum with the ATLAS detector,”
 JHEP **1304**, 075 (2013).
93. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of W^+W^- production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous WWZ and $WW\gamma$ couplings,”
 Phys. Rev. D **87**, 112001 (2013). [Erratum-ibid. D **88**, 079906 (2013).]
94. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct chargino production in anomaly-mediated supersymmetry breaking models based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1301**, 131 (2013).
95. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 JHEP **1301**, 029 (2013).
96. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the flavour composition of dijet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2301 (2013).
97. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for displaced muonic lepton jets from light Higgs boson decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **721**, 32 (2013).
98. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a photon and missing transverse momentum in pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. Lett. **110**, 011802 (2013).
99. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for light top squark pair production in final states with leptons and b -jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions,”
 Phys. Lett. B **720**, 13 (2013).
100. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **718**, 841 (2013).

101. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct slepton and gaugino production in final states with two leptons and missing transverse momentum with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Phys. Lett. B **718**, 879 (2013).
102. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in the $WW \rightarrow \ell\nu\ell'\nu'$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **718**, 860 (2013).
103. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the jet radius and transverse momentum dependence of inclusive jet suppression in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **719**, 220 (2013).
104. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, 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 4.7 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collision data,”
 Phys. Rev. D **87**, 012008 (2013).
105. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of charged-particle event shape variables in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton interactions with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **88**, 032004 (2013).
106. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of top quark pair relative differential cross-sections with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2261 (2013).
107. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the Λ_b lifetime and mass in the ATLAS experiment,”
 Phys. Rev. D **87**, 032002 (2013).
108. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Single hadron response measurement and calorimeter jet energy scale uncertainty with the ATLAS detector at the LHC,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2305 (2013).
109. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **73**, 2304 (2013).
110. S. Gonzalez-Sevilla, K. Hara *et al.*,
 “A double-sided silicon micro-strip Super-Module for the ATLAS Inner Detector

upgrade in the High-Luminosity LHC”,
JINST 9 P02003 (2014).

111. G. Barbier, K. Hara *et al.*,
“Mechanical studies towards a silicon micro-strip super module for the ATLAS inner detector upgrade at the high luminosity LHC”,
JINST 9 P04018 (2014).
112. T. Miyoshi, K. Hara *et al.*,
“Monolithic pixel detectors with 0.2 um FD-SOI pixel process technology”,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A732, 540-534 (2013).
113. T. Kubota, K. Hara *et al.*,
“Beam test of novel n-in-p strip sensors for high radiation environment”,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A731, 247-251 (2013) .
114. Y. Unno, K. Hara *et al.*,
“Evaluation of test structures for the novel n-in-p pixel and strip sensors for very high radiation environments”,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A731, 183-188 (2013) .
115. K. Hara and Y. Ikegami,
“Silicon strip detectors for ATLAS at the HL-LHC upgrade”,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A731 242-246, (2013).
116. H. Fujii, K. Hara, S.H. Kim *et al.*,
“Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant”,
Prog. Theor. Exp. Phys. 073C01 (2013).

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 金信弘：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索，
研究会「ニュートリノフロンティアの融合と進化」（2013年4月21日），東京大学理学部1号館小柴ホール。
2. 佐藤構二：CDF 実験でのヒッグス粒子の研究
日本物理学会 2013 年会秋季大会（2013 年 9 月 20 日-23 日），高知大学朝倉キャンパス。
3. 木内健司：LHC-ATLAS 実験における $ZH \rightarrow \nu\nu bb$ 過程を用いた標準模型ヒッグス粒子の探索
日本物理学会 2013 年会秋季大会（2013 年 9 月 20 日-23 日），高知大学朝倉キャンパス。
4. 萩原睦人：n-in-p 型 Pixel 検出器のビーム試験による性能評価
日本物理学会 2013 年会秋季大会（2013 年 9 月 20 日-23 日），高知大学朝倉キャンパス。
5. 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 2013 年会秋季大会（2013 年 9 月 20 日-23 日），高知大学朝倉キャンパス。

6. 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，
日本物理学会 2013 年秋季大会（2013 年 9 月 20 日–23 日），高知大学朝倉キャンパス.
7. 笠原宏太：ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための SOI-STJ の研究開発，
日本物理学会 2013 年秋季大会（2013 年 9 月 20 日–23 日），高知大学朝倉キャンパス.
8. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験設計と検出器開発，
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会（2013 年 12 月 7–8 日），東京都府中市クロス・ウェーブ府中.
9. 笠原宏太：SOI-STJ 検出器開発，
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会（2013 年 12 月 7–8 日），東京都府中市クロス・ウェーブ府中.
10. 奥平琢也：Nb/Al-STJ、Hf-STJ 検出器開発，
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会（2013 年 12 月 7–8 日），東京都府中市クロス・ウェーブ府中.
11. 萩原睦人：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
日本物理学会第 69 回年次大会（2014 年 3 月 27 日–30 日），東海大学湘南キャンパス.
12. 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
(III)
日本物理学会第 69 回年次大会（2014 年 3 月 27 日–30 日），東海大学湘南キャンパス.
13. 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 IV，
日本物理学会第 69 回年次大会（2014 年 3 月 27 日–30 日），東海大学湘南キャンパス.
14. 笠原宏太：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
II，
日本物理学会第 69 回年次大会（2014 年 3 月 27 日–30 日），東海大学湘南キャンパス.
15. 受川史彦：筑波大学朝永記念室の現状
日本物理学会第 69 回年次大会（2014 年 3 月 27 日–30 日），東海大学湘南キャンパス.

(3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. K. Hara *et al.*, “Development of SOI cryogenic far-infrared photon detector (Nb/Al-STJ) for neutrino mass measurement”,
SOI Collaboration Workshop, May 6, 2013, Krakow, Poland.
2. K. Sato, “Studies of the Higgs boson at the Tevatron,”
25th Recontres de Blois, Particle Physics and Cosmology, May 26 - 31, 2013, Blois, France.
3. K. Sato, “Higgs boson physics at the Tevatron,”
Recontres du Vietnam, Windows on the Universe, August 11 - 17, 2013, Quy Nhon, Vietnam.

4. K. Hara *et al.*, “Total Ionization Effects in Double SOI Sensor”,
IEEE NS Symposium, Oct 31, 2013, Seoul, Korea.
5. S. Kim: “Search for Cosmic Background Neutrino Decay”,
12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.
6. Y. Takeuchi: “Search for Cosmic Background Neutrino Decay with STJ detectors”,
Microwave Kinetic Inductance Detectors and Cosmology, August 26–27, 2013, Fer-
milab, Batavia, IL, USA

(4) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. M. Konuma, K. Kanaya, F. Ukegawa *et al.*, “The Legacy of Hideki Yukawa, Sin-itiro
Tomonaga, and Shoichi Sakata: Some Aspects from their Archives”,
12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.
2. Y. Takaiwa, K. Kanaya, F. Ukegawa *et al.*, “Memorial Archival Libraries of Yukawa,
Tomonaga, and Sakata”,
12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.
3. Y. Takeuchi: “Search for Cosmic Background Neutrino Decay”,
International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB2013), June 10–
14, 2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST),
Okinawa, Japan.
4. K. Kasahara: “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector
on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Background
Neutrino”,
International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB2013), June 10–
14, 2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST),
Okinawa, Japan.
5. T. Okudaira: “Development of Nb/Al superconducting tunnel junction detector of
a single infrared photon to search for radiative decay of the cosmic background
neutrinos”,
International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB2013), June 10–
14, 2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST),
Okinawa, Japan.
6. S. Kim: “Search for Cosmic Background Neutrino Decay with STJ detectors”,
SPICA International Conference 2013, June 18–21, 2013, University of Tokyo, Tokyo,
Japan.

(5) 会議・研究会報告書

1. S. Honda, K. Hara *et al.*, “Total Ionization Effects in Double SOI Sensor”,
IEEE Nucl. Sci. Symp., Oct 31, 2013, Seoul, Korea.

2. S. Kim *et al.* : "Search for Cosmic Background Neutrino Decay",
JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014), Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics
Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.
3. M. Konuma, K. Kanaya, F. Ukegawa *et al.*, "The Legacy of Hideki Yukawa, Sin-itiro
Tomonaga, and Shoichi Sakata: Some Aspects from their Archives",
JPS Conf. Proc. 1, 013009 (2014), Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics
Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.
4. Y. Takaiwa, K. Kanaya, F. Ukegawa *et al.*, "Memorial Archival Libraries of Yukawa,
Tomonaga, and Sakata",
JPS Conf. Proc. 1, 019005 (2014), Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics
Conference (APPC12), July 14–19, 2013, Chiba, Japan.

(6) 学位論文

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, 2014年2月。

1. 伊藤史哲：ミューオン・ラジオグラフィック・システムを用いた原子炉内部構造測定
2. 笠原宏太：ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための SOI-STJ 一体型検出器の開発研究

【構成員の異動】

2014年2月に武政健一が研究員として着任。

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
研究員	Alexander Wagner (センター) 石山 智明 (HPCI 戦略プログラム) 長谷川 賢二 (HPCI 戦略プログラム) 行方 大輔 (エクサ FS) 澁谷 隆俊 (基盤 A)
学生	大学院生 14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、ダークマターハローのコア-カスプ問題、アンドロメダの涙とさざめきの研究、銀河ハロー中を漂う巨大ブラックホールへのガス降着とその広波長域放射、輻射流体計算による第一世代星形成、原始銀河形成と宇宙再電離、AGNの輻射にさらされた分子雲の進化、一般相対論的 N 体計算による巨大ブラックホール合体過程、電波銀河 Hydra A の Radio モードフィードバック、超新星残骸 1987A の電波放射のモデル化、「京」を用いた宇宙ダークマターシミュレーション、Vlasov-Poisson 方程式を用いた大規模構造形成におけるニュートリノの数値シミュレーション、を推進した。また、GPU を用いた輻射輸送・輻射流体シミュレーションコードの開発を行った。さらに、観測との共同研究としてハッブル宇宙望遠鏡による高解像画像を用いた LAE の形態研究 LAE のガス速度構造の研究を行った。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と光不斉化の理論的研究、系外惑星における光合成アンテナ機構の研究を推進した。

3. 研究成果

【1】ダークマターハローの内部構造：コア-カスプ問題

宇宙の構造形成のパラダイム、コールドダークマター(CDM)シナリオは、N 体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カスプ)構造を予言する(Navarro, Frenk & White 1997; Fukushige & Makino 1997)。しかし、その観測結果によると、矮小銀河の密度は中心部で発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている (Swaters et al. 2003; Spekkens et al. 2005; Oh et al. 2010)。この理論と観測の不一致は“コア-カスプ問題”と呼ばれ、CDM シナリオの未解決問題の一つである。今回我々は、“超新星爆発により矮小銀河内のガスが加熱・膨張し、やがて放射冷却・収縮が起こり再び星形成が起こる、という一連の過程の繰り返しの重力場変動によりカスプがコアへと遷移するか”を N 体シミュレーションを用いて調べた。ここでバリオンの重力場は周期的に時間変化する外場によって表現した。その結果バリオンの重力場変動の時間スケールに依存して DM ハローに形成されるコアの大きさや位置が大きく変化する事がわか

った。また、DM ハローの粒子群と外場間で起こる共鳴的な現象に対する解析的なモデルを構築した。この共鳴モデルによって、コア半径が重力場の時間変動周期と関係があることを突き止めた。また、銀河の形成時期とコア部分の密度との関係を導き出した。

【2】アンドロメダの涙とさざめき

近年、ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡に代表される地上大型望遠鏡を最大限活用した近傍の深宇宙探査により、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。アンドロメダ銀河周辺においては、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シェル等の痕跡が続々と明らかにされてきている。特にアンドロメダの涙（アンドロメダストリーム）に関しては、観測・理論の両面からの研究が進んできており、銀河衝突の際の軌道運動やその時期、衝突した銀河の質量や化学組成等について理解が進んできている。我々は、N 体計算と 3 次元の流体力学計算を組み合わせたハイブリッドシミュレーションにより、アンドロメダ銀河の円盤ガスと矮小銀河に付随するガスの流体力学的な相互作用の詳細について調べた。銀河円盤ガスと矮小銀河ガスの相互作用により発生する銀河円盤ガスの流体力学的な挙動と、アンドロメダの円盤ガスで観測されているリング状構造の生成過程について詳細な解析を行った。また、矮小銀河の軌道運動の初期条件依存性について大規模パラメータサーベイを行い、観測を再現する軌道要素を求めた。

【3】銀河ハロー中を漂う巨大ブラックホールへのガス降着とその広波長域放射

各銀河はそれぞれの中心に巨大ブラックホールを宿す。また、銀河は周辺の銀河と衝突・合体し、吸収合併する事でその質量を成長させてきたと考えられる。これらの事から、銀河衝突により衛星銀河が壊された後しばらくの間、元衛星銀河の中心巨大ブラックホールが親銀河のハロー中を漂っていると期待される。隣の銀河であるアンドロメダ銀河は、この銀河衝突による銀河とブラックホールの共進化を理論と観測の両面から理解する上で、最上の実験場である。詳細な観測と数値実験の比較により、約 10 億年昔に衛星銀河が衝突し、今現在、元衛星銀河の破片がアンドロメダ銀河周辺に痕跡として残っている事がわかっている。この元衛星銀河の中心巨大ブラックホールが、ハローの希薄ガスを Bondi 降着により吸い込む時に形成される降着円盤の広波長域放射を計算した。様々な検出装置の感度と比較したところ、SKA や EVLA, ALMA 等の電波領域の既存装置で検出可能である事がわかった。

【4】輻射流体計算による第一世代星形成

京コンピュータを用いて宇宙論的流体計算を実行する事で多数の第一世代ハローを形成し、その後それぞれのハローについて 3 次元輻射流体計算を実行する事で、初代星の形成過程の解明を試みた。その結果、一つのハロー内でも星周円盤の分裂によって複数の初代星が形成されうる事、初代星の質量は典型的に 10-100 太陽質量程度となり、数割合は多くないが太陽質量オーダーの初代星や、100 太陽質量を超える大質量の初代星も形成される事を明らかにした。また、初代星の質量、分裂頻度は、母ハロー中心部のガスの角運動量と強い相関がある事もわかった。得られた初代星の質量

関数を軽い方に 0.2dex シフトさせた場合に予想されるレムナントのアバundanceパターンは、銀河ハロー金属欠乏星のそれとよく一致する。これは、シミュレーション結果は、数値計算分解能の不足などの理由から、初代星初期質量関数上限値となっている事に起因していると予想される(Susa, Hasegawa, Tominaga submitted to ApJ)。

【5】原始銀河形成と宇宙再電離

宇宙は赤方偏移 $z=1000$ 程度で一度中性化し、その後形成された天体からの輻射によって再び電離が起こり、現在の宇宙はほぼ完全電離状態である事が知られている。しかし、この宇宙再電離が「いつ」「どの天体によって」「どのように」引き起こされたかは未だ明らかにされていない。

そこで、我々は独自に開発したツリー構造を用いて高速に輻射輸送計算を行えるスキーム START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer) (Hasegawa & Umemura 2010)を宇宙論的輻射流体計算に対応できるように拡張し、これを用いて宇宙再電離シミュレーションを行った。その結果、宇宙の星形成史は主に光加熱効果によって著しく阻害される事を示した(Hasegawa & Semelin 2013)。また、再電離過程にとって重要な鍵となる電離光子の銀河からの脱出割合は、紫外線のフィードバックで高密度領域がならされる事によって上昇する事も分かった(Umemura et al. 2012)。シミュレーションから得られた UV 光度関数は、 $z=6-8$ で観測可能な MUV = -18 等より明るい銀河の光度関数と矛盾しない。さらに、紫外線による銀河形成過程阻害を受けつつも、未だ見えない暗い銀河が多数存在する事も明らかになり、これら低光度銀河は数が多い事、電離光子脱出確率が高い事から再電離における主要な電離光子源となっている事も明らかにした。

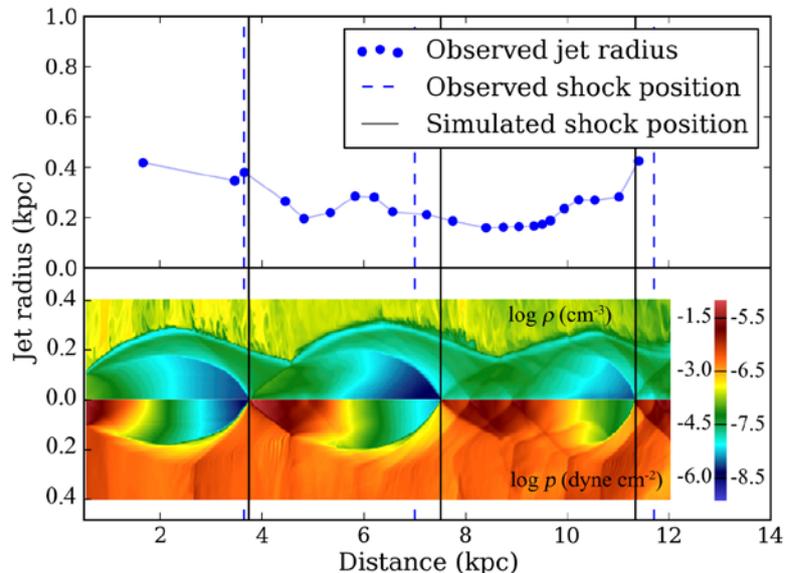
【6】AGN の輻射にさらされた分子雲の進化

活動銀河核(AGN)は、宇宙で最も明るい天体の 1 つであり、その光度は銀河本体に匹敵する。光の大部分は、電離能力を持った紫外光、及び、X 線の波長帯で放射されるため、母銀河の進化に大きな影響を与えたと一般に考えられている。しかし、AGN の活動性の詳細がどのように決定されるかは明らかでない。本研究では、AGN 現象の持続性の理解を進めることを目的として、ガス供給に重要な役割を果たすと期待される光学的に厚い分子雲の 1 次元及び 3 次元輻射流体計算を行った。その結果、電離パラメータと呼応学的厚みに応じて、分子雲の進化は光蒸発駆動型(I)と輻射圧駆動型(II)に大別できることがわかった。与えられた電離パラメータに対し、光学的厚みが小さい場合は I 型の進化を示し、光学的厚みが十分に大きい場合は II 型の進化を示す。I 型の場合、球対称的な光蒸発によって質量を失いながら、その反作用による圧力で、分子雲の一部が重力崩壊に至る。一方、II 型の場合、輻射圧が光蒸発流を分子雲表面に閉じ込めながら、質量をほとんど失わずに分子雲を押しつぶし、最終的には分子雲の一部を重力崩壊させることがわかった。分子雲の寿命は被照射面で発生する衝撃波の速度と分子雲のサイズで決定される。我々は 1 次元輻射流体計算により、広い範囲の電離パラメータと光学的厚みについて、分子雲の寿命を測定した。この結果に基づくと、もし AGN トーラスが非常に volume filling factor の小さいクランピー構造をしているとすれば、トーラス表層のガスクランプはトーラスの力学的時間に比べて非常に短い時間で破壊されることが予想される。

【7】一般相対論的N体計算による巨大ブラックホール合体過程

巨大ブラックホールは銀河中心に観測され、ブラックホール質量は銀河バルジ質量の約 1/1000 になっているという“ブラックホール-バルジ質量関係”が見出されている (Kormendy & Richstone 1995; Magorrian et al. 1998; Merrifield et al. 2000; Merritt & Ferrarese 2001, Marconi & Hunt 2003)。これは、巨大ブラックホール形成が、銀河バルジ形成史と密接に関係し、ブラックホール質量を決める普遍的な物理メカニズムが存在したことを示唆する。宇宙の階層的な天体形成論に従えば、大きな銀河は小銀河の集合体として生まれることになり、大きな銀河には多数の巨大ブラックホールが存在することになる。これは、銀河の中心にブラックホール-バルジ質量関係を満たす巨大ブラックホールが一つあるという観測事実を説明できない。可能性の一つは、銀河が合体した際に、ブラックホールも全て合体して、銀河中心に落ちるといったものである。しかし、これまで巨大ブラックホールの合体は極めて難しいとされてきた。我々は、ブラックホールを持つ銀河が合体した後、ブラックホール合体が起こるかという問題を、一般相対論効果を入れた高精度N体計算により調べた。銀河バルジの中に10個の巨大ブラックホールを置いて計算した結果、銀河中の星密度が高い場合には、星による力学的摩擦が有効に働き、ブラックホールは銀河中心に落ちることで多重散乱を繰り返し、連ブラックホールが生まれ、連ブラックホールは他のブラックホールとの散乱の結果、重力波を放出して合体することが分かった。そして、赤方偏移 $z=7$ のライマンアルファ・エミッターで、ブラックホール合体過程が起こっている可能性を示した (Tanikawa & Umemura 2014)。

【8】The Radio Mode Feedback in Hydra A

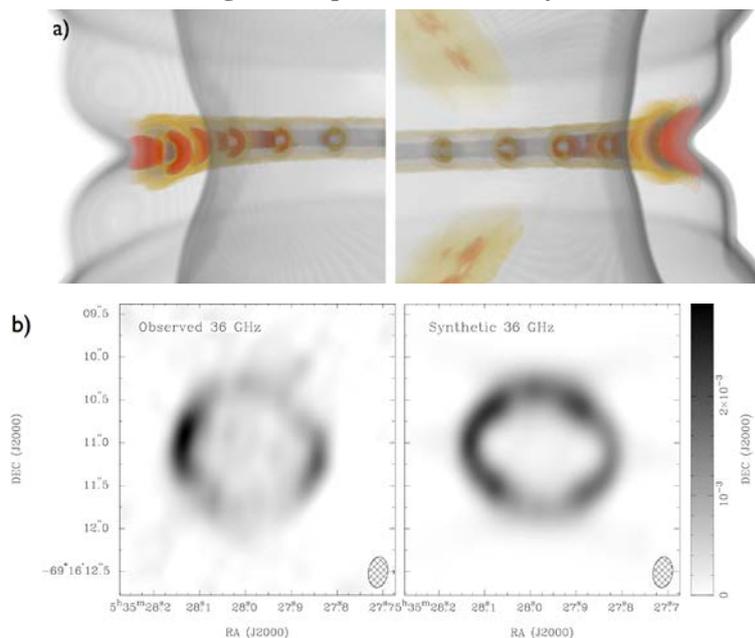


Together with collaborators at the Australian National University (Mohammad Ali Nawaz, Geoffrey Bicknell) and the University of Waterloo (Brian McNamara) we have begun a detailed study of the famous cool-core radio galaxy Hydra A to understand the heating and mixing processes involved in radio-mode feedback on cluster scales. From existing data, we

have made accurate measurements of the hot ICM structure and the jet power using synchrotron minimum energy calculations. We then created realistic 2.5D relativistic hydrodynamic models with the PLUTO code for the inner 30 kpc of the radio source, focusing on the correct reproduction of conical reconfinement shocks and Mach disks. This procedure yields very accurate estimates of jet parameters, especially the jet radius, velocity, pressure, constitution, and amount of entrainment. We have also embarked upon creating. A paper has been submitted, and is under revision, summarizing the results of the first stage of this work. (Fig: hydra_a_shocks.png. Hydrodynamic model of the jet stream, with comparison to observations of the jet radius and reconfinement shock locations.)

【 9 】 Modeling the Radio emission of Supernova Remnant 1987A

In a project led by collaborator Toby Potter (University of Western Australia), we modeled the time-dependent radio emission of supernova remnant 1987A from days 820 to 10,000 since the explosion. Following a thorough examination of the ambient ISM density structure involving a blue supergiant wind, an HII region, and equatorial clouds, a realistic 3-dimensional hydrodynamic model of the supernova expansion was performed with the FLASH code. The synchrotron emission from accelerated cosmic-ray electrons was calculated by incorporating a shock detection algorithm and advecting a non-thermal particle distribution at every shock in a semi-analytic post-process calculation involving diffusive shock acceleration and magnetic field amplification. The resulting synthetic radio data are directly compared with observations and shown to reproduce the global asymmetric structure and the equatorial bright ring of emission. A paper has been submitted and accepted with minor revisions pending. (Fig: vol_obs_synth.png. Left: Volume render of the equatorial ring-like radio emission after the interaction with dense clouds. Right: Comparison between synthetic and observed radio data.)



【10】「京」を用いたダークマターシミュレーション

平成25年度は、主として2つの質的に異なる世界最大規模のシミュレーションを行った。図1の左パネルは現在の宇宙の大規模構造を、5500億のダークマター粒子を用いてシミュレーションしたものである。右パネルは宇宙初期に形成するダークマター構造を690億粒子でシミュレーションしたものである。いずれも、それぞれのスケールのシミュレーションでは世界最大規模である。

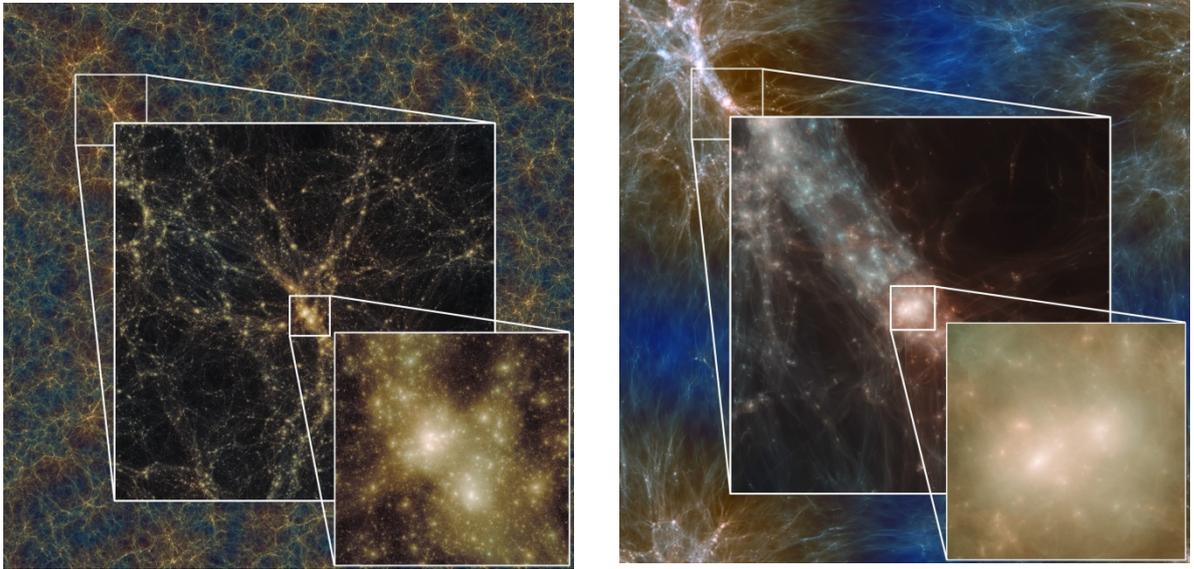


図1: 京による世界最大規模のダークマターシミュレーション。左パネルは、現在の宇宙の大規模構造を5500億粒子を用いてシミュレーションしたものであり、およそ50億光年にわたる空間の銀河分布を再現している。白枠内は拡大図であり、右下のパネルは銀河団サイズ(約 10^{15} 太陽質量)のハローである。右パネルは、宇宙初期に形成するダークマター構造を690億粒子を用いてシミュレーションしたものである。宇宙誕生からおおよそ1億年後の宇宙であり、右下のパネルは約 10^3 太陽質量のハローである

両者は似ているが、いくつか大きな違いがあることがわかる。宇宙初期に形成するダークマター構造は、現在に比べ滑らかな構造を示していることがわかる。フィラメント構造の中や、ハロー周囲に存在する小さいハローの数が少ないこともわかる。以下それぞれのシミュレーションについて述べる。

(i) 宇宙の大規模構造形成

図1の左パネルに対応するシミュレーションについての成果について述べる。5500億ダークマター粒子の重力進化を、一片およそ50億光年の領域で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。シミュレーションデータは解析中であるが、以下に述べるように研究できるようになる。

ダークマターハローはそのスケールに対応する様々な天体を宿す。例えば我々の銀河系をはじめとするさまざまな銀河は 10^{11-12} 太陽質量程度のハローの中に含まれていると考えられている。また銀河団は 10^{14-15} 、矮小銀河は 10^6-10 、初代星は 10^5-7 太陽質量程度のハローに存在していると考えら

れている。銀河中心には超巨大ブラックホールが存在し、銀河によってはガスをまとい、活動銀河核として明るく輝いている。超巨大ブラックホールの質量は、銀河のバルジの質量と良く相関しており、ブラックホールと銀河の共進化を示唆しているが、その形成、進化過程は謎に包まれている。

このシミュレーションと、準解析的銀河形成モデルという現象論的なモデルを組み合わせることで、シミュレーションでは直接追っていない、バリオン成分の進化を追うことが可能である。シミュレーション上では、(離散化された)ダークマター粒子の数千〜数万ステップの進化を追っている。各シミュレーション時刻においては、数十〜数千万粒子で構成されるハローが無数に存在している。シミュレーションのスナップショットを 50〜100 程度の時刻で保存しておき、まずそれぞれのスナップショットでハローを検出する(このシミュレーションでは現在の宇宙でおおよそ数億のハローが検出される)。次に時刻間で同じハローを結び付け、宇宙初期から現在までの個々のハローの形成史を構築する。

ここから先が準解析的銀河形成モデルの出番である。バリオンはおおよそハローの中で進化していくので、各時刻で得られたハローの形成史をもとに、現象論的なモデルを用いて、個々のハローでできる銀河やブラックホールの性質を理論的に予言することができる。特に高赤方偏移における銀河に存在する活動銀河核は非常に稀な天体である。これまで世界で行われてきたシミュレーションでは、活動銀河核を宿す銀河の階層的構造を追うだけの分解能、または稀な天体が形成できるだけのシミュレーション体積のどちらかが不足していた。今回「京」コンピュータを用いることで、はじめて両方の条件を満たすことが可能となった。そしてすばる望遠鏡の Hyper-Sprme-Cam によって今後数年間にわたって得られる、高赤方偏移の最新の観測データと直接比較できるような広大な領域にかけて、銀河とブラックホールの分布両方を予測することができるようになり、共進化過程の解明への手がかりなどが得られるようになった。

平成 25 年度中にシミュレーション、およびハロー検出は終了した。平成 26 年度中に、ハロー合体史を構築し、準解析的銀河形成モデルによる銀河+ブラックホールの模擬カタログを構築する予定である。

(ii) 最小スケールからはじまるダークマター構造形成

最小ハロー(地球質量)は中心の密度構造が、半径の -1.5 乗程度のべきに比例する急なカスプ構造をもつことが知られている。一方、銀河スケールや銀河団スケールのような大きいハローでは、 -1.0 乗程度のべきである。この違いが起因する物理メカニズムははっきりとはわかっていない。

この問題を明らかにするためには、最小ハローが合体してできるそれより大きいハローがどのような構造であるかを調べるのが、手掛かりとなりそうである。最終的な目標は、粒子数 5500 億、領域 800pc 程度のシミュレーションを実行し、太陽質量(10^6 地球質量)程度のハローの構造を調べることである。平成 25 年度は、予備計算として粒子数 690 億、領域 200-400pc の宇宙論的 N 体シミュレーションを実行し(図 1 右)、数百地球質量程度のハローまでの構造を調べた。予備計算ではあるが、このスケールのハローの構造を分解するシミュレーションとしては、世界最大のものである。

今回のシミュレーションで得られた、それらが合体してできるハローはべきが -1.5 より浅く、50 地球質量程度のハローでは -1.3 程度になることがわかった。ハロー質量が大きくなるほど、よ

りべきが浅くなる傾向にある (図 2)。より大きい銀河スケール以上のハロー(1015-21 地球質量)では、ハローのスケールによらず、べきが-1 程度になることが良く研究されており、地球質量を含むそれ以外のスケールでもそうであろうと考えられていた。今回の結果は 100 倍地球質量程度のハローまで、従来の説を覆すことを世界ではじめて示すものである (Ishiyama, 2014, ApJ, 788, 27)。

この成果は今後、銀河系の中のダークマター対消滅シグナルを評価し、ダークマターの素粒子の探査とその詳細な性質を解明するために応用される。対消滅シグナルは局所的ダークマター密度の構造の 2 乗に比例するため、ハローの微細構造は極めて重要である。ハロー自体の構造自体の他に、ハロー内に無数に存在する局所的位相空間密度の極大、いわゆるサブハローの構造、分布を明らかにする必要がある。そのためにはできるだけ大きいハローをシミュレーションする必要がある。平成 26 年度に行う予定である、粒子数 5500 億のシミュレーションは、太陽質量のハローの構造を明らかにできるだけでなく、こういったサブハローとしての最小スケールハローの進化を追うことができる唯一のシミュレーションである。

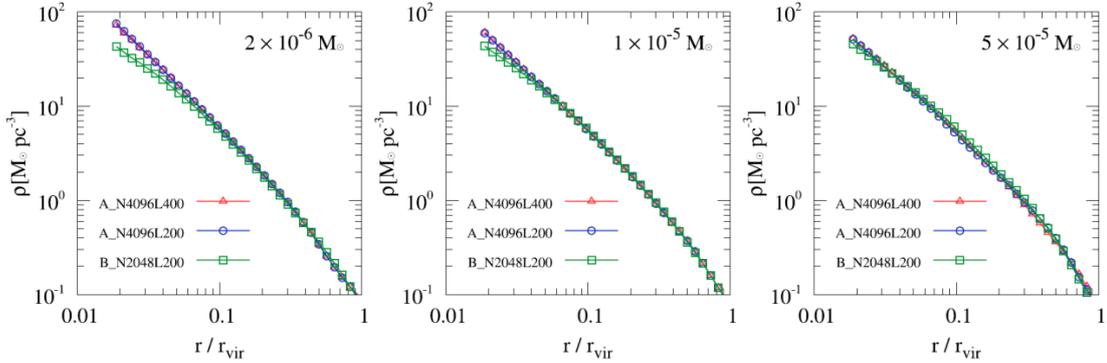


Figure 3. Stacked radial density profiles at $z = 32$ for three simulations as a function of the normalized radius by the virial radius.

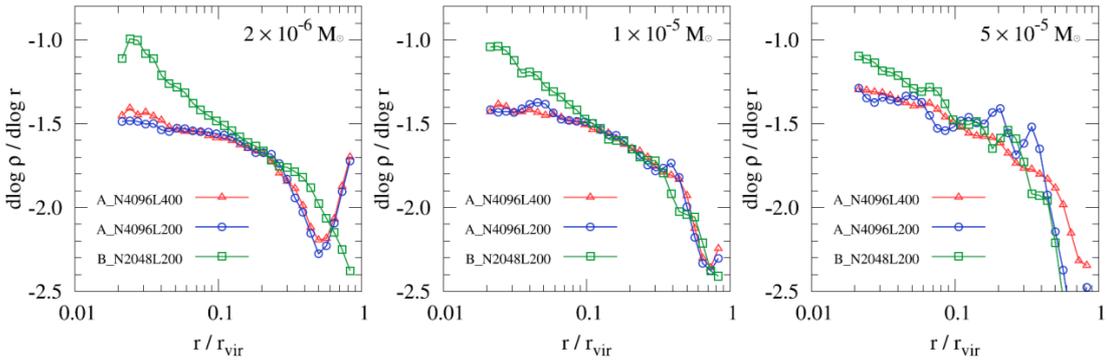


図 2: 2 地球質量(左), 10 地球質量(中央), 50 地球質量(右)のハローの密度構造(上 3 パネル)と、密度プロファイルのべき(下 3 パネル)。赤線と青線が、地球質量のハローができる物理を正しく追ったシミュレーションの結果である。緑線は、銀河スケールなどより大きいハローの構造形成史を模倣するシミュレーションである (reference model)。

【1 1】Vlasov-Poisson 方程式を用いた大規模構造形成におけるニュートリノの数値シミュレーション

素粒子実験によるニュートリノ振動の発見によって質量を持つことが明らかとなったニュートリノは、宇宙初期に相対論的な状態で他の成分から脱結合して、光子とほぼ同じ数密度で大量に存在する。また、ニュートリノはその軽い質量の為に現在の宇宙においては銀河の脱出速度に匹敵する速度分散を持ち、宇宙の大規模構造の形成過程において、密度揺らぎの重力的成長を無衝突減衰によって阻害する働きがある。通常、宇宙の大規模構造形成の数値シミュレーションはN体シミュレーションで行われるが、N体シミュレーションでは粒子性によるショットノイズのために無衝突減衰のシミュレーションを精度良く計算するのは難しい。そこで、我々はN体シミュレーションの代わりにVlasov-Poisson 方程式を直接数値シミュレーションする手法を用いて、大規模構造形成過程におけるニュートリノのダイナミクスを数値シミュレーションすることを目指している。本年度は、ダークマターをN体シミュレーションでシミュレーションし、ニュートリノの運動をVlasov-Poisson 方程式の直接シミュレーションで解くコードを開発した。

【1 2】GPUを用いた輻射輸送・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、輻射輸送シミュレーションの計算コストが膨大であるため、これまでの天体形成の数値シミュレーションでは無視されるか簡便な手法で近似的にのみ計算される場合がほとんどであった。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。

【1 3】ハッブル宇宙望遠鏡の高解像画像を用いたLAEの形態研究 《観測との共同研究》

独自に構築した426個の大規模 $z=2.2$ LAEサンプルとハッブル宇宙望遠鏡の高解像画像を組み合わせ、LAEの統計的形態研究を行った。特に我々はLAEの「(1)合体銀河の割合」「(2) Ly α と星成分連続光の空間的ずれ(Ly α spatial offset; $\delta_{\text{Ly}\alpha}$)」「(3)楕円率(～銀河の見込み角の指標)」とそれらのLy α 等価幅への依存性を調べた。これまでもLAEの形態研究はいくつかあったが、Ly α 光子の出易さ(～Ly α 等価幅)との関係に着目し、統計的に調査したのは今回が初めてである。これにより、これまでの小さなサンプル(N \sim 10)を用いた研究によって信じられてきた「銀河合体によって周辺銀河物質が剥ぎ取られLy α の脱出を促進する」という予想(Cooke+2010 などの)妥当性や「Ly α 光子は銀河円盤と垂直の方向(face-on)から脱出し易い」という理論予想(Zheng & Wallace 2013 などを)統計的に検証することができた。調査の結果、Ly α 等価幅が大きなLAEは典型的に(1)銀河合体の兆候がなく、(2) $\delta_{\text{Ly}\alpha}$ が小さく、(3)楕円率が小さい(すなわちface-on)であることが分かった。このことから、銀河合体はガスを剥ぎ取る代わりに、主として中心銀河を覆い隠す効果がある可能性を示した。銀河合体に加え、 $\delta_{\text{Ly}\alpha}$ /楕円率の議論から、Ly α 光子は「周辺銀河物質の柱密度が低い領域から効率的に放射される」ことが観測的に明らかになった(Shibuya et al. 2014a)。

【1 4】LAE のガス速度構造の研究 《観測との共同研究》

遠方銀河のガスの速度構造は、中性水素ガスに対して光学的に薄い「星雲線」をその銀河の系統的速度(基準)として、Ly α 輝線または金属吸収線との速度差 ($\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$, Δv_{IS})を測ることで調べられる。近赤外分光器の技術発展により、明るい銀河種族(LBG)のみならず、典型的に暗い種族である LAE から星雲線が検出され、それらの速度構造が調べられてきた(Chonis+2013 など)。

Hashimoto+2013 は $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ と Ly α 等価幅の間に逆相関があることを示したが、 $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ は中性水素 柱密度 N_{HI} とガス アウトフロー速度の両方に敏感な物理量であるため、この関係の起源が分からない状況にあった。そこで我々は、Keck 望遠鏡/LRIS などの分光器を用いて $z=2.2$ LAE の可視/近赤外分光観測を行った。その結果、これまでの $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ が測定された LAE サンプルを 2 倍に増やすことができ、提案されていた $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ -Ly α 等価幅 逆相関を高い有意性で確認することができた。さらに、LRIS の長時間分光観測により今までは検出が困難であった暗い紫外線連続光、及び多数の金属吸収線を 4 個の LAE から検出することに成功した。それらの(アウトフロー速度にのみ敏感な) Δv_{IS} は $-200\sim 300$ km/s であり、LAE も LBG と同様に強いアウトフローを起こしていることが明らかになった。このことから、小さな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ を持つ LAE は「小さなガス アウトフロー速度を持っている」というよりは寧ろ、「中性水素 柱密度 N_{HI} が低く Ly α 光子が抜け出し易い環境にある」ことが明らかになった (Shibuya et al. 2014b)。

【1 5】星間空間におけるアミノ酸生成と光不斉化の理論的研究 《宇宙・生命分野連携》

生命体の基本分子にアミノ酸があるが、実験室でアミノ酸を作成すると、左巻き (L 型) と右巻き (D 型) が同量生成されるが、地球上の生命では基本的に L 型アミノ酸しか使われていない。これを、鏡像異性体過剰という。1969 年、オーストラリアのマーチソン村に隕石が落下し、その隕石からアミノ酸が検出された。そして、わずかではあるが鏡像異性体過剰が発見された。発見された鏡像異性体過剰はわずかなものであるが、実験をすると鏡像異性体過剰は自己触媒反応により急速に増大することが分かってきた。よって、アミノ酸の鏡像異性体過剰が宇宙空間で起こり隕石を通じて地球に運ばれ、それが地上で急速に増幅した可能性がある。また、実験室で円偏光の光を当てると鏡像異性体過剰が引き起こされることが分かってきた。そして、近年になって、オリオン座の星形成領域(OMC-1)や他の星形成領域 (NGC 6334-V IRN) で円偏光波が発見された。よって、原始系の近くで大質量星が誕生したとすれば、太陽系内でアミノ酸の鏡像異性体過剰が起こった可能性がある。以上の事実を背景に、宇宙空間で円偏光波からアミノ酸の鏡像異性体過剰を引き起こす過程についての量子多体計算を進めている。我々は、円偏光波吸収とアミノ酸の光励起による崩壊・改変反応の過程を解析した。第一原理計算により、真空中におけるアミノ酸の最安定構造を求め、その光吸収性と円偏光二色性の値を求めた。その結果、アミノ酸の光物性はその種の特徴となる側鎖よりアミノ酸全体に共通する主鎖の構造により強く依存し、波長帯としてライマン α 帯の光が重要であることを明らかにした。また、宇宙空間におけるアミノ酸の生成について、アミノ酸前駆体候補であるヒダントインからアミノ酸に至る過程をエネルギー面の量子力学計算によって解析し、アミノニトリルを経てアミノ酸が容易に形成され得ることを示した。

【16】系外惑星における光合成アンテナ機構の研究《宇宙・生命分野連携》

探査機 Kepler によって太陽系外惑星の数は大きく追加されており、地球型惑星やハビタブルゾーン内に入る惑星も発見されている。光合成は、生命の痕跡であるバイオマーカーの有力な候補になっている。光合成の痕跡の中でも 750nm 付近の近赤外領域に見られる反射スペクトルの特徴的な勾配 (red edge) はバイオマーカーとして重要である。地球の光合成生物の場合は主星である太陽のスペクトル比の光を効率良く捕集するように進化して来たと考えられるべきであり、クロロフィルなどの光合成色素からなるアンテナ系は環境によって色素の種類や配置などの形態が異なる。光を受けた色素は電子励起され、近くの色素に電子状態を移動させるという過程を通じて効率的に光エネルギーを化学エネルギーに変換する。系外惑星においては異なる光捕集の形態を取る場合、それに対応した波長域に光合成の兆候を示す可能性がある。我々は、系外惑星の光のスペクトル比と植物の光捕集の形態との相関について定量的指標を導出することを目的に、光捕集系の量子化学計算を行った。アンテナを構成する色素 1 つ 1 つの励起状態を時間依存密度汎関数法により計算し、色素間では双極子-双極子相互作用する近似モデルを構築した。また、入射光としてある振動数の電場を印加して系の量子力学的時間発展を追跡することによってスペクトル強度を算出した。また、エネルギー輸送効率が最大となる主星の黒体輻射温度を求めた。

4. 教育

【学位論文】

<博士論文>

1. 扇谷 豪

Solving the core-cusp problem of cold dark matter halos and the origin of their observational universalities

2. 三木 洋平

Numerical Investigation of Galactic Merger Utilizing High Performance Computing Architectures: Ancient Satellite Galaxy and Wandering Supermassive Black Hole

3. Mohammad Ali Nawaz (The Australian National University, Research School of Astronomy and Astrophysics)

Interaction of Jets with the Intracluster Medium

4. Marc White (The Australian National University, Research School of Astronomy and Astrophysics)

Outflows from Young Stellar Objects

<修士論文>

1. 桐原 崇亘

矮小銀河の衝突シミュレーションで探る銀河とダークマターハローの内部構造

2. 鈴木 裕行
内部紫外線と背景紫外線が及ぼす銀河形成への影響
3. 山井 勇樹
ガスによる力学的摩擦を考慮した原始銀河ブラックホールの合体過程の研究

<学士論文>

1. 小島 匠
フリードマン方程式の有質量ニュートリノによる補正
2. 加藤 悠太
星間物質と超新星爆発の相互作用のシミュレーションに向けて
3. 木立 佳里
宇宙ダスト上のアミノ酸前駆体生成過程と光不斉化の研究
4. 近藤 さらな
質量変化する連ブラックホールの合体過程の研究
5. 柴野 祥平
CIP法による数値流体計算に向けて
6. 古谷 眸
磁気圧効果を入れたブラックホール降着円盤の定常解についての研究
7. 結城 文香
高精度宇宙流体シミュレーションに向けて

【集中講義】

- ・梅村 雅之
「宇宙輻射流体力学の基礎」(2013年10月31日～11月1日, 東京大学広域システム科学系, 東京都)

5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

【受賞】

筑波大学数理物質科学研究科研究科長賞, 扇谷 豪, Solving the core-cusp problem of cold dark matter halos and the origin of their observational universalities, 平成26年3月25日

【外部資金】

<代表者>

- ・基盤研究(S): 梅村 雅之 (代表者) (繰越)
「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(500万円)

- ・基盤研究（A）：森 正夫（代表者）（繰越）
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」（150 万円）
- ・基盤研究（C）：森 正夫（代表者）（新規）
「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」（80 万円）
- ・科研費若手研究（B）：行方 大輔（代表者），2013-2015 年，403 万円
「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」
- ・科研費若手研究（B）：石山 智明（代表者），2013-2015 年，350 万(3 年総額，直接経費)
「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」
- ・科研費若手研究（B）：長谷川 賢二（代表者），2012 年度採択，350 万円
「宇宙論的輻射シミュレーションで解明する宇宙再電離期の銀河形成史」

<分担者>

- ・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」（1188 万円）
- ・挑戦的萌芽研究：梅村雅之（分担者）（代表者：高橋 芳太）（継続）
「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）
- ・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」（400 万円）

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

- 1) 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
- 2) Tsuchiya, M., Mori, M., Nitta, S., 2013, “Transonic solutions of isothermal galactic

winds in a cold dark matter halo”, MNRAS, 432, 2837-2845

- 3) Miki Y., Takahashi D., Mori M., 2013, “Highly scalable implementation of an N-body code on a GPU cluster”, Computer Physics Communications, 184, 2159-2168
- 4) Yuma, S., et al., 2013, “First Systematic Search for Oxygen-line Blobs at High Redshift: Uncovering AGN Feedback and Star Formation Quenching”, The Astrophysical Journal, 779, 53-64
- 5) 扇谷 豪, 三木 洋平, 朴 泰祐, 森 正夫, 中里 直人, 2013 年, 「計算宇宙物理のための GPU クラスタ向け並列 Tree Code の開発と性能評価」, 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS) , 6(3), 58-70
- 6) Ishiyama, T., et al., 2013, “The Cosmogrid Simulation: Statistical Properties of Small Dark Matter Halos”, The Astrophysical Journal, 767, 146 (14pp)
- 7) Rieder, S., Ishiyama, T., et al., 2013, “Evolution of star clusters in a cosmological tidal field”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 446, 3695

B) 査読無し論文

- 8) Kirihara T., Miki Y., Mori M., 2013, “Resolving the outer density profile of dark matter halo in Andromeda galaxy”, JPhCS, 454, 012012
- 9) Miki Y., Mori M., Kawaguchi, T., 2013, “Hunting a wandering black hole in M31 halo using GPU cluster”, JPhCS, 454, 012013
- 10) Ogiya G., Mori M., Miki Y., Boku T., Nakasato N., 2013, “ Studying the core-cusp problem in cold dark matter halos using N-body simulations on GPU clusters”, JPhCS, 454, 012014

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

- 1) Hasegawa K., “The roles of radiative feedback on galaxies and IGM during the epoch of reionization”, Workshop on Photo-Evaporation in Astrophysical Systems(Jun.3-28, 2013, Stockholm, Sweden)
- 2) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J., “Mechanical AGN Feedback - Previous Work and Planned Projects”, AGN and Structure Formation Workshop (Jun.20, 2013, Institut d'Astrophysique de Paris, France)
- 3) Yoshikawa, K., “Vlasov-Poisson Simulations of Astrophysical Self-Gravitating Systems”, CCS-EPCC Workshop (Jul.4-5, 2013, University of Tsukuba, Japan)

- 4) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J., “Feedback in Galaxy Formation”, Johns Hopkins University Physics Colloquium (Nov.14, 2013, Johns Hopkins University, Baltimore MD, USA)
- 5) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J., “Galaxy-scale Feedback by AGN Jets and Winds”, Workshop on AGN and Starburst-driven Outflows (Nov.20, 2013, Johns Hopkins University, Baltimore MD, USA)
- 6) 石山智明, “Supercomputer Simulations of Structure Formation in the Universe”, Taiwan-Japan Symposium on Celestial Mechanics and N-Body Dynamics 2013 (2013年12月6日-8日, 台湾國立清華大學)
- 7) Yoshikawa, K. “Phantom-GRAPe: High-Performance Library to Accelerate N-body Calculation with SIMD Instruction Set”, Japan-Korea HPC mini-workshop (Feb. 26-27, 2014, University of Tsukuba, Japan)
- 8) Abe M., Umemura M., Hasegawa K., “Star-cluster formation regulated by the interstellar radiation field”, Ludwig Maximilians University Munich (Mar.21, 2014, Munich, Germany)

B) 一般講演

- 1) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Yabana, K., Shiraiishi, K., Kamiya, K., Kayanuma, M., Taguchi, M., Sato, A., “The energy transfer calculation of light harvesting systems for detecting biomarker on extrasolar planets”, Japan Geoscience Union Meeting 2013 (May 19-24, 2013, Chiba, Japan)
- 2) Ogiya G., Mori M., “Surfing of dark matter on density waves of galactic gas -Landau resonance and the core-cusp problem in cold dark matter halos-”, (poster), The Physical Link between Galaxies and their Halos, Garching by Munich (Jun.24-28, 2013, Germany)
- 3) Igarashi A., Mori M., Nitta S., “A New Concept of Transonic Galactic Outflows in a Cold Dark Matter Halo with a Central Super-Massive Black Hole”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (Jul.14-19, 2013, Makuhari, Japan)
- 4) 石山智明, “The formation and evolution of earth-mass dark matter microhalos and their impact on indirect probes of dark matter”, Probes of Dark Matter on Galaxy Scales (Jul. 14-19, 2013, Monterey, USA)
- 5) Kirihara T., Mori M., Miki Y., “Andromeda Giant Stream and Outer Density Profile of the Dark Matter Halo in M31”, (poster), The 12th Asia Pacific Physics Conference (Jul.14-19, 2013, Makuhari, Japan)
- 6) Hasegawa K., “Radiation hydrodynamics simulations on the formation of galaxies during the epoch of reionization”, (poster), Workshop on Reionization in the Red

- Center: New windows on the high redshift Universe (Jul.15-19, 2013, Yulara, Australia)
- 7) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Yabana, K., Shiraishi, K., Kamiya, K., Kayanuma, M., Sato, A., “The energy transfer simulation for detecting photosynthetic biosignatures on extrasolar planets”, the 1st Awaji International Workshop on “Electron Spin Science & Technology” (Jul.16-18, 2013, Hyogo, Japan)
 - 8) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J., “Hydrodynamical Simulations of AGN Feedback”, 2nd East Asia AGN Workshop (Aug.19-23, 2013, Sapporo, Japan)
 - 9) Shibuya, T., “A statistical study on galactic outflows of Ly- α emitters probed by velocity offsets between their Ly- α /UV absorption and nebular lines”, Workshop on Lyman-alpha as an astrophysical tool (Sep.9-13, 2013, Nordita, Stockholm, Sweden)
 - 10) Igarashi A, Mori M, Nitta S., “Transonic Galactic Outflows and Their Influences to the Chemical Evolutions of Galaxies and Intergalactic Space”, (poster), 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (Nov.18-20, 2013, Tsukuba, Japan)
 - 11) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Yabana, K., Shiraishi, K., Kayanuma, M., Sato, A., “Light harvesting and energy transfer in photosystem: implication for biosignatures”, International Astrobiology Workshop 2013 (Nov.28-30, 2013, Kanagawa, Japan)
 - 12) Shibuya, T., “Demographics of Lyman Alpha Emitter Structures”, Subaru Users' Meeting FY2013, NAOJ (Jan.21-23, 2014, Mitaka, Tokyo, Japan)
 - 13) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Shiraishi, K., Kayanuma, M., Yabana, K., Sato, A., “Toward understanding as photosynthetic biosignatures: light harvesting and energy transfer calculation”, The Search for Life Beyond the Solar System: Exoplanets, Biosignatures & Instruments (Mar.16-21, 2014, Tuscon, USA)

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

- 1) 小松勇, 「光合成光捕集機構の量子化学計算による系外惑星バイオマーカーのモデル構築」, 「宇宙と生命」懇話会 (第13回) (2013年6月21日, 自然科学研究機構新分野創成センター, 東京都)
- 2) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland 「AGN Feedback by Jets」, Semi-analytic Method with SWANS Meeting (2013年9月19日, お茶の水女子大学, 東京都)
- 3) 梅村雅之, 「古典的円盤形成進化 シナリオと問題点」, 円盤銀河の形成と進化研究会 (2013年9月26日～28日, 国立天文台, 三鷹市)

- 4) 石山智明, 「スーパーコンピュータの中で生まれる宇宙」, 日本物理学会 2013 年度 大阪支部公開シンポジウム (2013 年 10 月 26 日, 甲南大学, 神戸市)
- 5) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携拠点 (CAB) について」, 計算惑星科学シンポジウム, (2013 年 11 月 23 日, 石垣港離島ターミナル, 石垣市)
- 6) 石山智明, 「ペタフロップス級 N 体シミュレータの開発 —ダークマターの超大規模シミュレーション—」, 「京」における高速化ワークショップ (2013 年 12 月 18 日, 理化学研究所計算科学研究機構, 神戸市)
- 7) 吉川耕司, 「衝突銀河団における非平衡電離過程と二温度構造」, 「銀河団の物理」研究会, (2013 年 12 月 28 日, 東京理科大学神楽坂キャンパス, 東京都)
- 8) 長谷川賢二, 「近年の宇宙再電離に関する理論・観測研究の進展と今後の課題」, 初代星・初代銀河研究会 (2014 年 1 月 22 日~24 日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 9) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携拠点の進め方について」, 研究会「地上実験・宇宙実験・観測・計算シナジーによる星間での生体分子・生体機能創生の解明」 (2014 年 2 月 3 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)
- 10) 長谷川賢二, 「再電離シミュレーション」, 「銀河進化と遠方宇宙」研究会 (2014 年 3 月 24 日~25 日, 東京大学本郷キャンパス, 東京都)

B) その他の発表

- 1) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携拠点について」, 「宇宙生命計算科学連携拠点」ワークショップ (2013 年 6 月 28 日~29 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)
- 2) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「球対称定常銀河風模型による Sombrero 銀河の X 線強度分布」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 3) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ダークマターハローと銀河中心ブラックホールの重力場における球対称定常銀河風解析」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 4) 石山智明, 「最小スケールからはじまる階層的ダークマターハロー形成」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 5) 扇谷豪, 森正夫, 石山智明, Andreas Burkert, 「ダークマターハローの質量密度構造から探る観測的経験則」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 6) 小松勇, 梅村雅之, 庄司光男, 矢花一浩, 白石賢二, 神谷克政, 栢沼愛, 佐藤皓允, 「系外惑星における光合成の痕跡の指標構築のための光捕集計算」, 日本天文学会 2013 年秋季年会, (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 7) 鈴木裕行, 梅村雅之, 「内部紫外線・背景紫外線が及ぼす銀河進化への影響」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 8) 田中賢, 吉川耕司, 岡本崇, 長谷川賢二, 「GPU を用いた輻射輸送シミュレーションの高速化」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)

- 9) 長谷川賢二, 「紫外線フィードバックが再電離期の銀河や銀河間物質に与える影響」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 10) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J., 「Kinetic-mode Feedback: Radio Galaxies and UFOs」, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学, 仙台市)
- 11) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「銀河中心ブラックホールとコールドダークマターハローの重力場における遷音速銀風解析とその応用」, 流体力学会 (2013 年 9 月 12 日~14 日, 東京農工大学, 府中市)
- 12) 梅村雅之, 「超巨大ブラックホール形成: 降着 vs 合体」, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会・キックオフワークショップ (2013 年 9 月 16 日~17 日, 愛媛大学, 松山市)
- 13) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 濟藤祐理子, 「大規模 GPU クラスタを駆使した M31 ハローを漂う巨大ブラックホール探査」, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会・キックオフワークショップ (2013 年 9 月 16 日~17 日, 愛媛大学, 松山市)
- 14) 梅村雅之, 「宇宙流体シミュレーションによる天体形成の研究」, 第 5 回「学際計算科学による新たな知の発展・統合・創出」シンポジウム -T2K-Tsukuba、HA-PACS による計算科学の発展と、次世代コンピューティングの展望- (2013 年 11 月 5 日~6 日, 筑波大学, つくば市)
- 15) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携について」, 自然界における生体分子キラリティ起源 -実験・観測・計算シナジーによるアプローチ (2013 年 11 月 16 日, 岡崎コンファレンスセンター)
- 16) 小松勇, 「系外惑星のバイオマーカー検討に向けて: 光合成の光吸収モデル」, ALMA ワークショップ「宇宙と生命」 (2013 年 11 月 23 日, 国立天文台, 三鷹市)
- 17) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「星間輻射場によって制御される星団形成過程の 3 次元輻射流体力学による研究」, 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 18) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「遷音速銀河風が銀河間空間の化学進化に与える影響」, 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 19) 扇谷豪, 「コールドダークマターハローのコア-カスプ問題の解決とその観測的経験則の起源」, 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 20) 桐原崇亘, 三木洋平, 川口俊宏, 森正夫, 「アンドロメダストリームと母矮小銀河の内部構造」, (ポスター), 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 21) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川健二, 「AGN の輻射にさらされた分子雲の寿命」, (ポスター), 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 22) 長谷川賢二, 「宇宙再電離過程における輻射性フィードバックの重要性」, (ポスター), 第 26 回理論懇シンポジウム (2013 年 12 月 25 日~27 日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)

- 23) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 濟藤祐理子, 「Numerical Investigation of Merger Remnants Utilizing High Performance Computing Architectures: Ancient Satellite Galaxy and Wandering Supermassive Black Hole」, 第26回理論懇シンポジウム (2013年12月25日～27日, 東京大学柏キャンパス, 柏市)
- 24) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「星間輻射場によって制御される星団形成過程の3次元輻射流体力学による研究」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 25) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ダークマターハローと銀河中心ブラックホールの重力場における球対称定常銀河風解析」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 26) 石山智明, 「最小のダークマターハローからの階層的構造形成」, CfCA ユーザーズミーティング (2014年1月28日～29日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹市)
- 27) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川健二, 「AGNの輻射にさらされたガス雲の輻射流体計算」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 28) 鈴木裕行, 梅村雅之, 「内部及び背景紫外線による銀河の星形成史への影響」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 29) 梅村雅之, 「まとめ」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 30) 山井勇樹, 「ガスによる力学的摩擦を考慮した原始銀河ブラックホールの合体過程の研究」, 初代星・初代銀河研究会 (2014年1月22日～24日, 鹿児島大学, 鹿児島市)
- 31) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「AGNの輻射にさらされた分子雲の寿命」, (ポスター), 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (2014年1月28日～29日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹市)
- 32) 長谷川賢二, 「宇宙論的輻射流体計算で解明する再電離期の宇宙進化史」, (ポスター), 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (2014年1月28日～29日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹市)
- 33) 吉川耕司, 「Vlasov シミュレーションによる宇宙大規模構造形成におけるニュートリノのダイナミクス」, 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (2014年1月28日～29日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹市)
- 34) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「ダークマターハローと銀河中心ブラックホールの重力場における球対称定常銀河風解析」, プラズマセミナー (2014年1月31日, 三鷹市)
- 35) 小松勇, 「光合成の光吸収計算: 太陽系外惑星のバイオマーカーへの示唆」, 地上実験・宇宙実験・観測・計算シナジーによる星間での生体分子・生体機能創生の解明 (2014年2月3日, 筑波大学, つくば市)
- 36) 長谷川賢二, 「宇宙初期の銀河形成と宇宙再電離」, 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 (2014年3月3日～4日, 富士ソフトプラザ, 東京都)

- 37) 安部牧人, 梅村雅之, 「星間輻射場によって制御される星団形成過程の3次元輻射流体力学による研究」, 日本天文学会春季年会 (2014年3月19日~22日, 国際基督教大学, 三鷹市)
- 38) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「アンドロメダストリームで探る母矮小銀河の内部構造」, 日本天文学会2014年春季年会 (2014年3月19日~22日, 国際基督教大学, 三鷹市)
- 39) 澁谷隆俊, 「Ly α 輝線銀河の速度構造研究で探る Ly α の放射機構」, 日本天文学会春季年会 (2014年3月19日~22日, 国際基督教大学, 三鷹市)
- 40) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「AGNの輻射にさらされたガス雲の輻射流体計算 II.」, 日本天文学会春季年会 (2014年3月19日~22日, 国際基督教大学, 三鷹市)
- 41) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「大規模GPUクラスタを用いて探るM31ハローを漂う超巨大ブラックホールの現在位置」, 日本天文学会2014年春季年会 (2014年3月19日~22日, 国際基督教大学, 三鷹市)
- 42) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Silk, J. 「Positive vs Negative AGN Feedback in Galaxy Formation」 Semi-analytic Method with SWANS Workshop (2014年3月27日~28日, 理化学研究所計算科学研究機構, 神戸市)

(4) 著書, 解説記事等

梅村雅之

シリーズ<宇宙物理学の基礎>①「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年2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L型過剰の研究 (梅村, 木立)

宇宙・生命分野間連携により, アミノ酸前駆体からのアミノ酸生成, および円偏光波照射によるアミノ酸鏡像異性体過剰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)

宇宙・生命分野間連携により, 系外惑星系の主星光スペクトルと光合成光捕集の相関について量子化学計算を進めた。

【国際連携】

・ Alex Wagner

Collaboration with Prof. Joseph Silk (IAP) and Prof. Colin Norman on "Positive Feedback through AGN-pressure Induced Star Formation in Disk Galaxies." Visiting researcher to the Institut d'Astrophysique de Paris, France, and Johns Hopkins University, Baltimore MD.

8. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

- 1) 「宇宙生命計算科学連携拠点」ワークショップ
2013年6月28日～29日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市
- 2) 超巨大ブラックホール研究推進連絡会・キックオフワークショップ
2013年9月16日～17日, 愛媛大学理学部, 松山市
- 3) 円盤銀河の形成と進化研究会
2013年9月26日～28日, 国立天文台, 三鷹市
- 4) 天体形成研究会
2013年10月4日～5日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市
- 5) 「観測と理論で探る宇宙再電離と遠方銀河形成」ワークショップ
2013年11月27日～29日, 神戸大学, 神戸市
- 6) 国際会議「2nd East Asian AGN Workshop in Sapporo」, 2013年8月19日～23日, ブルーウェーブイン札幌市 (<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~matsuoka/20130312agnw>)
- 7) 初代星・初代銀河研究会 2014
2014年1月22日～24日, 鹿児島大学理学部, 鹿児島市

9. 管理・運営

・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
物理学類 学務委員, カリキュラム委員会委員長
東京工業大学「GCOE 地球から地球たちへ」外部評価委員

・吉川耕司

計算科学研究センター・計算機運用委員
計算科学研究センター・メニーコア型大規模スーパーコンピュータシステム仕様策定委員会・委員
計算科学研究センター・大規模メニーコア実験システム仕様策定委員会・委員
計算科学研究センター・密結合並列演算加速機構実験システム仕様策定委員会・委員

10. 社会貢献・国際貢献

- ・吉川耕司

「宇宙大規模構造 ―宇宙は素粒子の夢を見るか―」, 全国同時七夕講演会 2013 (2013年7月6日, つくば国際会議場, つくば市)

- ・Alex Wagner

Publication of a free, open-source code to create initial conditions representative of a fractal, log-normal, inter-stellar medium density field for hydrodynamic simulations, "pyFC" (<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/code/pyFC/index.html>).

IV. 宇宙観測グループ

教授	中井直正
講師	瀬田益道
助教	永井 誠
準研究員	宮本祐介
研究員	石井 峻、金子紘之、荒井 均
大学院生	13名 (数理物質科学研究科後期課程4名、前期課程9名)
卒研究生	2名

国土地理院つくば32m鏡の20GHz帯受信観測システムの整備を行うとともに、銀河面のアンモニア掃天観測などを継続していた。また南極ドームふじ基地で南極天文学を開拓するためにプロトタイプとして30cm可搬型サブミリ波望遠鏡の開発・試験を継続し、さらに10mテラヘルツ望遠鏡の開発を行った。共同利用の望遠鏡を用いて銀河等の観測的研究も行った。

【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

- 国土地理院つくば32mアンテナに搭載しているK帯受信機の真空窓の結露を防ぐ乾燥空気を送風のためのポンプ、いくつかのケーブル、直流安定化電源などの不具合な部品を交換し、受信機システムの安定化をはかった。
- アンテナ伝送系カバー（雨除けカバー）の保守点検を行った。また鳥避けの多くが破損していたので交換した。
- 昨年度にアンテナの指向性が非常に悪くなっていることが判明し、その原因がアンテナの方位角方向移動用のレールの基礎が大きく劣化しており、レールの上下位置がずれているとともにその基礎の中に水が入ってもろくなっており車輪が通るたびにレールが上下していることがわかった。そのため4月～11月はアンテナ駆動を中止し、レール基礎の調査を行ったのち、国土地理院が7月、8月にレール基礎に充填剤を注入する工事を行った。その後、再度レール基礎の調査を行い、指向性の調査と補正を行った。その結果、レールの下に基礎が固定され、アンテナレールのゆがみは補正できないものの車輪が通るときにレールが上下することは抑えることができた。またアンテナの器差補正式に多くの項を追加することによってレールのゆがみに起因する指向性誤差をある程度減少させ、多くの方位角のところで指向性誤差を20°以下に抑えることができ（アンテナのビームサイズは100"）、観測に供することが可能となった。
- アンテナ制御用とデータ解析用の計算機（パソコン）を新しいものに交換した。
- 1月末から観測を開始し、VLBIフリッジテストを行ったが左右円偏波の取り違いなど不具合が発見され、修正の後、3月からVLBI観測が再び正常に行えるようになった。
- 32m鏡で観測したアンモニア輝線のデータを一般に公開する検索解析システムを開発した。特にオリオン分子雲のデータについて各観測点における(J,K)=(1,1)～(6,6)の輝度温度等から励起温度やオルソ・パラ比を、またアンモニア生成時の温度などを計算するシステムを製作し、データベースを用いたデータ検索でテキストファイルからの読み出しよりも5倍以上の速度で検索が可能となり、また正規化を行うことでデータ検索速度を100倍以上も高速化することに成功した。

(2) 観測

(VLBI観測)

○天の川銀河（銀河系）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K帯でモニター観測を実施していたが、32m鏡は上述のアンテナレール基礎の不具合のため、長期に中断を余儀なくされた。3月から再度モニター観測に復帰し、国内大型アンテナとして当該VLBI観測に重要な貢献をしている。2014年3月末までにフレアーはまだ起きていない。

(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NH₃ (J,K)=(1,1)-(6,6)の掃天観測を2月から再開した。

【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

南極内陸部では供給可能電力に大きな制限があるため低消費電力の受信機が必須である。南極用30cm望遠鏡の500GHz帯受信機の開発において高精度な熱設計を行い、低消費電力で0.1Wの冷凍能力の冷凍機を用いながらも受信機温度を3.5K以下まで冷却可能とした。その結果、理論的限界(量子雑音)の3倍程度である461GHzにおいて70K以下、492GHzにおいて90K以下の受信機雑音である世界最高感度の受信機を開発した。

南極ドームふじ基地に30cm鏡を設置して夏季の日中に指向性誤差を角分解能9'の10分の1以下にする光学ポインティングシステムの開発を行った。口径3cm光学望遠鏡にビームエクステンダーとCCDカメラを取り付け、つくばで昼間に2.23等級までの星を4σ以上のS/Nで撮影し、位置を測定することに成功した。これによりドームふじ基地で昼間に南天の30個ほどの星を観測し、0.5°程度の指向誤差を達成できる見込みを得た。

○10m テラヘルツ望遠鏡

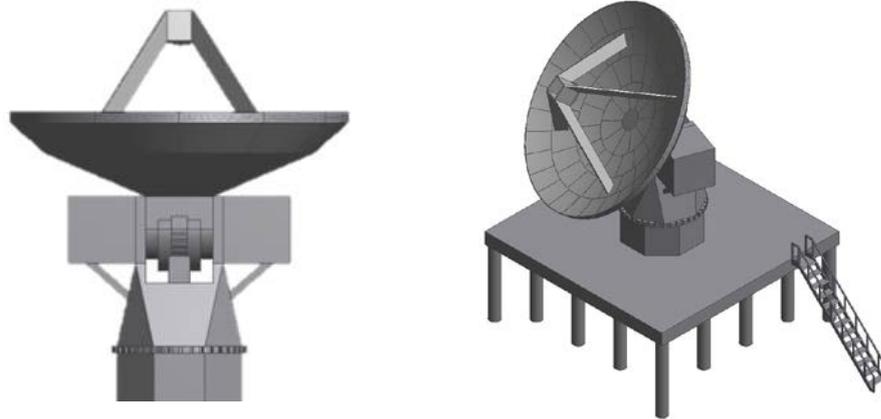
主鏡面のパネルを設計した。主鏡を5周90枚3点支持のパネルで構成し、有限要素法を駆使して高い鏡面精度と軽量なパネルを設計した。その結果、重力変形が1.05 μmで重量が19.2 kgという共に仕様を十分満たし、また風荷重と温度変化による変形誤差も仕様を満たすパネルを設計することができた。

テラヘルツ望遠鏡として鏡面精度は非常に高いものが要求される。そのためには主鏡面を構成するパネル間の段差等を精度良く測定し段差調整をする必要がある。主鏡面誤差の測定は最終的には電波ホログラフィで行うがそのためには用いる電波の半波長より十分小さい精度でパネル間の段差を粗調整しておく必要がある。そのために格子投影法を検討した。

ヘテロダイン受信機系の設計を行った。0.2~1.5 THzの6周波数帯の受信機を3個の冷却システムに入れ、そのうち2個の受信機を同時使用できる周波数依存しない光学系の設計に成功した。また0.5/0.8THz受信機そのものの設計も行い、受信機雑音が123 K (0.5 THz), 255 K (0.8 THz)とALMAと同程度で大気込みシステム雑音温度が282 K (0.5 THz), 606 K (0.8 THz)と世界標準の受信機を実現できる見込みを得た。

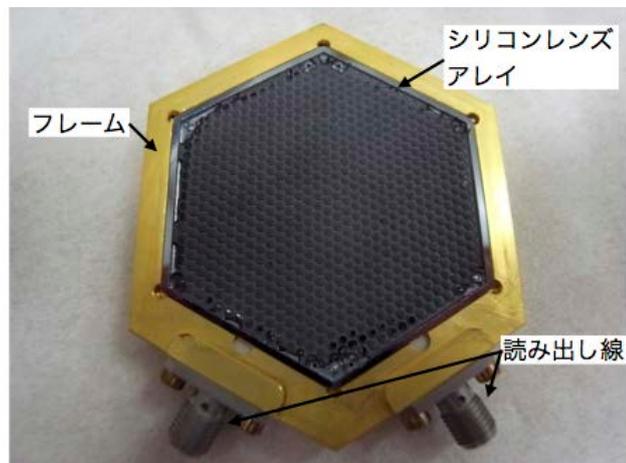
電波カメラ側の光学系を設計し、4枚の鏡で収束させて電波カメラに受信電波を入射させる光学系を実現できる見込みとなった。またこれらの収束鏡と電波カメラを設置する受信機室を設計し、構造計算と熱計算から4.8m(L)×2.6m(D)×4.0m(H)の大きさで受信機の発熱だけで約0°Cに保つこ

とができることがわかった。



(2) 超伝導電波カメラ (MKID) の開発

力学インダクタンス検出器 (MKID) を用いた超伝導電波カメラの開発を進めた。まず 10m テラヘルツ望遠鏡用のプロトタイプとして 0.22-THz 帯 608 画素カメラの開発を行った (右図)。また、望遠鏡焦点 ($F\# = 6$) からカメラ焦点 ($F\# = 1$) に結合する冷却光学系および冷却光学系に用いている誘電体レンズのための反射防止コーティングも合わせて開発した。冷却光学系と 608 画素カメラを組み合わせる冷却測定を行った結果、赤外遮断フィルターやバッフルを工夫したことで超伝導カメラは 100 mK まで冷却され、検出器は 608 画素中約 95% の歩留まりを達成した。



これらの技術をもとに、10m テラヘルツ望遠鏡の焦点面に配置し視野1度を実現する0.85-THz帯超伝導電波カメラの設計を行った。カメラ光学系に用いるシリコンレンズアレイと検出器を集積化させることで、大きさ50 mmの正六角形のモジュールに約3000画素、直径160 mmの焦点面に7モジュールを配置し約20000画素を実現する設計解を示した。

(3) 概算要求等

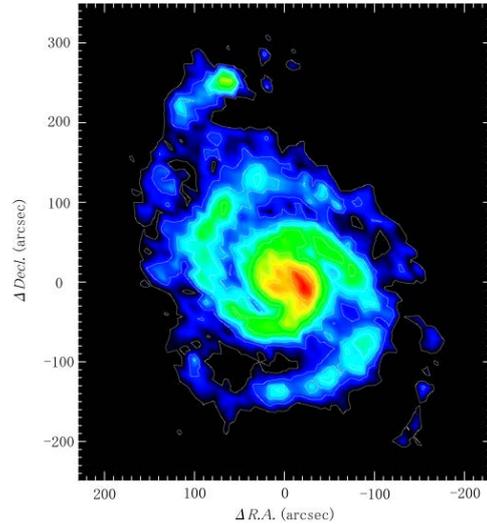
10m テラヘルツ望遠鏡が東北大学の2.5m 赤外線望遠鏡と合わせて南極望遠鏡として日本学術会議の大型研究計画に決定した。また日本学術会議物理学委員会天文学宇宙物理学分科会の中型計画に提出し、高い評価を得た。

10m テラヘルツ望遠鏡の概算要求を2.5m 赤外線望遠鏡と合わせて南極望遠鏡として文部科学省に提出した。望遠鏡計画は理解され評価されたが、新ドームふじ基地建設に関する問題から予算化は見送られた。

【3】 銀河の観測的研究

(1) 近傍渦巻銀河 M51 の分子ガスの分布と運動を野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた CO($J=1-0$) の観

測から求めた (図)。その結果、渦状ポテンシャルが分子ガスの運動に大きく影響を及ぼしていることを明らかにした。また、大質量星の母体である巨大分子雲複合体は分子雲衝突によって効率的に形成されること、さらに巨大分子雲複合体は渦状腕を通過する際に生じる複合体内部の速度勾配によって分裂し、渦状腕間に巨大分子雲として放出されることを明らかにした。(査読論文 1)



(2) 1型セイファート銀河 NGC 1097 の中心部 1.3-kpc 以内の領域の HCN (J=4-3) と HCO⁺ (J=4-3) を ALMA を用いて 100-pc スケールの角分解能で観測した。その結果、HCO⁺に対する HCN の強度比が通常銀河や爆発的星形成銀河に比べて増加していることがわかった。これはこれまでの活動的銀河中心核における結果と同じ傾向を示すものである。他の分子の強度比とも合わせて熱平衡解析および非平衡解析の結果から、これらの分子輝線は高密度 ($n^{4.5}\text{-}n^6 \text{ cm}^{-3}$) で高温 ($70\text{K} \leq T_{\text{kin}} \leq 550\text{K}$) な領域から放射されていることがわかった。また大きな HCN/HCO⁺比は、PDR/XDR 領域における気相化学反応よりも高温下における化学反応に起因すると考えられる。(査読論文 6)

(3) 1型セイファート銀河 NGC 1097 の中心から 200-pc 以内の高密度分子ガスの運動を ALMA による HCN (J=4-3) の観測から求めた。その結果、従来の H α の結果と同様に中心核へのガスの流入が観測された。流入量はブラックホールがあると考えられる中心核から 40-pc の距離において分子ガスは年に 0.09 太陽質量であり、電離ガス+分子ガスの流入量は年に 0.2 太陽質量であった。(査読論文 7)

<論 文>

(査読論文)

1. Miyamoto, Y., Nakai, N., Kuno, N., “Influence of shear motion on evolution of molecular clouds in the spiral galaxy M 51”, 2014, Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted.
2. Nitta, T., Karatsu, K., Sekimoto, Y., Naruse, M., Sekine, M., Sekiguchi, S., Matsuo, H., Noguchi, T., Mitsui, K., Okada, N., Seta, M., Nakai, N., “Close-Packed Silicon Lens Antennas for Millimeter-Wave MKID Camera”, 2014, Journal of Low Temperature Physics, in press.
3. Nitta, T., Sekiguchi, S., Sekimoto, Y., Mitsui, K., Okada, N., Karatsu, K., Naruse, M., Sekine, M., Matsuo, H., Noguchi, T., Seta, M., Nakai, N., “Anti-reflection Coating for Cryogenic Silicon and Alumina Lenses in Millimeter-Wave Bands”, 2014, Journal of Low Temperature Physics, in press.
4. Karatsu, K., Naruse, M., Nitta, T., Sekine, M., Sekiguchi, S., Sekimoto, Y., Uzawa, Y., Matsuo, H., Kiuchi, H., “Measurement of MKID Performance with High-speed and Wide-band Readout System”, 2014, Journal of Low Temperature Physics, 176, 459-464.
5. Tanaka, K., Oka, T., Matsumura S., Nagai, M., Kamegai, K. “High Velocity Compact Clouds in the Sagittarius C Region”, 2014, Astrophysical Journal, 783, id. 62 (10 p).
6. Izumi, T., Kohno, K., Martín, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P.-Y., Turner,

- J.L., Meier, D., Schinnerer, E., Imanishi, M., Tamura, Y., Curran, M.T., Doi, A., Fathi, K., Krips, M., Lundgren, A., Nakai, N., Nakajima, T., Regan, M.W., Sheth, K., Takano, S., Taniguchi, A., Terashima, Y., Tosaki, T., Wiklind, T., “Submillimeter ALMA Observations of the Dense Gas in the Low-Luminosity Type-1 Active Nucleus of NGC 1097”, 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, id.100 (26p).
7. Fathi, K., Lundgren, A., Kohno, K., Piñol-Ferrer, N., Martín, S., Espada, D., Hatziminaoglou, E., Imanishi, M., Izumi, T., Krips, M., Matsushita, S., Meier, D.S., Nakai, N., Sheth, K., Turner, J., van de Ven, G., Wiklind, T., “ALMA Follows Streaming of Dense Gas Down to 40 pc from the Supermassive Black Hole in NGC 1097”, 2013, Astrophysical Journal Letters, 770, id. L27 (5 p).
 8. Salak, D., Nakai, N., Miyamoto, Y., Yamauchi, A., Tsuru, T.G., “Large-Field CO(J=1-0) Observations of the Starburst Galaxy M82”, 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, id. 66 (15p).
 9. Sashida, T., Oka, T., Tanaka, K., Aono, K., Matusura, S., Nagai, M., Seta, M., “Kinematics of Shocked Molecular Gas Adjacent to the Supernova”, 2013, Astrophysical Journal, 774, 10 (16p).

(国際研究集会集録等)

1. 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., Sekido, M., “Progress Report of the Monitor of Sgr A* with Japanese VLBI Network at 22 GHz until 2014/76”, 2013, The Astronomer's Telegram, #6004.
2. Miyamoto, Y., Nakai, N., Kuno, N., “The Influence of Shear Motion on Evolution of Giant Molecular Associations”, 2014, 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. Trequethardt. ASP Conference Series, 480, 259.
3. Kamenno, S., Nakai, N., Honma, M., “ALMA Extended Array”, 2014, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory. Proceedings of a Symposium held in Hakone, Japan 3-8 December 2012. ASP Conference Series, 476, 409.
4. Miyamoto, Y., Nakai, N., Kuno, N., “Disruption of Giant Molecular Associations by Shear Motion in the Spiral Galaxy M51”, 2013, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory. Proceedings of a Symposium held in Hakone, Japan 3-8 December 2012. ASP Conference Series, 476, 281.
5. Tsuboi, M., Asaki, Y., Yonekura, Y., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Kameya, O., Miyoshi, M., Takaba, H., Wakamatsu, K., Fukuzaki, Y., Morimitsu, T., Sekido, M., Oka, T., Takekawa, S., Omodaka, T., Handa, T., Kakumi, A., “Report of the Daily Monitor of Sgr A* at 22 GHz”, 2013, The Astronomer's Telegram, #5184.
6. Sekido, M., Takekawa, S., Oka, T., Tsuboi, Y., Asaki, Y., Yonekura, Y., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Kameya, O., Miyoshi, M., Takaba, H., Wakamatsu, K., Fukuzaki, Y., Morimitsu, T., Omodaka, T., Handa, T., “NICT VLBI Observations of Sgr A* at 8 GHz and 2 GHz”, 2013, The Astronomer's Telegram, #5024.
7. Tsuboi, M., Asaki, Y., Yonekura, Y., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Kameya, O., Miyoshi, M., Takaba, H., Wakamatsu, K., Fukuzaki, Y., Morimitsu, T., Sekido, M., Oka, T., Takekawa, S., Omodaka, T., Handa, T., Kakumi, A., “Possible brightening at 22 GHz of Sgr A*”,

- 2013, The Astronomer's Telegram, #5013.
8. Iono, D., Ueda, J., Yun, M. S., Crocker, A., Espada, D., Hatsukade, B., Kaneko, H., Kawabe, R., Narayanan, D., Tamura, Y., “Charting the Evolution of Merger Remnants Through Molecular Gas Observations”, 2013, ASP Conference Series, 477, 297
 9. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., “Molecular Gas Properties and Star Formation in Interacting Galaxies”, 2013, ASP Conference Series, 477, 83
 10. Onodera, S., Kuno, N., Tosaki, T., Muraoka, K., Miura, R., Kohno, K., Nakanishi, K., Sawada, T., Komugi, S., Kaneko, H., Hirota, A., Kawabe, R., 2013, “NRO M33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC): Properties of Giant Molecular Clouds in M33”, ASP Conference Series, 476, 303
 11. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., 2013, “Molecular Gas Properties and Star Formation in Interacting Galaxies”, ASP Conference Series, 476, 273
 12. Ueda, J., Iono, D., Yun, M., Wilner, D., Narayanan, D., Hatsukade, B., Tamura, Y., Kaneko, H., Crocker, A., Espada, D., Kawabe, R., 2013, “Reformation of Cold Molecular Disks in Merger Remnants”, ASP Conference Series, 476, 61

<学会発表>

1. 永井誠、荒井均、宮本祐介
「銀河中心領域を想定したアンモニア反転遷移輝線の吸収を含む輻射強度モデル」
日本天文学会（2014年3月21日、国際基督教大学）
2. Salak, D., Nakai, N., and Kitamoto, S.
「CO (J=3-2) Emission in the Starburst Galaxy NGC 1808」
日本天文学会（2014年3月20日、国際基督教大学）
3. 舟橋史祥、中井直正、間明田好一、山内彩、他
「Sy2型銀河 NGC 5495 の H₂O メーザー観測：大質量ブラックホールの証拠」
日本天文学会（2014年3月21日、国際基督教大学）
4. 川崎将平、中井直正、瀬田益道、永井誠、石井峻、荒井均、今田大皓、宮本祐介
「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の日中における光学ポインティングシステムの開発」
日本天文学会（2014年3月21日、国際基督教大学）
5. 坪井昌人、朝木義晴、米倉覚則、金子紘之、高羽浩、亀谷收、関戸衛、ほか SgrA* 毎日モニターグループ一同
「短基線 VLBI による Sagittarius A* の 2014 年事象のモニター観測」
日本天文学会（2014年3月21日、国際基督教大学）
6. 藤沢健太(山口大学), ほか大学 VLBI 連携研究グループ
「大学 VLBI 連携観測の最近の成果」
日本天文学会（2014年3月20日、国際基督教大学）
7. 藤田真司、永井誠、中井直正、瀬田益道、金子紘之、寺部佑基、北本翔子、小林和貴、宮本祐介、国土地理院、他つくば 32m 電波望遠鏡関係者一同
「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡のポインティングと方位角車輪レールの関連調査」
日本天文学会（2014年3月20日、国際基督教大学）
8. 今田大皓、中井直正、瀬田益道、永井誠、石井峻、新田冬夢、小野寺唯、菅谷元典、長崎岳人、荒井均,

- 宮本祐介, 関本裕太郎, ほか (南極天文コンソーシアム)
「南極 10-m テラヘルツ望遠鏡広視野光学系の基本設計」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
9. 都築俊宏, 新田冬夢, 今田大皓, 瀬田益道, 中井直正, 関口繁之, 関本裕太郎
「Nasmyth 焦点用サブミリ波広視野光学系の設計」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 10. 新田冬夢, 関本裕太郎, 都築俊宏, 唐津謙一, 三ツ井健司, 岡田則夫, 野口卓, 関口繁之, 関根正和, 岡田隆, Shibo Shu, 成瀬雅人, 今田大皓, 瀬田益道, 中井直正
「南極 10 m テラヘルツ望遠鏡搭載用 850 GHz 帯超伝導カメラの基本設計」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 11. 関口繁之, 新田冬夢, 唐津謙一, 関本裕太郎, 野口卓, 松尾宏, 岡田則夫, 成瀬雅人, 関根正和, 岡田隆, Shibo Shu
「ミリ波・サブミリ波観測のための広視野冷却光学系の評価」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 12. 小野寺唯, 中井直正, 瀬田益道, 永井誠, 石井峻, 新田冬夢, 今田大皓, 菅谷元典, 長崎岳人, 荒井均, 宮本祐介, 栗田光樹夫
「南極 10 m テラヘルツ望遠鏡主鏡パネルの基本設計」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 13. 菅谷元典, 瀬田益道, 中井直正, 永井誠, 石井峻, 新田冬夢, 今田大皓, 小野寺唯, 長崎岳人, 荒井均, 宮本祐介, 鶴澤佳徳, 関本裕太郎, 野口卓
「南極 10-m テラヘルツ望遠鏡ヘテロダイナ受信機系の基本設計」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 14. 長崎岳人, 瀬田益道, 中井直正, 永井誠, 石井峻, 今田大皓, 宮本祐介, 関本裕太郎
「世界最高性能を有する南極用 500GHz 帯ヘテロダイナ受信機系の開発」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 15. 馬路博之, 村岡和幸, 武田美保, 金子紘之
「近傍銀河における分子ガス中心集中度と星形成の関係」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 16. 石田裕之, 馬路博之, 長谷川豊, 西村淳, 木村公洋, 村岡和幸, 前澤裕之, 大西利和, 小川英夫, 南谷哲宏, 岩下浩幸, 宮澤千栄子, 諸隈佳菜, 西谷洋之, 高野秀路, 久野成夫, 中島拓, 金子紘之, 他 45m 鏡グループ
「野辺山 45m 電波望遠鏡新マルチビーム受信機「FOREST」の開発進捗 7」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 17. 南谷哲宏, 岩下浩幸, 宮澤千栄子, 諸隈佳菜, 西谷洋之, 神澤富雄, 高野秀路, 久野成夫, 石田裕之, 馬路博之, 長谷川豊, 村岡和幸, 小川英夫, 中島拓, 金子紘之
「野辺山 45m 鏡搭載 新マルチビーム受信機「FOREST」の開発進捗 6 : 2013 年度の進捗」
日本天文学会 (2014 年 3 月 20 日、国際基督教大学)
 18. 石井峻, 瀬田益道, 宮本祐介, 永井誠, 中井直正
「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡によるオリオン座 A 分子雲の CO(J=4-3)輝線観測」
日本天文学会 (2013 年 9 月 10 日、東北大学)
 19. 荒井均, 永井誠, 藤田真司, 中井直正, 他宇宙観測グループ一同(筑波大学), 栗原忍, 他宇宙測地グループ(国土地理院)
「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 2」

- 日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
20. 永井誠, 荒井均
「銀河系中心領域を想定したアンモニア反転遷移輝線6本による輻射強度モデルの比較」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 21. 宮本祐介, 中井直正, 久野成夫
「シアー運動が及ぼす巨大分子雲複合体(GMA)進化への影響」
日本天文学会 (2013年9月11日、東北大学)
 22. 宮本祐介, 瀬田益道, 中井直正, Salak Dragan, 萩原健三郎, 石井峻, 山内彩
「近傍銀河 NGC 3079 中心領域のアンモニア分子吸収線観測」
日本天文学会 (2013年9月12日、東北大学)
 23. Salak D., Nakai, N., Miyamoto, Y., and Koda, J.
「Observations of the Molecular Gas in M82」
日本天文学会 (2013年9月12日、東北大学)
 24. 泉拓磨, 河野孝太郎, 田村陽一, 谷口暁星, 高野秀路, Daniel Espada, 今西昌俊, M. T. Curran, 中井直正, 中島拓, 瀧崎智佳, 寺島雄一, 土居明広, 他
「ALMAによるNGC 1097中心領域の高密度ガス観測」
日本天文学会 (2013年9月12日、東北大学)
 25. 河野孝太郎, 泉拓磨, 田村陽一, 谷口暁星, S. Martin, 松下聡樹, P. Hsieh, D. Espada, 高野秀路, 今西昌俊, 原田ななせ, Eva Schinnerer, J.L. Turner, D.S. Meier, K. Fathi, K. Sheth, 中井直正, 中島拓, 瀧崎智佳, 寺島雄一, 土居明広, M. Krips, 他 NGC 1097 collaboration
「ALMAによるNGC 1097中心領域でのC₂H, HNC, HC₃N他の初検出」
日本天文学会 (2013年9月12日、東北大学)
 26. 坪井昌人, 朝木義晴, 米倉覚則, 金子紘之, 高羽浩, 亀谷收, 関戸衛, ほか SgrA* 毎日モニタグループ一同
「短基線VLBIによるSagittarius A*の2013年事象の観測 II : 最初の4ヶ月の結果」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 27. 瀬田益道, 中井直正, 永井誠, 石井峻, 宮本祐介, 今田大皓, 新田冬夢, 菅谷元典, 小野寺唯, 長崎岳人, 荒井均, 関本裕太郎, 野口卓, 南極天文コンソーシアム
「南極10m テラヘルツ望遠鏡計画」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 28. 菅谷元典, 瀬田益道, 中井直正, 永井誠, 石井峻, 宮本祐介, 今田大皓, 小野寺唯, 長崎岳人, 荒井均, 関本裕太郎, 野口卓, 鶴澤佳徳
「南極10-m テラヘルツ望遠鏡ヘテロダイン受信機系の概念設計」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 29. 長崎岳人, 瀬田益道, 中井直正, 永井誠, 石井峻, 土井畑幸一郎
「南極用小型冷却受信機熱設計の高精度検証」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 30. 馬路博之, 石田裕之, 西村淳, 木村公洋, 村岡和幸, 前澤裕之, 大西利和, 小川英夫, 南谷哲宏, 諸隈佳菜, 宮澤千栄子, 岩下浩幸, 西谷洋之, 梅本智文, 高野秀路, 久野成夫, 金子紘之, 中島拓, 他 45m 鏡グループ 「野辺山45m電波望遠鏡に搭載する新マルチビーム受信機「FOREST」開発の進捗5」
日本天文学会 (2013年9月10日、東北大学)
 31. 今田大皓, 中井直正, 瀬田益道, 永井誠, 宮本祐介, 石井峻, 荒井均, 長崎岳人, 新田冬夢, 小野寺唯, 川崎将平, 菅谷元典, 北本翔子, 小林和貴, 他南極天文コンソーシアム
「南極10m テラヘルツ望遠鏡開発の概要」

- 計測自動制御学会 (2013年12月19日、神戸国際会議場)
32. 関根正和、関本裕太郎、野口卓、宮地晃平、唐津謙一、新田冬夢、関口繁之、成瀬雅人
「Nb/Al 積層ハイブリッド型超伝導共振器カメラの歩留まり改善」
応用物理学会 (2013年9月17日、同志社大学)
 33. 関本裕太郎、野口卓、唐津謙一、新田冬夢、関根正和、関口繁之、岡田隆、成瀬雅人、宮地晃平、岡田則夫、三ツ井健司、松尾宏、木内等
「サブミリ波イメージング用超伝導カメラの開発」
日本赤外線学会 (2013年11月1日、防衛大学校)
 34. 唐津謙一、新田冬夢、関根正和、関口繁之、岡田隆、Shibo Shu、関本裕太郎、野口卓、鵜澤佳徳、松尾宏、木内等、成瀬雅人
「精密宇宙観測のための600素子超伝導共振器 (MKID) カメラの開発とその性能評価」
日本物理学会 (2014年3月27日、東海大学)
 35. 岡田隆、唐津謙一、関本裕太郎、新田冬夢、関根正和、関口繁之、Shibo Shu、野口卓、鵜澤佳徳、松尾宏、木内等、成瀬雅人
「宇宙線を利用したMKIDの準粒子寿命測定とLiteBIRDの宇宙線対策」
日本物理学会 (2014年3月27日、東海大学)
 36. Nagasaki, T., Seta, M., Shun, I., Naomasa, N., Nagai, M., “Development of a new receiver for the transportable 30-cm submillimeter-wave telescope”, 24th International Symposium on Space Terahertz Technology, April 8, 2013, SRON, TU Delft and University of Groningen, Netherlands.
 37. Salak, D., Nakai, N., Miyamoto, Y., Koda, J. “Molecular Gas in M82: NRO and CARMA Observations”, July 29 – August 1, 2013, summer conference “Phases of the ISM” at Max-Planck Institut für Astronomie, Heidelberg, Germany.
 38. Miyamoto, Y., Nakai, N., Kuno, N., “The Influence of Shear Motion on Giant Molecular Associations in Spiral Galaxies”, Oct. 21-24, 2013, Dynamics of Disk Galaxies, Korea.

<学位論文>

(博士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 長崎岳人

「Development of the Low Noise 500-GHz Heterodyne Receiver for Antarctic Telescopes」
(南極望遠鏡用低雑音 500GHz 帯ヘテロダイナ受信機の開発)

2. 新田冬夢

「Development of the Wide-Field Camera System Using Kinetic Inductance Detectors for the Antarctic Terahertz Telescope」
(南極テラヘルツ望遠鏡のための力学インダクタンス検出器を用いた広視野カメラシステム
の開発)

3. Dragan SALAK

「Galactic Winds in Nearby Starburst Galaxies: Observations of M82 and NGC 1808」
(近傍爆発的星形成銀河の銀河風: M82 と NGC1808 の観測)

(修士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 小野寺唯
「南極 10m テラヘルツ望遠鏡主鏡パネルの開発」
2. 川崎将平
「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の日中における光学ポインティングシステムの開発とその全自動化」
3. 菅谷元典
「南極 10m テラヘルツ望遠鏡ヘテロダイナ受信機系の開発」
4. 藤田真司
「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡のアンテナ基礎と指向性の研究」
5. 舟橋史祥
「水蒸気レーザー観測による 2 型セイファート銀河 NGC5495 の巨大質量ブラックホールとレーザー円盤の研究」
6. 鍋倉修英
「公開用アンモニア観測データベース検索解析システムの開発」

(卒業論文)

理工学群・物理学類

1. 朝倉健
「南極 10m テラヘルツ望遠鏡の電波カメラ受信機室の設計」
2. 田中伊織
「格子投影を用いた写真測量法によるアンテナ鏡面形状測定」

<外部資金>

1. 科学研究費補助金（基盤研究 A）：瀬田益道（研究代表者）、中井直正
「南極から探る銀河系の星間ダストの姿」
(交付額 390 万円) (4/4 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、宮本祐介
(交付額 45 万)
3. 国立極地研究所平成 24 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 268 万円) (4/6 年)
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
「南極における赤外線・テラヘルツ天文学の開発」
(交付額 567 万円 2 千円) (1/3 年)
5. 自然科学研究機構「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」中井直正（研究代表者）
「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 478 万 5 千円)

<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（2013年4月1日～2014年3月31日）

<受賞>

1. 筑波大学大学院博士後期課程・数理物質科学研究科長賞（2014年3月25日）
新田冬夢
2. VLBI懇談会シンポジウム第1回最優秀ポスター賞（2013年12月25日）
永井 誠
3. 電子情報通信学会チュートリアル論文賞（2013年5月14日）
真鍋武嗣、西堀俊幸、菊池健一、落合啓、瀬田益道、大嶺裕幸、「JEM/SMILES用サブミリ波アンテナ・受信機光学系」電子情報通信学会論文誌. B, 通信, 2012, J95B, 9. 990.

V. 原子核理論グループ

教授 矢花 一浩
准教授 寺崎 順 (HPCI 戦略プログラム分野5)
講師 橋本 幸男
研究員 谷口 億宇 (計算科学研究センター)
大学院生 5 名

【1】 時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) による物質中の電子ダイナミクス計算

光科学のフロンティアの一つに、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分野がある。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る。この光破壊プロセスは、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。このような極限的なパルス光と物質の相互作用をどのように理論的に記述するのか、またどのような応用の可能性があるのかを明らかにすることが課題となっている。

我々は極限的なパルス光と物質の相互作用に対して、実験研究との密接な連携のもと、光電場により生じる電子ダイナミクスを TDDFT に基づく第一原理計算で記述し、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で起こる素過程を明らかにすることを目標に研究を進めている。開発を進めている TDDFT に基づく電子ダイナミクス計算コードの核となるのは、与えられたパルス光電場が引き起こす単位セル中の電子軌道の時間変化の計算である。この単位セル計算から、パルス光による電子ダイナミクスを実時間・実空間で記述し、電子励起の様相を明らかにすることができる。また、この単位セル計算は、入力となる光電場に対して結晶中を流れる電流密度を求めることから、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巨視的電磁気学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) の構築に成功している。この新奇なシミュレーション法は、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。

(1) 高強度パルス光と誘電体薄膜の相互作用 (李 (APRI、韓国)、佐藤、篠原、乙部 (原研)、矢花)

SiO_2 の薄膜及びバルク結晶に高強度パルス光が照射する場合の極限的な光応答に関し、Maxwell+TDDFT マルチスケールシミュレーションによる解析結果を論文にまとめた。通常の光学では、薄膜の厚さが光波長の $1/2$ 、 $1/4$ 等の場合に表面と裏面における反射波の干渉が起き、この干渉は多層膜ミラーなどに応用されている。本研究では、光強度が増すにつれて非線形相互作用のために干渉効果が消失する様子を明らかにした。また、パルス光から電子へのエネルギー移送により、薄膜にどのようなエネルギー分布を生じるかを明らかにし、光破壊の閾値エネルギーに対する見積もりを与えた。この計算は、京コンピュータの試験利用を用いて得られた成果である。

(2) 高強度パルス光により透明誘電体に生じる超高速電流の生成メカニズム (Wachter 他 (ウィーン工科大)、佐藤、矢花、トン (計科セ))

最近、透明な誘電体である SiO_2 の表面に高強度パルス光を照射すると、フェムト秒程度の短い時間スケールで表面にキャリアが生じ電流が流れることが実験的に示され、注目されている。我々は、TDDFT に基づく第一原理計算により、高強度パルス光の SiO_2 への照射による電流発生メカニズム

を明らかにした。計算では実験で見出されているのと同様に、光破壊に近い強度で電流発生が示された。また、パルス光の照射中のみに起こる電荷移動と光照射後も存在する電流という、異なるメカニズムによる電流発生が見られた。

(3) 光破壊メカニズムの解明と閾値予測 (佐藤、篠原、乙部 (原研)、李 (APRI、韓国)、矢花、G.F. Bertsch(Univ. Washington))

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引き起こす電子励起を求めることができる。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過程を記述することが可能となると考えられる。SiO₂等の物質での予備的な検討を行い有望な結果が得られつつある。

(4) 高強度パルス光による物質の誘電応答変化に対する数値ポンプ・プローブ実験 (佐藤、篠原、乙部 (原研)、矢花、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

高強度パルス光を用いた実験では、しばしばポンプ・プローブ分光と呼ばれる実験手法が用いられる。これは、一つのパルス光をハーフミラー等を用いて時間差を持つ2つのパルス光に分け、最初のパルス光が物質を励起し、2番目のパルス光により励起した物質の性質を探る方法である。本研究では、ポンプ・プローブ分光を模した第一原理シミュレーションを遂行し、パルス光により電子励起した直後の物質の誘電的性質を調べた。高強度なパルス光により誘電体中に自由キャリアが生成し、それが物質の光応答を金属的に変化させる様子を明らかにすることができた。

(5) ハイブリッド汎関数を用いた電子ダイナミクス計算のGPU並列計算 (谷口、佐藤、篠原、矢花)

光電場により物質中に引き起こされる電子ダイナミクスを定量的に調べる上で、エネルギー汎関数の適切な選択は極めて重要である。絶縁体や半導体の場合、物質の電子構造と光応答を規定する最も基本的な物理量はバンドギャップであるが、最も単純な選択肢である局所密度近似を用いると、系統的にバンドギャップが過小評価されることは良く知られている。最近、メタGGAやハイブリッド汎関数など、密度だけではなく軌道の性質を取り入れた汎関数を用いることにより、局所密度近似によるバンドギャップ過小評価の問題のかなりの部分が解決されることが分かってきた。

ハイブリッド汎関数は、バンドギャップや誘電関数の記述に著しい改善を見せるものとして近年特に注目されているが、一方で局所密度近似と比較すると、計算コストが膨大なものとなる欠点がある。我々は、計算科学研究センターに導入された超並列GPU計算機であるHA-PACSを用いて、ハイブリッド汎関数を用いた電子ダイナミクス計算の高速化を試みた。ハイブリッド汎関数を用いる場合、比較的小さいサイズの3次元複素離散フーリエ変換を非常に多数回行うことが必要となる。この作業をGPU CUDAライブラリであるcufftを用いて実装する計算コードの開発を行った。

計算の結果、Si結晶の誘電関数を再現し、さらに高強度レーザー照射によって非線形応答である多光子吸収が現れることがわかった。また、計算時間を計測した結果、GPUライブラリcufftを用いると、標準的なCPUライブラリFFTW3に比べて1ノード(CPU: 16コア、GPU: 4)あたり8倍の速度で計算できることがわかった。

【2】原子核の励起状態

(1) ニュートリノレス二重ベータ崩壊における原子核行列要素のQRPA計算 (寺崎)

寺崎は、準粒子乱雑位相近似(QRPA)を用いて、ニュートリノ質量を決めるためのニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素の計算に平成23年度以来取り組んでおり、平成25年度には前年度に大部分完成していた必要な計算コードを大規模計算用に整備する段階が完了し、¹⁵⁰Nd-¹⁵⁰Sm

でQRPA 多体相関の原子核行列要素への新しい機構を通じた影響を示す興味深い結果を生みつつある。

本課題は平成24 下期-25 年度の「京」を含むHPCI システム共用計算資源の利用研究課題において「京」の一般利用に採択された。また平成26 年度から3 年間科研費基盤Cに採択されることが内定した。

もしニュートリノレス二重ベータ崩壊が観測されれば、原子核行列要素の二乗と電子の位相空間因子の積(理論計算)とその崩壊の寿命(実験測定)からニュートリノ質量の期待値が求められる。原子核行列要素は、ニュートリノポテンシャルの二体相互作用行列、始状態と終状態から求めた二種類のQRPA 励起中間状態の重複行列、始状態と終状態からQRPA 励起中間状態への二つの二核子移行遷移行列の積のトレースによって求められる。

本研究の特徴は三つある。最も強調されるのは、QRPA 基底状態は準ボソンの真空状態であるという定義を採用することにより、QRPA 相関を正しく取り込んだ重複行列要素計算を行うことである。この機構によりQRPA 相関は原子核行列要素を減少させる効果をもつ。第二に、完全性近似のもとで、二核子移行を経由する仮想反応を考えていることである。この方法により、荷電変化反応に対してQRPA はあまり良い近似でないという問題を避けることができる。第三に世界的に頂上級の並列計算機を用いることにより、できる限り波動関数空間の広い、精度の高い計算を行うことである。

これらの特徴をもつ方法により、Skyrme エネルギー密度汎関数(SkM*)と体積型対エネルギー密度汎関数を用いて、 ^{150}Nd - ^{150}Sm において1.89 という原子核行列要素の数値が得られた。今までに行われたいくつかの方法による計算値はおおよそ1.9-2.5の範囲にあり、本研究の値は比較的小さいといえる。また、従来のQRPA 計算では、二つのニュートリノを放出する二重ベータ崩壊のデータを再現するように陽子・中性子対エネルギー密度汎関数が導入され、この処方箋は原子核行列要素の値を減少させる効果をもつのであるが、本研究ではこの処方箋を用いていない。用いられる核がかなり中性子過剰だからである。現象論的陽子・中性子対エネルギー密度汎関数なしに、本来のQRPA 基底状態の定義によりQRPA 相関を取り入れて小さい原子核行列要素の値が得られたという点が興味深い。本研究により、30 年以上もの間未解決となっているQRPA と殻模型による原子核行列要素計算値の系統的不一致問題の突破口が開かれた可能性が高い。

寺崎は、平成24 年度以来の研究と並ぶ業務であるHPCI 戦略プログラム分野5 のユーザー支援活動にも積極的に従事した。平成25 年度は、ユーザー支援(物理にまで踏み込んだプログラム相談)の窓口ならびに連絡業務に加え、HPCI 戦略プログラムの主催または共催するふたつの研究会でユーザー支援の広報発表を行った。

(2) 多Slater 行列式の重ね合わせによる軽い原子核のクラスター状態の記述(福岡、矢花、船木(理研)、中務(理研))

乱雑な初期配置を持つ波動関数を虚時間発展させると、基底状態へと至る過程でさまざまなクラスター状態が現れる。この過程で現れる Slater 行列式を重ね合わせ、さらにパリティ及び角運動量射影を行うことにより、軽い原子核のクラスター状態を記述することを試みている。 ^{12}C 原子核に対しては論文を出版し、さらに ^{16}O 、 ^{20}Ne 原子核に対する計算を進めた。

(3) Gogny 力を用いた時間依存平均場計算(橋本)

原子核の集団運動を記述する方法の中でも時間依存平均場の方法は、理論的な枠組みの展開においても、また、実際の現象に対応した定性的・定量的な説明・記述を行ううえでも中心的な役割を果たしてきた。時間依存平均場の方法の中では、時間依存ハートレーフォック(TDHF)が広く用いられている。TDHFは、スキルム有効相互作用を用いた密度汎関数理論として位置づけられ、計算機の能力向上によって核図表上の広い範囲の原子核を対象とした応用が可能になっている。T

DHFは、ゼロレンジの力であるスキルム有効相互作用と3次元空間格子の組み合わせにより、計算コードがシンプルで適応範囲の広いツールとなった。最近では、中性子過剰核のダイナミクスにおける対相関の役割を研究するために、空間格子によるスキルム力+時間依存ハートレーフォックボゴリョボフ (TDHFB) の枠組みが提案されている。一方、ゴグニー有効相互作用は、そのレンジが有限の大きさを持つことで、平均場計算に用いられる基底はもっぱら調和振動子基底であった。そこで、連続状態と束縛状態の間に対相関が働く中性子過剰核の運動を記述するうえでは空間格子が便利であることに着目し、ゴグニー有効相互作用でも空間格子を用いた平均場計算が可能な枠組みを作ることを目指している。ゴグニー有効相互作用の場合には、ガウス型の相互作用形のおかげで対相関の働く空間に自然なカットオフが入る点がメリットである。一方、有限なレンジのために、2体相互作用の行列要素の計算にCPU時間をとられることになる。

2013年度は、ラグランジュ格子点を用いたTDHFBのコードにより、対相関のある球形核の代表として酸素 ^{20}O 、また、変形核の代表としてマグネシウム ^{34}Mg を対象とするHFB計算を行った。時間依存計算のために、格子間隔と基底状態のエネルギーとの関係、さらにゴグニー力に含まれる各要素(ガウス型2体力、密度依存力、LS力など)のエネルギーと格子間隔との関係を押さえた。時間依存計算においては、エネルギーと粒子数期待値を保存させる方法の開発に時間がかかったが一定の精度を出せるようになった。これによってTDHFB計算が可能になり、酸素 ^{20}O 、マグネシウム ^{34}Mg について、軸対称四重極型振動運動の強度関数を求めることができた。同時に、対相関を持つ原子核同士の衝突を扱う方法の開発を開始した。

(4) 励起状態に現れる変形状態とクラスタ相関 (谷口)

原子核は励起により多彩に構造が変化する。低励起状態では変形構造とクラスタ構造が重要である。クラスタ構造は、原子核が複数の塊に分かれて局在した、空間的な相関の強い構造である。本年度は $^{33-36}\text{S}$ の超変形状態の構造の研究を行った。

硫黄同位体のうち陽子数と中性子数が等しい ^{32}S には、 ^{16}O - ^{16}O クラスタ構造を多く含む超変形状態が存在することが理論的に予想されている。似た構造として、ベリリウム8の基底状態の α - α クラスタ構造がある。ベリリウム同位体の中性子過剰核には、 α - α クラスタ構造の周りに余剰中性子が分布した構造が基底状態やその近傍に現れることが知られている。従って、硫黄同位体には、 ^{16}O - ^{16}O クラスタ構造の周りに余剰中性子が分布した超変形状態が系統的に存在することが期待される。

$^{33-36}\text{S}$ の様々な変形構造波動関数を重ねあわせた結果、それらの核には超変形状態が系統的に存在し、それらはクラスタ描像では $160 + 160$ クラスタと、その周りに余剰中性子が $160 + 160$ 芯が作る分子軌道に入った構造と理解されることがわかった。

(5) エネルギー変分を用いた断熱核間ポテンシャルの導出と低エネルギー核融合 (谷口、延与 (京都大学)、須原)

核反応研究において、核間ポテンシャルは基礎となり重要である。しかし、核子間力から核間ポテンシャルを微視的に導出する手法は確立していない。そのためには核の構造変化を微視的に扱うことが必要である。

谷口や須原らは、核間距離を拘束条件としてエネルギー変分して、得られたエネルギーから各核の基底状態のエネルギーの和を引くことにより、核間ポテンシャルを導出する方法を開発した。この手法は、核間運動が核子の運動よりも遅い断熱近似に相当する。

その手法により得られた断熱核間ポテンシャルを $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{18}\text{O}$ 低エネルギー核融合断面積の導出に応用した。それぞれの核融合断面積の衝突エネルギーの依存性が再現され、それによりこの断熱核間ポテンシャルの妥当性が確認された。また、 $^{16}\text{O} + ^{18}\text{O}$ は $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ に比べて核融合断面積が大きくなるが、それは ^{18}O の2余剰中性子の構造変化に起因することがわかった。

【3】原子核の反応

(1) トリプルアルファ反応率の虚時間理論 (赤堀、矢花、船木 (理研))

我々は光放出を伴う融合過程に対して新しい理論的枠組みである虚時間理論を提唱し、この理論を用いたトリプルアルファ過程の研究を行っている。トリプルアルファ過程は、電荷を持つ3粒子の散乱過程を扱う必要があること、また3体量子トンネル過程であり興味を持たれる 1GK から 0.01GK の範囲で反応率が 10^{60} も変化することなどから、理論的記述は困難を極めており、最近5年間に発表された論文においても、反応率は実に低温で 10^{26} に及ぶ差異がある。我々は、虚時間理論を用いることにより、容易に収束した反応率が得られることを示し、その結果は標準的な反応率として NACRE で採用されている値に極めて近いことを示した。

さらに、R 行列理論と虚時間理論を組み合わせることにより、3体ハミルトニアンに分離型近似を仮定すると、NACRE で用いられている解析式に極めて近い表式が得られることを明らかにし、経験的な反応率の表式に対する微視的根拠を与えた。数値的にも分離型近似は良い近似となっていることを示した。これらの結果を論文にまとめ、投稿中である。

(2) TDHF 計算による多核子移行反応の記述 (関澤、矢花)

粒子数射影の方法を用いた、多核子移行反応断面積に対する TDHF 計算の結果を論文にまとめ発表した。TDHF 計算で得られる終状態の原子核は励起しており、実験で得られている断面積とより正確な比較をするためには粒子放出の効果を取り入れる必要がある。このため、粒子数射影後の波動関数に対してエネルギー期待値を計算する方法を開発し、粒子放出効果の影響を調べた。

^{238}U を含む原子核衝突では、多数の陽子が移行する過程が測定されている。この理由について、TDHF 計算により調べた。その結果、陽子移行を伴う過程は、変形核である ^{238}U の変形方向と衝突軸との相対角度に強く依存することが分かった。prolate 変形した ^{238}U の尖った部分が標的核にぶつかる時、ネック領域が発達し、多くの核子移行が見出される。一方、 ^{238}U の腹の部分に標的核がぶつかると、ネックはあまり発達せず、多くの核子が移行する過程は見出されないことが明らかとなった。

<学位>

1. 理学博士:

岡本 稔 Three-dimensional calculation of non-uniform structures in low-density nuclear matter and neutron star by a relativistic mean field model

福岡佑太 Deformation and cluster structures in light nuclei studied with configuration mixing using Skyrme interaction

2. 理学修士:

佐藤駿丞 Theoretical study on optical properties of solids excited by ultra-short laser pulses

<発表論文>

1. First-principles simulation of the optical response of bulk and thin-film α -quartz irradiated with an ultrashort intense laser pulse

- Kyung-Min Lee, Chul Min Kim, Shunsuke A. Sato, Tomohito Otobe, Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Tae Moon Jeong
J. Appl. Phys. 115, 053519 (2014).
2. Low-energy E1 strength in select nuclei: Possible constraints on neutron skin and symmetry energy
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Phys. Rev. C88, 051305 (2013)
 3. Numerical pump-probe experiments of laser-excited silicon in nonequilibrium phase
S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch
Phys. Rev. B 89, 064304 (2014).
 4. Massively-parallel electron dynamics calculations in real-time and real-space: Toward applications to nanostructures of more than ten-nanometers in size
M. Noda, K. Ishimura, K. Nobusada, K. Yabana
J. Comp. Phys. 265, 145 (2014).
 5. Ab-initio simulation of optical-field induced currents in dielectrics
Georg Wachter, Christoph Lemell, Joachim Burgdörfer, Shunsuke A. Sato, Xiao-Min Tong, Kazuhiro Yabana
arXiv:1401.4357 [cond-mat.mtrl-sci] , submitted to Phys. Rev. Lett.
 6. Imaginary-time theory for triple-alpha reaction rate
T. Akahori, Y. Funaki, K. Yabana
arXiv:1401-4390
 7. Computational Nuclear Quantum Many-Body Problem: The UNEDF Project
S. Bogner, A. Bulgac, J. Carlson, J. Engel, G. Fann, R.J. Furnstahl, S. Gandolfi, G. Hagen, M. Horoi, C. Johnson, M. Kortelainen, E. Lusk, P. Maris, H. Nam, P. Navratil, W. Nazarewicz, E. Ng, G.P.A. Nobre, E. Ormand, T. Papenbrock, J. Pei, S. C. Pieper, S. Quaglioni, K. Roche, J. Sarich, N. Schunck, M. Sosonkina, J. Terasaki, I. Thompson, J.P. Vary, S.M. Wild,
Computer Physics Communications 184, 2235 (2013)
 8. Deformation and cluster structures in ^{12}C studied with configuration mixing using Skyrme interactions
Y. Fukuoka, S. Shinohara, Y. Funaki, T. Nakatsukasa, and K. Yabana
Phys. Rev. C 88, 014321 (2013).
 9. Time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov calculations using a Lagrange mesh with the Gogny interaction
Y. Hashimoto
Phys. Rev. C88, 034307 (2013)

10. A description of t-band in 182Os with generator coordinate method,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
INFORMATION, Vol. 17, No. 2, 429 - 434 (February 2014).
11. Adiabatic internuclear potentials obtained by energy variation with the internuclear-distance constraint
Yasutaka Taniguchi, Yoshiko Kanada-En'yo, Tadahiro Suhara
Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 043D03 (2013)
12. Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes in $^{40}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$, $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, and $^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ reactions
K. Sekizawa, K. Yabana
Phys. Rev. C 88, 014614 (2013)
13. Nuclear “pasta” structures in low-density nuclear matter and properties of the neutron-star crust
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
Phys. Rev. C 88, 025801, 2013

<国際会議発表>

1. Multiscale description for strong electromagnetic fields in solids
K. Yabana
Gordin Research Conference on TDDFT, Univ. New England, Biddeford, ME, Aug. 11-16, 2013.
2. Light-matter interactions in time-dependent density functional theory
K. Yabana
Advances in time-dependent methods for quantum many-body systems, ECT*, Trento, Italy, Oct. 14-18, 2013.
3. Imaginary-time theory for triple-alpha reaction rate
K. Yabana
12th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), Tsukuba, Nov. 18-22, 2013.
4. Imaginary-time theory for triple-alpha reaction rate
K. Yabana
Workshop on large-scale computational methods applied to multi-particle resonances and astrophysical reaction problems in few-body systems, RIKEN, Wako, Oct. 21-25, 2013.
5. First-principles description of strong electromagnetic fields in solids
K. Yabana
Invited talk at focus session: Computer Simulation of Interaction of Electromagnetic fields and Nanostructures, APS Meeting 2014, Colorado Convention Center, Denver, USA, Mar. 3-7, 2014.
6. Maxwell + TDDFT multiscale simulation for strong electromagnetic fields in solids
K. Yabana
Quantum Dynamics Research Meeting, Vanderbilt University, Nashville, USA, Mar. 10-12, 2014.
7. Imaginary time theory for triple-alpha reaction rate

- K. Yabana
International Molecule-type Workshop on New Correlations in Exotic Nuclei and Advances of Theoretical Models, YITP, Kyoto Univ, Mar. 10-23, 2014.
8. Relation between pairing gaps and transition probabilities in ^{132, 136}Te
J. Terasaki
XX International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Applications, September 16-21, 2013, Varna, Bulgaria
 9. Effect of QRPA correlations to nuclear matrix element of neutrinoless double-beta decay through overlap matrix
J. Terasaki
International molecule-type workshop on new correlations in exotic nuclei and advances of theoretical models, March 10-23, 2014, Kyoto
 10. Parallel-GPU calculation of electron dynamics using a hybrid density functional
Y. Taniguchi, S.A. Sato, Y. Shinohara, K. Yabana
Quantum Dynamics Research Meeting, March 10-12, 2014, Vanderbilt University, Nashville, USA
 11. Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes
K. Sekizawa, K. Yabana
VI International Conference on Fusion and allied reactions around Coulomb barrier "FUSION14", Feb. 24-28, 2014, Inter University Accelerator Centre (IUAC), New Delhi, India
 12. Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes
K. Sekizawa, K. Yabana
JUSTIPEN-JUSEIPEN Workshop, Dec. 9-12, 2013, RIKEN, Wako, Japan
 13. Time-dependent Hartree-Fock calculation for multinucleon transfer processes in heavy-ion reactions
K. Sekizawa, K. Yabana
A ECT* Workshop on "From nuclear structure to particle-transfer reactions and back", Nov. 4-8, 2013, ECT*, Trento, Italy
 14. Time-dependent Hartree-Fock Calculations for Nuclear Multi-nucleon Transfer Processes
K. Sekizawa, K. Yabana
A ECT* Workshop on "Advances in time-dependent methods for quantum many-body systems", Oct. 14-18, 2013, ECT*, Trento, Italy
 15. Quasi-fission Dynamics in Time-dependent Hartree-Fock Theory (ポスター)
K. Sekizawa, K. Yabana
12th CNS International Summer School, Aug. 28 - Sept. 3, 2013, RIKEN Nishina Center, Wako, Japan
 16. Real-time TDDFT calculation for electron dynamics in crystalline solids
Shunsuke A. Sato
Quantum Dynamics Research Meeting, March 10-14, 2014, Nashville, United states of America
 17. Real-time and real-space TDDFT calculation for electron dynamics in crystalline solids
Shunsuke A. Sato,

CMSI International Symposium Satellite Meeting "Novel Electronic Structure Method", October 18-19, 2013, Tokyo, Japan

18. Maxwell + TDDFT multi-scale simulation for laser-matter interaction
Shunsuke A. Sato, Kazuhiro Yabana,
JSSST 2013 International Conference on Simulation Technology, September 11-13, 2013, Tokyo, Japan
19. TDDFT calculations for dielectric properties of laser-excited silicon
S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch,
Gordon Research Conferences: Time-Dependent Density-Functional Theory, August 11-16, 2013, Biddeford, United States
20. First-principles calculation for dielectric properties of laser-excited Si
S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch,
The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, July 22-26, 2013, Matsue, Japan
21. Ab-initio electron dynamics simulation for laser-excited solids
S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch,
The 12th Asia Pacific Physics Conference, July 14-19, 2013, Chiba, Japan
22. First-principles calculation for optically induced dense electron-hole excitations in semiconductor
S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch,
Emergent Quantum Phases in Condensed Matter, June 12-14, 2013, Chiba, Japan

<国内研究会・学会等>

1. 極限的パルス光と結晶の相互作用を記述する第一原理計算
矢花一浩
新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」平成25年度第一回研究会、東大武田先端知ビル、2013年7月8-9日
2. 非共鳴領域におけるトリプルアルファ反応率の理論的記述
矢花一浩、赤堀孝彦、船木靖郎
日本物理学会秋の分科会、高知大学朝倉キャンパス、2013年9月21日
3. 電子ダイナミクス計算と巨視的電磁気学
矢花一浩
第3回戦略プログラム分野2×分野5異分野交流研究会「量子多体系のダイナミクス計算—原子核から物質科学まで—」、分子科学研究所、2013年11月13-14日

4. 高強度パルス光と物質の相互作用に対する第一原理計算—フェムト秒時間スケールの電子ダイナミクス・シミュレーション—
矢花一浩
物性科学領域横断研究会、東京大学、2013年12月1-2日
5. 変形超流動原子核における素励起モード・応答関数の研究（ポスター）
中務孝、藏増嘉伸、数納広哉、江幡修一郎、稲倉恒法、寺崎順
平成25年度「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題中間報告会、タイム24ビル、東京、2013年10月2-3日
6. 密度汎関数理論の二重ベータ崩壊原子核行列要素への応用（ポスター）
寺崎 順
第5回「学際計算科学による新たな知の発展・統合・創出」シンポジウム、筑波大学、つくば、2013年11月5-6日
7. ユーザー支援のご案内
寺崎 順
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会、旅館すがわら、大崎、2013年12月20-21日
8. 分野5ユーザー支援の紹介
寺崎順
第9回CMSI若手技術交流会、ホテル水葉亭、熱海、2014年1月28-30日
9. Calculation of nuclear transition matrix elements of neutrinoless double-beta decay
寺崎 順
第9回CMSI若手技術交流会、ホテル水葉亭、熱海、2014年1月28-30日
10. ユーザー支援報告
寺崎 順
平成25年度HPCI戦略プログラム分野5全体シンポジウム、富士ソフトアキバプラザ、東京、2014年3月3-4日
11. Calculation of nuclear transition matrix elements of neutrinoless double-beta decay using QRPA
寺崎 順
平成25年度HPCI戦略プログラム分野5全体シンポジウム、富士ソフトアキバプラザ、東京、2014年3月3-4日
12. ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素に対するQRPA相関の効果
寺崎 順
日本物理学会 第69回年次大会、東海大学、平塚、2014年3月27-30日

13. Lagrange 格子を用いた Gogny-TDHFB による線形応答計算
橋本幸男
日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス、2013 年 9 月 20 日-23 日)
14. Study of t-band in 182Os with cranked three-dimensional Hartree-Fock-Bogoliubov method
Y. Hashimoto and T. Horibata,
The Sixth International Conference on Information (May 8 - 11, 2013, Hotel Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan)
15. S 同位体の励起状態の変形の発達とクラスタ構造
谷口億宇
日本物理学会年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学
16. ハイブリッド汎関数による電子ダイナミクスの並列 GPU 計算
谷口億宇, 佐藤駿丞, 篠原康, 矢花一浩
日本物理学会秋季大会, 2013 年 9 月 25-28 日, 徳島大学
17. 硫黄同位体の超変形状態とクラスタ相関
谷口億宇
日本物理学会秋季大会, 2013 年 9 月 20-23 日, 高知大学
18. sd 及び pf 殻領域における超変形状態とクラスタ相関
谷口億宇
RCNP 研究会「核子・ハイペロン多体系におけるクラスター現象」, 2013 年 7 月 26-27 日, KGU 関内メディアセンター
19. ^{238}U を伴う多核子移行反応過程の TDHF 計算
関澤一之, 矢花一浩
日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県平塚市, 2014 年 3 月 27-30 日
20. TDHF 計算による多核子移行反応の研究
関澤一之, 矢花一浩
第 3 回 HPCI 戦略プログラム 分野 2×分野 5 異分野交流研究会
“量子多体系のダイナミクス計算 -原子核から物質科学まで-”,
自然科学研究機構 分子科学研究所, 愛知県岡崎市, 2013 年 11 月 13 日-14 日
21. 密度汎関数理論に基づく原子核ダイナミクスの研究 (ポスター)
関澤一之, 矢花一浩, 橋本幸男
平成 25 年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 中間報告会, タイム 24 ビル, 東京都江東区, 2013 年 10 月 2 日-3 日
22. 準核分裂ダイナミクスの TDHF 計算
関澤一之, 矢花一浩
日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学朝倉キャンパス, 高知県高知市, 2013 年 9 月 20 日-23 日

23. 時間依存平均場理論による多核子移行反応の研究 (口頭及びポスター)
関澤一之, 矢花一浩
2013 年度三者若手夏の学校, ホテルたつき, 愛知県蒲郡市, 2013 年 8 月 4 日-9 日
24. 時間依存平均場計算による多核子移行反応の研究
関澤一之, 矢花一浩
原子核研究・2013 年夏の学校特集号, Vol. 58, Suppl. 2, pp. 45-47, 2014 年 1 月
25. パスタ構造と中性子星クラスト物質の力学的性質
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学、2013 年 9 月 20 - 23 日
26. “原子核パスタ” と中性子星クラスト
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
原子核研究 4 月、基研研究会「ハドロン物理の諸相と状態方程式 - 中性子星の観測に照らして -」報告集、pp. 17-20、2013 年
27. レーザー加工現象における初期過程の第一原理計算
佐藤 駿丞、李畊旻、篠原康、乙部智仁、矢花一浩
日本物理学会 第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 27 日-30 日
28. Theoretical study on optical properties of dielectrics near optical break-down
Shunsuke A. Sato
第 14 回光量子科学シンポジウム,
日本原子力研究開発機構, 関西光科学研究所 2013 年 11 月 14 日-15 日
29. 様々な密度汎関数を用いた固体中の電子ダイナミクス計算
佐藤 駿丞、篠原康、谷口億宇、矢花一浩
日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学 2013 年 9 月 25 日-28 日

<集中講義>

東京工業大学集中講義「物性物理学特論第九」

矢花一浩

2013 年 6 月 26 日、7 月 3 日、10 日

<セミナー>

1. トリプルアルファ反応率の虚時間理論
矢花一浩
東工大量子物理学ナノサイエンス第 7 4 回セミナー、2013 年 7 月 3 日
2. 物質中を伝播する高強度パルス光の理論的記述
矢花一浩

東工大量子物理学ナノサイエンス第75回セミナー、2013年7月10日

3. First-principles theory of a strong electromagnetic field in solids
K. Yabana
Seminar at CNR S3, Modena, Italy, Oct. 21, 2013.
4. First-principles theory of a strong electromagnetic field in solids
K. Yabana
Seminar at Vanderbilt University, Nashville, USA, Dec. 9, 2013.
5. First-principles theory of a strong electromagnetic field in solids
K. Yabana
Seminar at Molecular Foundry, LBNL, USA, Dec. 12, 2013.
6. Cluster correlations in deformed states
Y. Taniguchi
RIKEN, Nov. 6, 2013
7. TDHF 計算による多核子移行反応の研究
関澤一之, 矢花一浩
第916回九大原子核セミナー, 九州大学箱崎キャンパス, 福岡県福岡市, 2014年3月3日
8. Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes
K. Sekizawa, K. Yabana
A seminar at INFN-LNL, Oct. 22, 2013, Legnaro, Padova, Italy

<一般対象の講演>

教員免許状更新講習「物質の起源と量子の世界」

矢花一浩

筑波大学、2013年7月28日

VII-1. 非平衡統計物理グループ

教授	有光 敏彦
助教	吉田 恭
博士後期課程大学院生	小松崎 慎人, 武智 公平, 大日向 正志, 真山 祐児, 阿部 将大
博士前期課程大学院生	小口 拓郎, 酒井 一樹
研究留学生	Abdumawla Sabaa Talala A.
(2013年4月時点)	

【1】 間欠性を呈する流動系の非平衡統計物理

- (1) 充分発達した乱流のマルチフラクタル確率密度関数理論による解析 (武智 (院生), 有光直子 (横浜国大), 有光) 講演 [3]

Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) は『間欠性の本質は、Navier-Stokes 方程式のスケール不変性に起因する速度場の特異性が実空間にマルチフラクタル分布していることの現れである』との仮説に基づいて、裾引き確率密度関数 (PDF) を解析する理論表式を提供する。これにより、PDF の有する情報を高精度で抽出することが可能となった。MPDFT では、PDF の裾野部分には、coherent な乱流運動 (Reynolds 数無限大の極限で得られる特異点が呈する運動) のみが寄与すると仮定 (近似) し、一方、中心部分には、N-S 方程式の散逸項の存在に基づく in-coherent なゆらぎ運動の寄与と coherent な運動が合わさって寄与するという観点での解析が行われる。現時点で世界一のサイズ 4096^3 大規模乱流直接数値シミュレーション (DNS) データを有する名古屋大学の金田・石原グループから DNS スナップショット速度場生データの提供を受け、それよりエネルギー散逸率 PDF とエネルギー輸送率 PDF を抽出した。それらの PDF を MPDFT で得られた理論的 PDF により解析し、PDF の裾部分と中心部分の有する情報の抽出を行い、それらの部分の解析を進めた。その結果、渦の混んでいる領域の PDF には、『乱流のコヒーレントな運動 (乱流系全体から抽出した PDF の裾野部分)』に関する情報が含まれ、渦の空いている領域の PDF には、『乱流に特有なインコヒーレントな運動 (乱流系全体から抽出した PDF の中心部分)』に関する情報が含まれることがわかった。つまり、『間欠性に由来する PDF 裾野部分』と『NS 方程式のスケール変換不変性を破る項 (散逸項) に由来する PDF 中心部分』に分けて解析するという MPDFT の仮説の妥当性が、検証された。

一方で、金田・石原らの大規模一様等方性乱流 DNS によって得られた格子点数 4096^3 の乱流場を 512 個の格子点数 512^3 の小領域に分割して、それぞれの小領域内で直径 r (相関長より充分小さい) の球で局所平均したエネルギー散逸場 ϵ_r の PDF の調査を進めた。大スケールのエネルギー散逸率の強い領域の疎密は ϵ_r の小領域内平均 $\bar{\epsilon}_r$ と関係する。各小領域で規格化された局所平均エネルギー散逸率 $\epsilon_r/\bar{\epsilon}_r$ の統計を 2 次モーメント、高次モーメント、PDF の裾引きなどの指標で調べたが、 $\bar{\epsilon}_r$ の値 (つまり大スケールの疎密) との相関は弱いことが明らかとなった。前述の MPDFT による解析との詳細な関連は今後の課題である。

- (2) δ^∞ 不安定周期軌道のベキ的不安定性と Ljapunov 指数 (小松崎 (院生), 本池巧 (駿河台大), 有光)

MPDFT の『乱流とは全ての δ スケール・Cantor 集合と同等な階層構造を持つ渦構造の重ね合わせと見做すことができる』という仮説の検証を目的に、1 次元離散力学系における $\delta^K (K \gg 1)$ 周期軌道の階層構造と不安定性の関係の解析を行っている。 δ^K 超安定周期軌道 (δ^K -PSSO) は、系がカオス状態となる制御パラメータ領域内の δ 周期の窓の中に存在する。 δ 周期の窓に内包される δ^K 周期の窓の無限の入れ子構造を反映し、 δ^K -PSSO は δ スケール・Cantor 集合と同じマルチフラクタル構造を持ち、累積軌道拡大率が

冪的に増大するという特徴を持つ。この軌道の中の間欠性が顕著な領域に関して、累積軌道拡大率の冪的不安定性の冪指数 $1/(1-q)$ が $1/(1-q) = (1/\alpha_- - 1/\alpha_+) \ln \delta / \ln(2 - 1/\delta)$ というスケーリング関係式に従うことが明らかとなっている。ただし、 α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は δ^K -PSSO のマルチフラクタルスペクトル $f(\alpha)$ の零点である。

δ^K -PSSO は、 δ 毎に異なるパラメータ領域で単独で存在し、軌道毎に α_{\pm} が異なる。これは、MPDFT の仮説とは異なる状況である。MPDFT の仮説を検証するには、すべての周期軌道が共存する充分発達したカオス状態に於いて、 δ^K 周期軌道を解析する必要がある。

ロジスティック写像の δ^K ($\delta = 2, 3, 4$) 不安定周期軌道の Ljapunov 指数 $\lambda(\mu, \delta)$ の不安定化直後から充分発達した領域までの結果を、最小二乗法によりフィッティングした結果より、Ljapunov 指数の μ および δ 依存性が

$$\lambda(\mu, \delta) = \ln(1 + \bar{\mu}^{1/\delta}) \quad (1)$$

となるという予想が得られた。ただし、 $\bar{\mu} = (\mu - \tilde{\mu}_K^{(\delta)}) / (\mu_{FD} - \tilde{\mu}_K^{(\delta)})$ で $\tilde{\mu}_K^{(\delta)}$ および μ_{FD} は、それぞれ δ^K 周期軌道が不安定化する μ の値および充分発達したカオス領域の μ の値である。充分発達したカオス状態 ($\mu = \mu_{FD}$) では、ロジスティック写像はテント写像の位相共役で表すことが可能である。 $\mu \sim \mu_{FD}$ に於けるロジスティック写像のテント写像との位相共役からのずれを $(\bar{\mu} - 1)$ の 1 次のオーダーで求めた結果、Ljapunov 指数の μ, δ 依存性が解析的に

$$\lambda(\mu, \delta) = \ln [2(1 + A(\bar{\mu} - 1)/\delta)] \quad (2)$$

となることを導き出した。 A は、 μ および δ にはよらない定数である。(2) 式より、数値計算から予想される Ljapunov 指数 $\lambda(\mu, \delta)$ の μ, δ 依存性を表す (1) 式は、充分発達したカオス状態の近傍で、 $(\bar{\mu} - 1)$ の 1 次のオーダーで解析的に正しいことが示された。

本年度は、(2) 式より得られる δ^K -PSSO の階層構造の解析を行った。その結果、 δ^K -PSSO の階層構造が、不安定化直前は指数型のスケーリング特性であったものが、充分発達したカオス領域では二重指数型へと変化する様子が明らかとなった。このような階層構造の変化から、不安定化直前のスケーリング関係式の μ 依存性を明らかにすることが目下の課題である。

(3) 量子流体乱流の統計法則 (吉田, 有光) 論文 [1], 講演 [1, 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。昨年度までの我々の研究を含め、GP 方程式に従う量子流体乱流の数値シミュレーションが複数の研究者によって行われているが、そのエネルギースペクトルの性質について見解の一致が見られる段階にはまだ至っていない。

本研究では、GP 方程式に完結近似の解析手法を適用した。完結近似の手法、特に Lagrange 変数に基づくその方法は、古典流体において実験とも整合する Kolmogorov のエネルギースペクトルを導くことが知られていたが、量子流体乱流にはこれまでは適用されていなかった。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 ψ の 2 点相関関数および応答関数で式を選び、その完結近似方程式を導いた。

完結近似方程式は、GP 方程式中で線形項が支配的で非線形項が十分小さい場合には、その範囲で有効な弱波動乱流理論の式と一致することが示された。完結近似方程式の特徴は、弱波動乱流理論の適用範囲外の強乱流状態つまり非線形項が支配的である場合にも適用可能だということである。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、であり、このべき則は先行研究の数値シミュレーションの結果とも整合している。また完結近似の理論解析では、統計的定常性を維持するために k^{-2}

則に補正項が必要であることが示唆された。完結近似理論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。

(4) 自己重力流体乱流の統計法則 (吉田)

互いの重力で相互作用する N 質点系は、連続体近似で自己重力流体系となる。宇宙空間の質量密度分布の解析において、あるスケール領域では、自己重力流体系が妥当な近似となる。本研究では、自己重力流体系の統計量について、Lagrange 変数に基く完結近似の適用を行っている。今後、通常の流体の乱流のようなエネルギーカスケードを示す解が存在するか、またその解の振舞いなどを調べる予定である。

(5) 乱流燃焼における燃料密度スペクトルの解析 (小口 (院生), 吉田) 学位論文 [1]

エンジン内部等の燃焼において流体は乱流状態にあり、乱流が燃焼に与える影響を理解することは、乱流を制御して燃焼の効率を上げる工学的応用上も重要である。本研究では、燃焼の過程のうち特に流体運動に係る部分に着目し、流体部分については流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式を粗視化モデルなどを導入せずそのまま扱い、化学反応についてはなるべく簡略化を行い燃料一成分、逆反応無しの一段階過程の簡略化モデルで、数値シミュレーションを行った。その結果、化学反応の特徴的時間スケールに対する乱流の渦の時間スケールの比が十分小さい高波数領域では、燃料密度スペクトル $F(k)$ が化学反応が無い場合のスペクトルで近似されること、またそこからずれが上記時間スケール比の摂動解析と整合することが示された。またシミュレーションにより、ずれのスペクトルに表れる普遍定数の見積もりを行った。

【2】散逸場の量子論、量子情報物理

(1) 連続量量子テレポーテーション (大日向 (院生), 北島佐知子 (お茶大), 有光, 吉田) 論文 [2]

量子テレポーテーションでは、Alice と Bob はそれぞれスクイーズド真空を生成し、これらをハーフ・ビーム・スプリッター (HBS) を通過させることによりエンタングル状態を生成して利用する。Victor が準備した入力状態 (量子情報) の伝送に当たって、Alice がホモダイン測定 (Bell 測定) を実施し、得られた測定値を古典通信手段で Bob に知らせる。それに基づいて、Bob は適切なユニタリー変換を施し、Victor からの量子情報を出力状態として手に入れる。Victor の入力状態と Bob が得た出力状態の正確さは、フィデリティにより評価される。

連続量量子情報の伝送では、エンタングル状態がスクイーズド状態を利用して作られているが、実験室で生成されるスクイーズド真空では、そのスクイーズドの度をあまり大きくできないため (スクイーディング・パラメータが有限)、Alice と Bob が共有するエンタングル状態は不完全である。さらに、エンタングル状態に外界の影響 (散逸による緩和率 κ として記述される) が加わった場合についても、フィデリティの振る舞いを詳細に調べた。

< 論文 >

- [1] Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: "Inertial range structure of Gross-Pitaevskii turbulence within a spectral closure approximation", Journal Physics A: Mathematical and Theoretical, **46**, 335501 (2013).

- [2] S. Kitajima, T. Arimitsu, M. Obinata and K. Yoshida: “Quantum teleportation for continuous variables via a partially entangled state constructed under the environment”, *Physica A*, **404**, 242—270 (2014).

< 講演 >

- [1] (招待講演) Kyo Yoshida, “Strong turbulence in nonlinear Schrödinger equation”, The 6th Pacific RIM Conference on Mathematics 2013, 2013年7月2日, 札幌コンベンションセンター, 札幌.
- [2] Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu, “Spectra in Gross-Pitaevskii turbulence within a spectral closure approximation”, European Turbulence Conference 14, 2013年9月2日, ENS Lyon, Lyon, France.
- [3] 武智公平, 吉田恭, 有光直子, 「乱流のエネルギー散逸場の領域分割による解析」, 日本物理学会第69会年次大会, 2014年3月28日, 東海大学湘南キャンパス, 平塚.

< 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, 2013年9月29日, 茗溪学園, つくば.

< 学位論文 (修士) >

- [1] 筑波大学修士論文: 小口 拓郎 (初貝) 「乱流燃焼における燃料密度スペクトルの解析」(2014年2月).

VII-2. 量子物性理論

教授：初貝安弘

助教：苅宿俊風

大学院生：4名(博士1名、修士3名)

卒論学生：1名

1 グラフェン等ディラック電子系におけるトポロジカルな効果と電子相関

1.1 グラフェンのカイラル対称性と電子間相互作用によるカイラル凝縮相の理論

グラフェンは量子干渉効果としての幾何学的位相が重要な物質相である。このグラフェンにおける最も特徴的なディラック型のエネルギー分散の起源は通常時間反転対称性と反転対称性に帰着されることが多いが、蜂の巣格子上の強結合近似のもとでは、単位胞内の2つの炭素原子の等価性ならびに、系の格子が2種類に分類され、飛び移り積分がその間のみをつなぐことに帰着することができる。これがグラフェンのカイラル対称性であり、系の乱れに関するユニバーサリティクラスならびにトポロジカルな性質も規定する重要な特性と考えられている。これに関して、我々は多くの研究を重ねて来たが、本年度は特に電子間相互作用に対するカイラル対称性の意義を明らかとした。現在までのカイラル対称性に関する他の多くの研究は主に電子相関を無視した一電子問題に関するものであり、我々のこの研究は一つの新しい方向であることをここで強調しておく。具体的には最近接の電子間相互作用のみを考慮した場合に、磁場下の電子正孔対称なグラフェンの基底状態がカイラル凝縮相と呼ばれる特殊な相であることを示した。更に数値計算を併用し、この系における励起ギャップの磁場依存性を計算し、関連する実験との整合性を示した(図1参照)。

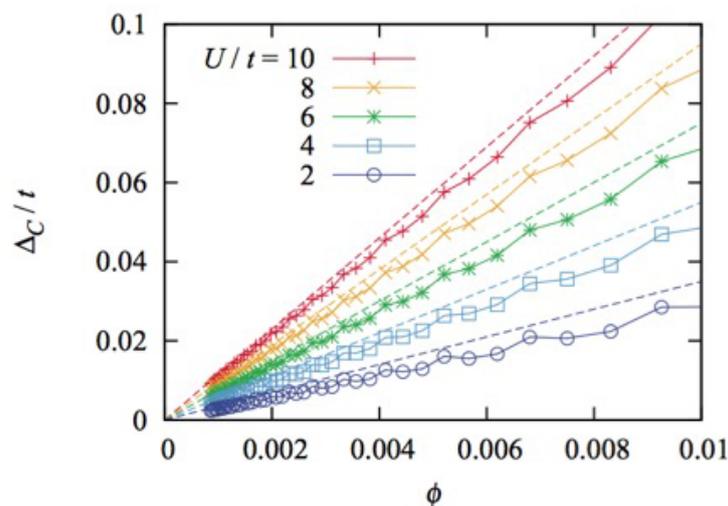


図 1: グラフェンの格子あたりの磁場とカイラル凝縮相での励起ギャップ [2,6]

また、一般に磁場下の2次元電子系のホール伝導度はチャーン数とよばれる系のトポロジカルな物理量(位相不変量)で決定される。このチャーン数はベリー接続を仮想ベクトルポテンシャルと見たときの仮想的な磁場に対応するが、我々の見いだしたカイラル凝縮相においては、系の電荷正孔対称性に起因してこのベリー接続は消失し、対応してホール伝導度もゼロとなる。つまり電子正孔対称性の下で不変なカイラル凝縮相はホール絶縁体であることも明らかとなった。

1.2 グラフェンの有限の断片（グラフェンフレーク）の特異な電子状態とトポロジカルな性質

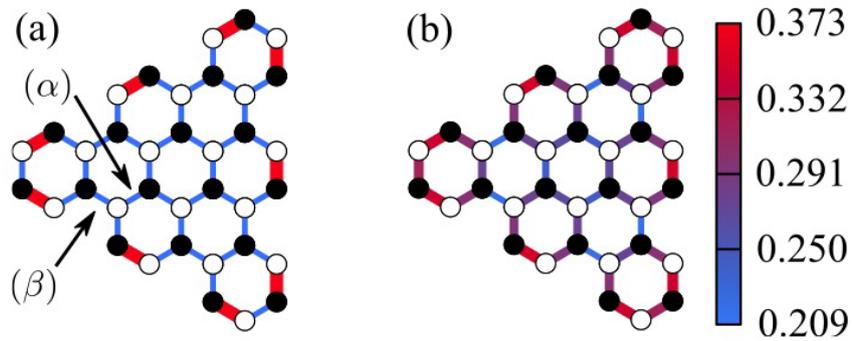


図 2: グラフェンフレークにおける局所ベリー位相 (左) とボンド相関関数 (右) [9]

グラフェンの境界においてはジグザグ端において局在状態が現れることはよく知られているが、有限の形状をもつグラフェンフレークにおいてはこの局在状態の再結合により、ダイマー形成が生じることをトポロジカルな観点から、我々は示してきた。本年度は更にこのダイマー状態に関する電子相関の効果の数値計算を併用して明らかとした (図 2)。

2 バルク・エッジ対応の普遍性とその応用

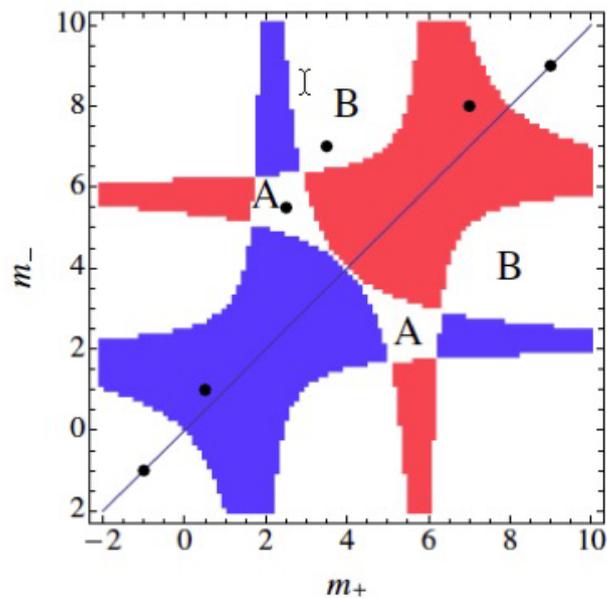


図 3: 弱いトポロジカル相を持つ模型の相図 [3]

近年の物性論において、トポロジカルな物質相が多くの興味を集めているが、一般にバルクのトポロジカル相は絶縁体であり、外界からの摂動に対して応答しないため、特徴をもたない。その一方で、系に不純物が存在する、もしくは、系に境界が存在する場合、不純物近傍もしくは系の境界近傍に局在した状態が現れる。この局在した状態を量子ホール系にならって一般的なエッジ状態と呼んで、このエッジ状態をもって逆にバルクのトポロジカル相が特徴づけられていると見なす。これがいわゆる「バルク・エッジ対応」の視点であり、近年広くその有効性が確認されつつある。本年度はこのバルク・エッジ対応の観点から具体的な系における研究を行い幾つかの新しい成果を得た。

2.1 ディラックフェルミオン系のバルク・エッジ対応の理論

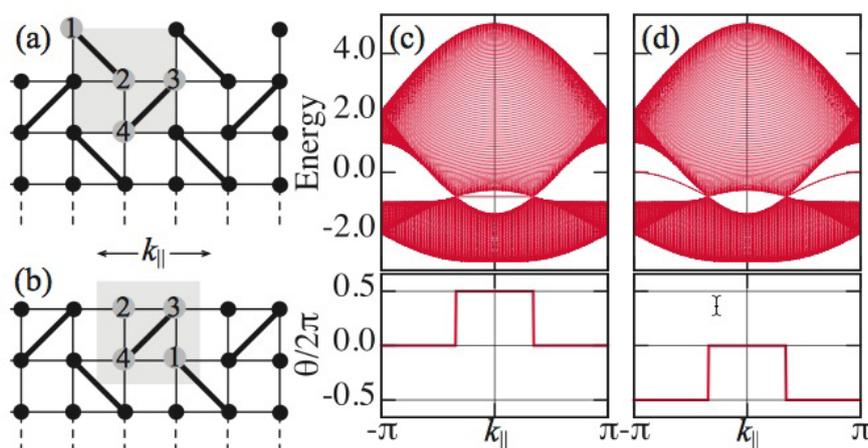


図 4: 対称性で守られたシャストリーサザランド模型における種々の境界とベリー位相、エッジ状態のエネルギー分散 [1]

グラフェンのみならずディラックフェルミオンの物理はギャップ有限の場合も質量有限のディラックフェルミオン系として理解することで、2次元半導体においては普遍的な重要性をもつ。この立場から一般のディラックフェルミオン系に関するバルク・エッジ対応の理論を構築し、2次元層状の弱いトポロジカル相をもつ模型(図3)、ならびに特異分散をもついわゆるシャストリーサザランド型の格子模型(図4)などの種々の模型に対して具体的な研究を遂行し、その特徴をベリー位相等のトポロジカルな物理量とエッジ状態に着目し明らかとした。

2.2 シリセンのエッジ状態とその多様性と普遍性

シリコン原子が座屈した蜂の巣格子を形成した2次元物質であるシリセンは、近年実験的に合成することに成功したことともなって、急速に研究が活発化している。このシリセンにおいては、グラフェンとの構造上の類似性から系の境界に特徴的な局在状態が生じることが期待される。関して我々は、系にシリンドラ状の境界が存在する場合に境界近傍に出現する局在状態(エッジ状態)の特性及びその物理的起源をシリセン固有の境界における多様な水素終端の可能性、物理的帰結まで、数値計算とトポロジカルな考察を併用することで理論的に明らかにした。

3 トポロジカル秩序の概念とその物性論における応用

「量子液体相」は、古典的物理量で表現できる特徴的な秩序変数をもたないことを最大の特徴とする量子相である。この観点に立つと、通常きわめて有効な「秩序変数」を用いた「対称性の破れ」の概念に基づく相の理論は量子液体相においては無力となる。そこで、我々は量子論固有の幾何学的位相を用いる相分類の理論的枠組みを構築し、ベリー位相並びにチャーン数を用いて具体的な量子液体相の分類、特徴づけに関して研究を進めてきたが、本年度も関連の基礎的理論を構築するとともに具体的な模型に対する有効性を確認し、現在論文を執筆中である。

< 論文 >

1. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Symmetry Protected Quantization and Bulk-Edge Correspondence of Massless Dirac Fermions: Application to Fermionic Shastry-Sutherland Model", *Phys. Rev. B* 88, 245126(7) (2013), doi:10.1103/PhysRevB.88.245126
2. Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki and Y. Hatsugai, "Spin-resolved chiral condensate as a spin-unpolarized $\nu=0$ quantum Hall state in graphene", *Phys. Rev. B* 88, 195141(6) (2013), doi:10.1103/PhysRevB.88.195141
3. T. Fukui, K.-I. Imura and Y. Hatsugai, "Symmetry protected weak topological phases in a superlattice", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 073708(5) (2013), doi:10.7566/JPSJ.82.073708
4. T. Shiokawa, G. Fujita, Y. Takada, S. Konabe, M. Muraguchi, T. Yamamoto, T. Endoh, Y. Hatsugai and K. Shiraishi, "Influence of Coulomb Blockade on Wave Packet Dynamics in Nanoscale Structures", *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 04CJ06 (4), (2013), <http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/52/04CJ06/>
5. C. M. Puetter, S. Konabe, Y. Hatsugai, K. Ohmori, "Interacting Electron Wave Packet Dynamics in a Two-dimensional Nanochannel", K. Shiraishi, *Applied physics express* 6, 065201(4) (2013) doi:10.7567/APEX.6.065201
6. Y. Hamamoto, Y. Hatsugai, H. Aoki and T. Kawarabayashi, "Chiral Symmetry and Many-Body Effect in Multilayer Graphene", *J. Phys. Conf. Ser.* 456, 012013(6) (2013), doi:10.1088/1742-6596/456/1/012013
7. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, "Stability of zero-mode Landau levels in bilayer graphene against disorder in the presence of the trigonal warping", *J. Phys. Conf. Ser.* 456, 012020(4) (2013), doi:10.1088/1742-6596/456/1/012020
8. T. Kawarabayashi, T. Honda, H. Aoki and Y. Hatsugai, "Chiral symmetry and fermion doubling in the zero-mode Landau levels of massless Dirac fermions with disorder", *AIP Conf. Proc.* 1566, 283(2) (2013), doi:10.1063/1.4848396
9. D. Seki, Y. Hamamoto, Y. Hatsugai, "Characterization of Dimers in Graphene Flakes", *JPS Conf. Proc.* 1, 012068(4) (2013), doi:10.7566/JPSCP.1.012068
10. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Emergence of Topologically Stable Dirac Dispersions in a Fermionic ShastrySutherland Model", *JPS Conf. Proc.* 1, 012001(4) (2013), doi:10.7566/JPSCP.1.012001
11. H. Sakamoto, Y. Hatsugai, H. Aoki and T. Kawarabayashi, "Sharp Zero-Energy Landau Levels in Multilayer Graphene", *JPS Conf. Proc.* 1, 012069(4) (2013), doi:10.7566/JPSCP.1.012069

< 著書 >

1. 初貝安弘「原子崩壊がグラフェンで現実に」 パリティー 28 巻 11 月号 p.30-p32 (2013), “ Graphene yields evidence of atomic collapse ” by Ashley G. Smart, Physics today, Vol. 66, No.5, 2013, American Institute of Physics (翻訳)
2. Y. Hatsugai and H. Aoki, “ Graphene: Topological Properties, Chiral Symmetry and Their Manipulation ”, p.213-p.250 in Physics of graphene, ed. H. Aoki and Mildred S. Dresselhaus, Springer (2014)

< 講演:国際会議 >

1. (invited) Y. Hatsugai, “ Symmetry protection and strong correlation in graphene with bulk-edge correspondence ”, Trends in theory of Correlated Materials 2013, Lausanne, Switerland, Oct. 2 (2013)
2. (invited) Y. Hatsugai, “ Symmetry, Berry connection and Bulk-edge correspondence ”, Emergent Quantum Phases in Condensed Matter, Kashiwa, Japan, June. 5 (2013)
3. (invited) Y. Hatsugai, “ Universality & variety of edge states in graphene & silicene ”, CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, Hsinchu, Taiwan, Jan.1 (2014),
4. T. Kariyado and Y. Hatsugai, “ Fermionic Shastry-Sutherland model: Emergence of Dirac dispersions, edge modes, and topological properties ”, Emergent Quantum Phases in Condensed Matter, Kashiwa, Japan, June. 13 (2013)
5. T. Kawarabayashi, T. Honda, Y. Hatsugai, H. Aoki, ”Landau levels of disordered massless Dirac fermions when the Dirac cones are both shifted and tilted”, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), Wroclaw, Poland, July 1, (2013).
6. D. Seki, Y. Hamamoto, Y. Hatsugai, “ Z₂ Berry phase as a local dimer order parameter of graphene flakes ”, Statphys25, Seoul, Korea, July 21 (2013)
7. H. Sakamoto, Y. Hatsugai, H. Aoki and T. Kawarabayashi, ”Sharp Zero-Energy Landau Levels in Multilayer Graphene”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Chiba, Japan, July 14 (2013)
8. D. Seki, Y. Hamamoto and Y. Hatsugai, ”Characterization of Dimers in Graphene Flakes”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Chiba, Japan, July 14 (2013)
9. T. Kariyado and Y. Hatsugai, ”Emergence of Topologically Stable Dirac Dispersions in a Fermionic ShastrySutherland Model”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Chiba, Japan, July 14 (2013)
10. D. Seki, Y. Hamamoto, Y. Hatsugai, “ Kekul structure of graphene flakes by topological order parameters ”, Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013) Tokyo, Sep. 12 (2013)
11. T. Kariyado and Y. Hatsugai, “ Symmetry protected Z₂ Berry phase in massless Dirac fermion systems ”, FIRST-QS2C WS on ”Emergent Phenomena of Correlated Materials”, Tokyo, Nov. 13 (2013)
12. T. Sho, S. Konabe, K. Shiraishi and Y. Hatsugai, “ Edge states of silicene ribbons with several types of termination ”, (ISANN2013), Poipu Beach, Kauai, Hawaii, U.S.A. Dec. 8 (2013)

13. T. Shiokawa, G. Fujita, Y. Takada, S. Konabe, M. Muraguchi, T. Yamamoto, T. Endoh, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, " Multi-Electron Wave Packets Dynamics under MOSFET-like Potentials ", (ISANN2013), Poipu Beach, Kauai, Hawaii, U.S.A. Dec. 8 (2013)
14. G. Fujita, T. Shiokawa, Y. Takada, S. Konabe, M. Muraguchi, T. Yamamoto, T. Endoh, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, " Effect of Electric Field in Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Channel of Nanoscale devices ", (ISANN2013), Poipu Beach, Kauai, Hawaii, U.S.A. Dec. 8 (2013)
15. T. Kariyado and Y. Hatsugai, " Edge states and the quantized Berry phase of general massless Dirac fermions ", American Physical Society March Meeting, March 3 (2014)

< 講演:国内会議 >

1. [招待講演] 初貝安弘「グラフェンのディラックコーンとゼロエネルギー局在状態」応用物理学会シリコンテクノロジー分科会シリコンナノテクノロジー研究委員会, つくば市 2013年11月11日
2. 苅宿俊風, 初貝安弘「Shastry-Suterland 格子上のフェルミオンモデルにおけるディラック電子」固体中におけるディラック電子系物理の新展開, 京都大学基礎物理学研究所, 2013年6月19日
3. Y. Hatsugai, " Symmetry of Dirac fermions and Topological effects ", 科研費 新学術領域研究「原子層科学」キックオフミーティング, 仙台, 2013年9月2日
4. 関大地, 濱本雄治, 初貝安弘「グラフェン断片におけるダイマー状態と電子間相互作用」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月28日
5. 本田貴大, 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘「傾いたディラック・コーンにエネルギー差がある場合の $n=0$ ランダウ準位の異常性」徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会/2013-09-28
6. 福井隆裕, 井村健一郎, 初貝安弘「二次元超格子系におけるトポロジカル相」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会/2013-09-28
7. 苅宿俊風, 初貝安弘「フェルミオン Shastry-Sutherland 模型におけるディラックコーンとエッジ状態」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月28日
8. 坂本紘樹, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透「3層グラフェンのゼロエネルギー・ランダウ準位のランダムネスに対する安定性」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月27日
9. 濱本雄治, 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘「磁場中グラフェンのスピン非偏極なカイラル凝縮相の相関関数」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月27日
10. 初貝安弘, 福井隆裕, 井村健一郎「時間反転対称性を破る格子ディラック模型の離散対称性と量子化」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月27日
11. 岡本真由子, 井村健一郎, 高根美武, 福井隆裕, 初貝安弘「一次元トポロジカル絶縁体とトポロジカル超格子絶縁体」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月27日
12. 棚谷翔, 小鍋哲, 白石賢二, 初貝安弘「シリセンのエッジ状態における水素終端の効果」, 徳島大学, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年09月26日
13. 苅宿俊風, 初貝安弘「対称性によるベリー位相の量子化と質量ゼロのディラックフェルミオン系におけるバルク・エッジ対応」第7回 物性科学領域横断研究会, 2013年12月1日

14. 関大地, 濱本雄治, 初貝, 安弘 「Z2 order parameters for graphene flake」第7回 物性科学領域横断研究会, 2013年12月1日
15. S. Sho, S. Konabe, K. Shiraishi, Y. Hatsugai, 「水素終端されたジグザグシリセンリボンにおけるエッジ状態」第7回 物性科学領域横断研究会, 2013年12月1日
16. 苺宿 俊風, 初貝, 安弘, 「ベリー位相の分数量子化とディラック電子系のエッジ状態」日本物理学会 2014年第69回年次大会, 2014年3月27日
17. 青木秀夫, 初貝, 安弘, Pavel Streda 「グラフェンにおける分極としての第二トポロジカル量子数」日本物理学会 2014年第69回年次大会, 2014年3月27日
18. 吉村幸徳, 井村健一郎, 福井隆裕, 初貝安弘, 「超格子系の弱トポロジカル相とエッジ状態」日本物理学会 2014年第69回年次大会, 2014年3月27日
19. 棚谷翔, 小鍋哲, 白石賢二, 初貝, 安弘, 「水素終端されたシリセンリボンにおけるエッジ状態の起源」日本物理学会 2014年第69回年次大会, 2014年3月29日
20. 井上裕哉, 初貝, 安弘, 青木秀夫, 河原林透, 「ケクレ型ボンド秩序があるグラフェンのドメイン境界における局所状態密度」日本物理学会 2014年第69回年次大会, 2014年3月29日

< 社会還元等 >

1. 初貝安弘, "Progress of Theoretical and Experimental Physics" 編集委員
2. 初貝安弘, 東京大学物性研究所附属施設物質設計評価施設スーパーコンピュータ共同利用課題審査委員会委員

< アウトリーチ >

1. 初貝安弘, 茗溪学園 Super Science High school (SSH) 学習会「対称性とその自発的破れ: 現代物理学の基礎概念」2013年9月1日

< 卒業論文 >

1. 平野裕理: トポロジカル絶縁体のエッジ状態の研究 (物理学類、卒業論文、2014.3)

< 博士論文 >

1. Sho Tanaya: Numerical studies of edgen hydrogen terminated silicene ribbons(シリセンリボンの水素終端とエッジ状態の数値的研究) (数理物質科学研究科、物理学専攻、博士論文、2014.2)

< 外部資金 >

1. 科学研究費 基盤研究 (B) 「幾何学的位相による物質相：量子液体及びグラフェンでの応用と展開」研究課題番号：23340112, 2013 年度：5330 千円 (直接経費：4100 千円, 間接経費：1230 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, 2013 年度：2470 千円 (直接経費：1900 千円, 間接経費：570 千円), (研究代表者: 初貝安弘)
3. 科学研究費 基盤研究 (C) 「磁場中の電子状態計算と位相不変量による電子物性」研究課題番号:23540460, (研究代表者: 新井正男)(研究分担者: 初貝安弘)
4. 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

卒研究生 1名

本研究グループでは、ナノ構造系で量子性に起因して現れる興味深い量子物性・量子輸送現象を、様々な「場の量子論」の手法により理論的研究を進めている。キーワードは、量子性・電子相関・非平衡性である。特に電氣的にスピン輸送が制御可能な「非平衡ラシュバ量子ドット干渉計」については継続して研究を進めており、これまで多くのことが明らかになっている(講演 [1,2])。また本年度は、我々が得た非平衡 2 次摂動計算の解析評価を利用することで、これまで電流保存の問題により調べられることが困難であった電子-正孔対称性の破れの影響も調べることが可能となった(論文 [1])。一方、新たな研究プロジェクトとして、「非平衡不純物アンダーソン模型」の系統的な解析を目的として、新たな厳密解の構成法の開発を開始した(講演 [3])。これらと平行して、超伝導量子ドットを介した非平衡量子輸送現象の研究も開始した(学位論文 [1])。本年度の主な成果は以下のとおりである。

【1】非平衡量子ドット系の理論的手法

(1) 多端子非平衡量子ドット系の解析的摂動計算(論文 [1])

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。不純物アンダーソン模型は、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、理論的に取り扱いの容易な「電子-正孔対称性のある二端子系」に理論研究が集中しており、このような単純化された系で得られた結果を、応用上大きな可能性の秘める多端子系や量子干渉計に対して適用可能であるかは注意深い議論を要する。

電子-正孔対称二端子ドット系に関して、非平衡二次摂動計算と非平衡量子モンテカルロ計算等の数値計算との結果を比較すると、かなり大きな電子相関と有限バイアス電圧領域まで、両者は定性的のみならず定量的にもかなり良い一致を示す。つまり非平衡二次摂動計算は大変有効な手法であることがわかる。一方、これまでの非平衡摂動計算は、ダイアグラムの寄与を数値積分することで解析をおこなってきたため、解析的な挙動が明らかでないだけでなく、大きな制御パラメータ空間をもつ多端子ドット系の挙動を系統的に調べるには不適であった。我々は非平衡二次摂動自己エネルギーを、多くのパラメータを含む系(多端子量子ドット、任意の周波数・バイアス電圧)で完全に解析的に評価を行った。本年度は特に、多端子非平衡量子ドット系の低バイアスおよび高バイアス極限の解析的挙動を求めるとともに、多端子の影響と電子-正孔対称性を破るゲート電圧の影響等を解析的に調べることができた。また、電流保存則に関して、多端子量子ドット系の自己エネルギーの低バイアス挙動が、非平衡定常 Ward 恒等式と整合していることを明らかにした。

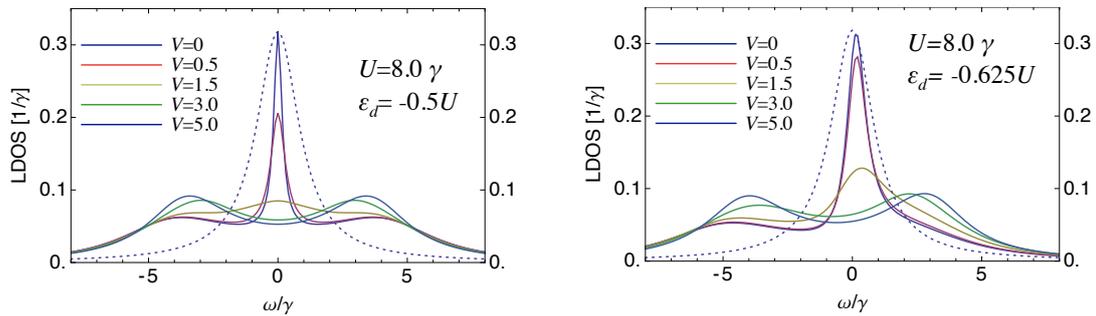


図1 非平衡スペクトルの計算例: (左) 電子正孔対称性のある系、(右) 電子正孔対称性が破れた系。

(2) 非平衡量子ドット系の電流保存則 (論文 [1])

現実の半導体素子では、ゲート電圧の存在、左右リードとドットの結合非対称性、リング形状や多端子の存在により、ドットに電子-正孔対称性が必ずしも存在しないのが普通である。一方、理論計算では取り扱いが容易になることから、しばしば電子-正孔対称性を仮定することが多い。さらに非平衡摂動論特有の問題として、このような電子-正孔対称性を破るドット系に適用しようとすると、電流保存則を必ずしも満たさなくなる、という問題点が長らく知られている。そのため、このような非平衡定常状態で電流保存を保証するために様々な「電流保存条件」の処方箋が開発・提案されてきた。このような取り扱いを遂行するためには、近藤共鳴近傍のみで正当化できる近似法(準粒子描像)では不十分で、共鳴から離れた周波数成分(インコヒーレント部分)の寄与も考慮する必要がある。

我々は、インコヒーレント部分を含む任意の周波数における2次摂動の非平衡自己エネルギーの解析的表式を持っているため、これを利用することで、上述の非平衡電流保存の問題に有効的にアプローチすることが可能となった。実際、2次摂動理論の範囲内で付加的な仮定や処方箋を使うことなく、明示的に電流保存則を満たす形で、非平衡スペクトルおよび非平衡定常電流の計算が遂行可能であることを示した。同時に、求めた非平衡スペクトルは総和則を厳密に満たすことが確認された。これは、従来の準粒子描像に立脚した手法ではなし得なかった利点である。電子正孔非対称性が非平衡スペクトルへ及ぼす影響は大きく、電子正孔対称系では低バイアス領域で3ピーク構造を示すこととは対照的に、電子正孔対称が破れた系では一般に(低バイアス領域でも)2ピーク構造を示すことがわかった。

【2】非平衡 Rashba 量子ドット干渉計の電氣的スピン制御 (講演 [1,2])

我々のグループでは、これまで量子干渉計に量子ドットを埋め込んだ量子ドット干渉計(量子ドット干渉計)で Rashba 型スピン軌道相互作用を利用することによりスピン分極およびスピン流が非平衡制生成可能という、電氣的スピン現象に着目し、その物理的機構を理論的に明らかにしてきた。使った解析・近似手法は

- 有限相互作用スレーブボゾン法による自己無撞着計算
- 非平衡二次摂動論による解析的評価

の2種類である。いずれの手法によっても、量子ドット干渉計に Rashba 電場を印加することで電氣的にスピン分極とスピン流が生成されることが確認された。また電氣的スピン現象の機構は、次の二つの複合的効果の帰結であると理解できた：(1) 電子相関のない量子ドット干渉計であっても、Rashba 電場は干渉計の輸送にスピン依存する位相効果を与え、その結果として、量子ドットに非平衡スピン分極を定常的に生み出す。(2) 量子ドットに電子相関があると、(1) で誘起されたスピン分極は電子相関を介し、スピン依存した輸送チャンネルを生み出す。そのため、電子相関のある量子ドット干渉計の場合に限り、スピン流が誘起される。また、電氣的にスピン流が誘起されるのは、有限バイアス電圧を定常的に電子相関を持つ干渉計にかけた場合に限られ、非平衡近藤効果と解釈することも可能である。

非平衡定常状態でスペクトル関数を実験的に観測するためには、第三端子によるコンダクタンス測定が行われる。通常、磁気応答や強磁性リードによりスピン分極が誘起される場合には、スペクトル関数はスピン依存性を反映してディップ構造を持つ。しかし、現在考えている量子ドット干渉計に関しては、事情が少し異なることも判明した。すなわち、非平衡スペクトル関数のディップ構造は、スピン分極のみが有限でスピン流が0の時には現れず、スピン分極とスピン流が双方とも有限になって初めて現れる。つまり、第三端子によるコンダクタンス測定は、量子ドット干渉計にスピン流存在の有無を確認する検知手段となり得ることがわかった。

【3】開放量子ドット系の厳密計算 (講演 [3])

電子相関と非平衡が共存する系の計算は、現在のところ極めて特別な例を除いては厳密に評価された例はほとんどない。ナノ量子系の量子輸送現象を記述する不純物 Anderson 模型に対して平衡系の性質を厳密に計算できる理論手法として、Bethe 仮設法、境界共形場理論が知られているが、いずれも現時点では非平衡定常状態への拡張には様々な障害があり、未だ確立していない。そこで、非平衡定常状態への展開を念頭においた、これら二つの手法とは独立な厳密解の構成法の開発に着手した。我々のアプローチの基本的な考え方は、補助場 (ポーズ場) の導入により量子ドットの相互作用を扱う方法であるが、従来とは異なり、得られる有効作用を可能な限り厳密に扱おうとするものである。この方法によれば、不純物 Anderson 模型 (有限の電子相関 $U \neq 0$) の結果を、 $U = 0$ の共鳴準位模型の結果から構成することができる:

$$\Xi_{\text{SIAM}} = \left\langle \prod_{\sigma} \Xi_{\text{RLM}}(\epsilon_d + \frac{U}{2} - \sigma b) \right\rangle_b.$$

ここで Ξ_{SIAM} は不純物 Anderson 模型の大分配関数、 Ξ_{RLM} は共鳴準位模型 (=電子相関のない開放量子ドット系) の分配関数であり、 b は分散 $\langle b^2 \rangle_b = U/\beta$ を満たすポーズ場である。上式は Ξ_{SIAM} と Ξ_{RLM} を結ぶ厳密な関係式であり、電子相関のない開放量子ドット系の大分配関数 Ξ_{RLM} を厳密に求めることができれば、Bethe 仮設法・およびその有限温度拡張と等価な内容を含む理論

が構築できることを意味する。(同様な関係をグリーン関数や状態密度等の物理量へ拡張することも原理的に可能であるが、表式は複雑となる) 本アプローチは構成の明確さ・単純さから、大きな可能性を秘め、非平衡定常状態への拡張も可能であると我々は考えている。本年度においては、まず基本となる Ξ_{RLM} の表式を具体的かつ厳密に求めた。現在、得られた結果の解析を進めている。

研究業績

< 論文 >

1. N. Taniguchi, *Multi-terminal Anderson impurity model in nonequilibrium: Analytical perturbative treatment* (投稿済) .

< 学位論文 >

1. 卒業論文：新井和明「ノーマル-量子ドット-超伝導接合系における非線形電流の研究」(筑波大学物理学類 2014 年 2 月).

< 講演 >

1. N. Taniguchi, *Electrically induces spin current in a nonequilibrium spin-orbit nano interferometer*, in First-QS2C Workshop on Emergent Phenomena of Correlated Materials (Tokyo, 2013 年 11 月 14 日).
2. N. Taniguchi, *Nonequilibrium Spin Current and Three-terminal Probing in a Non-magnetic Spin-orbit interferometer*, in International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (Hawaii, 2013 年 12 月 13 日).
3. 谷口伸彦「汎関数ポゾン法による開放量子ドット系の直接計算」日本物理学会 第 68 回年次大会 (2014 年 3 月 28 日 東海大学).

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、猪谷太輔
学生	大学院生 3名、学類生 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】電界下におけるグラファイト系材料の電子物性

電子デバイス中に組み込まれた種々のグラファイト系材料は、その機能制御において外部電界に晒されることが本質である。これまでに、ゲート電界に対応する、グラファイト系材料の原子ネットワークに対して鉛直方向に印加された電界下における物性の解明は多くなされてきている。ここでは、グラファイト系材料をチャンネル材として用いた際に、ゲート電界と同様に重要になるソースドレイン電界に着目し、グラファイト系材料の横電界への応答性を調べた。考えた構造モデルは、有限長のCNT、任意の端形状を有するグラフェンリボンを対向電極でサンドイッチしたものを考え、これらグラファイト系材料に電界を印加し、静電ポテンシャル(電子の感じるオンサイトエネルギー)の空間変調を明らかにした。その結果、グラファイト系材料の端がごく一部でもジグザグ型の端形状を有すると、その端近傍において過剰電界遮蔽に伴うポテンシャルの振動が発現することを明らかにした(図1)。すなわち、近接の原子サイト間において印加電界に対し逆電界が存在している。このため、非アームチェの端形状を持つグラファイト

ト系材料においては、電極からキャリアがオーミックに注入されたとしても、端近傍のポテンシャル振動により多重散乱を受け、良伝導特性を示さない可能性があることを示し、鉛直電界に加えて平行電界も十分に考慮に入れたデバイス設計を行う必要がある

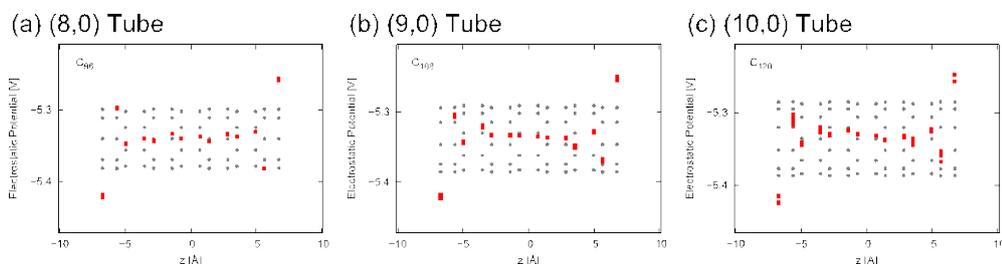


図1 有限長ジグザグナノチューブの横電界下での静電ポテンシャル。

ことを示した。

【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、sp²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sp²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とを示した。

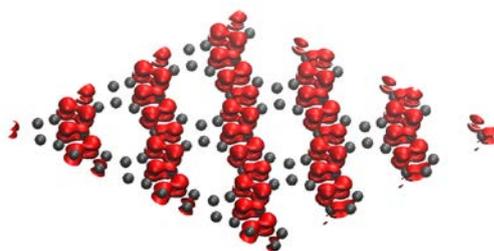


図2 2次元5員環ネットワークのスピンドensity

【3】 カーボンナノチューブにおける高効率光電変換

次世代太陽光発電機構の1つとして、多重励起子生成(MEG)型が提案されている。これは光エネルギーを熱散逸により失う前に、クーロン相互作用を介して、他の励起子を生成するために用いる。その結果、1つの光子から複数の励起子を生成することが可能となり、光電変換の高効率化が期待される。これまで我々は1次元物質であるカーボンナノチューブにおいてこの現象を調べ、非常に高効率に励起子生成が起きることを示してきた。しかし、これまでの研究では、実際に発電で重要になるキャリア(光電流)の生成効率に関しては明らかではなかった。そこで本研究では、ナノスケール物質であるカーボンナノチューブにおいて、様々な緩和プロセスを考慮した光電流生成シミュレーションを行うことにより、キャリア生成効率を調べた。その結果、緩和プロセスが存在していても、キャリア生成効率が150%を超えることがわかった。(図3)

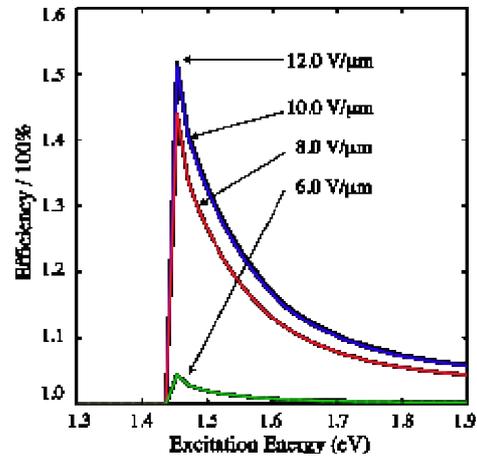


図3 カーボンナノチューブにおける光電流生成効率。

【4】 グラフェン-ダイヤモンドハイブリッド構造における多重励起子生成

低次元材料の光学応答ではクーロン相互作用の増大に伴い、励起子などの多体効果が顕著になるだけでなく、励起子自身が他の励起子とクーロン相互作用し、様々な励起子多体効果を示すようになる。とりわけ、1つの光子から複数個の励起子を生成する多重励起子生成は、基礎物理のみならず高効率光電変換への応用の観点からも興味深い。これまで、計算モデルとして理想的な状況下における多重励起子生成を調べてきたが、応用を考える際には現実

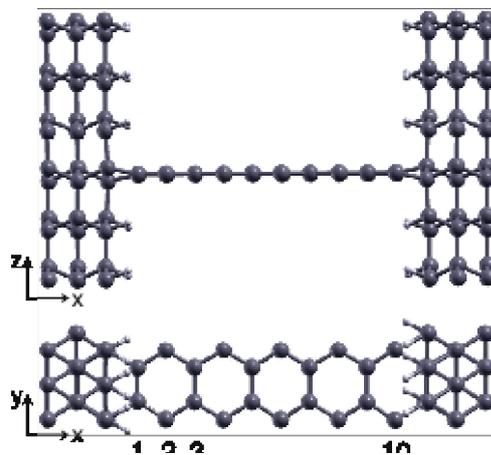


図4 多重励起子生成を示すグラフェン-ダイヤモンド構造。

的な構造での解析が望ましい。そこで本研究では、グラフェンナノリボンをダイヤモンドで挟んだ複合安定構造を考え(図4)、その多重励起子生成を調べた。計算の結果、多重励起子生成効率は180%にも達することがわかった。この結果は、グラフェン-ダイヤモンドハイブリッド構造のような複合構造においても、グラフェンリボンの高効率な多重励起子生成率が保たれることを示している。

4. 学位論文

修士：

1. 丸山実那：新奇炭素結晶相の物質設計と物性解明(2014年3月)
2. 山中綾香：電界下における有限長カーボンナノチューブの電子物性(2014年3月)
3. 塩川太郎：多電子波束ダイナミクスの理論的研究(2014年3月)
4. 加藤重徳：超格子 GeTe/Sb₂Te₃相変化メモリの動作メカニズムの検討(2014年3月)
5. 長川健太：SiCの欠陥への理論的考察(2014年3月)

博士：

1. 梁文榮：First-Principles Atomistic Study of the Physical Mechanisms in the Next Generation Memory Devices (次世代メモリデバイスにおける原子レベルの物理機構に関する第一原理計算の研究) (2014年3月)
2. 花岡恭平：Theoretical elucidations on the activity modulation mechanism of vitamin D receptor and the DNA religation mechanism of DNA topoisomerase II (ビタミンD受容体の活性制御機構とII型DNAトポイソメラーゼのDNA再結合反応機構に対する計算科学的解明) (2014年3月)

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞 (賞の名称、受賞者名、タイトル、年月日)

1. 山中 綾香、ワークショップ「機能性ナノ材料開発に役立つ先端シミュレーション」ポスター賞、2013年6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)

6. 研究業績

(1) 研究論文

1. Satoru Konabe and Susumu Okada, “Enhanced Photocurrent in Single-Walled Carbon Nanotubes by Exciton Interactions” *Applied Physics Letters* Vol. 102, 113110 (2013). (DOI: 10.1063/1.4798274)
2. Haruna Nitta, Yutaka Matsuo, Eiichi Nakamura, and Susumu Okada, “Magnetic Properties of Deca-Methyl Fullerenes: Radical Spin Interaction on Chemically Functionalized Fullerenes” *Applied Physics Express* Vol. 6, 045102 (2013). (DOI: 10.7567/apex.6.045102)
3. Satoru Konabe, Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, “High-Efficient Photoelectric Conversion in Graphene-Diamond Hybrid Structures: First-principles and Model Calculations” *Applied Physics Express* Vol. 6, 045104 (2013). (DOI: 10.7567/APEX.6.045104)
4. Junki Sone and Susumu Okada, “Massless Electrons on Hexagonal Dangling Bond Network on Hydrogen Deposited Diamond (111) and Si(111) Surfaces” *Journal of the Physical Society of Japan* Vol. 82, 064706 (2013). (DOI: 10.7566/jpsj.82.064706)
5. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, “Energetics and Electronic Structures of Alkanes Adsorbed on Carbon Nanotubes” *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 52, 06GD10 (2013). (DOI: 10.7567/JJAP.52.04CN07)
6. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, “Electronic Properties of Capped Carbon Nanotubes under an Electric Field: Inhomogeneous Electric-Field Screening Induced by Bond Alternation” *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 52, 06GD04 (2013). (DOI: 10.7567/JJAP.52.06GD04)
7. Shota Kigure and Susumu Okada, “Energetics and Electronic Structures of C₆₀ Included in [n]Cyclacene Molecules” *Journal of the Physical Society of Japan* Vol. 82, 094717 (2013). (DOI: 10.7566/JPSJ.82.094717)

8. Mina Maruyama and Susumu Okada, “A Two-dimensional sp^2 Carbon Network of Fused Pentagons: All Carbon Ferromagnetic Sheet” *Applied Physics Express* Vol. 6, 095101 (2013). (DOI: 10.7567/APEX.6.095101)
9. Mark A. Bissett, Satoru Konabe, Susumu Okada, Masaharu Tsuji and Hiroki Ago, “Tuning the Chemical Reactivity of Graphene by Mechanical Strain” *ACS Nano* Vol. 7, pp. 10335 -- 10343 (2013). (DOI: 10.1021/nn404746h)
10. Mina Maruyama and Susumu Okada, “Design of New Carbon Allotropes of Fused Small Fullerenes” *Physica Status Solidi (c)* Vol. 10, pp. 1620 -- 1623 (2013). (DOI: 10.1002/pssc.201300237)
11. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, “Electrostatic Potential of Hydrogenated Finite-length Carbon Nanotubes under an Electric Field” *Physica Status Solidi (c)* Vol. 10, pp. 1624 -- 1627 (2013). (DOI: 10.1002/pssc.201300234)
12. Tae-uk Park, Yoko Tomita, and Takashi Nakayama, “First-principles study of Pt-film stability on doped graphene sheets” *Surface Science* Vol. 621, pp. 7–15 (2014). (DOI: 10.1016/j.susc.2013.10.011)
13. Mina Maruyama, Kyoko Nakada, and Susumu Okada, “Energetics and electronic structures of polymerized cyclobutadiene” *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 53, 035103 (2014). (DOI: 10.7567/JJAP.53.035103)
14. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, “Electrostatic modulation of electron-states in MoS_2 : First-principles Calculations” *Journal of Physics: Condensed Matter* Vol. 26, 135001 (2014). (DOI: 10.1088/0953-8984/26/13/135001)

(2) 招待講演

1. 小鍋哲、 “ナノスケール物質における新奇光電・熱電変換の基礎物理”、仙台 “プラズマフォーラム”、東北大学、2013年11月2日.
2. 小鍋哲、 “ナノカーボン物質における励起子多体物性”、ナノフォトニクスシンポジウム「ナノフォトニクスにおける複雑性・多様性と機能」、慶応大学、2013年7月18日.

3. 岡田晋, “グラフェン系物質のデバイス応用にむけた展望と問題” 2013年真空・表面科学合同講演会, 茨城県つくば市・つくば国際会議場, 2013年11月28日.
 4. 小鍋哲, “Multiple exciton generation in carbon nanotubes”, International Conference on Small Science (ICSS2013), Red rock casino resort and spa hotel(ラスベガス), 2013年12月16日.
- (3) 国際会議発表
1. Susumu Okada and Jun-ki Sone, “Massless Electrons on Hexagonal Dangling Bond Network on Hydrogen Deposited Diamond (111) and Si(111) Surfaces” ISANN 2013 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Poipu Beach, Kauai, USA, 2013年12月8日
 2. Mina Maruyama and Susumu Okada, “Design of Novel Two-dimensional Electron Systems” The 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2013年9月12日.
 3. Satoru Konabe and Susumu Okada, “Enhanced Photocurrent in Single-walled Carbon Nanotubes by Exciton Interactions” MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, 2013年11月7日.
 4. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, “Anomalous Electric-Field Screening at the Edge Atomic Sites of Finite-Length Zigzag Carbon Nanotubes” 14th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT13), Aalto University (Espo), 2013年6月26日.
 5. Satoru Konabe, Kazunari Matsuda, and Susumu Okada, “Suppression of Exciton-Electron Scattering in Doped Single-Walled Carbon Nanotubes” 14th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT13), Aalto University (Espo). 2013年6月27日.
 6. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, Susumu Okada, “Tailoring electronic structure of MoS₂ by electrostatic doping” 14th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT13), Aalto University (Espo), 2013年6月27日.
 7. Mina Maruyama and Susumu Okada, “Magnetic Two-Dimensional sp² Carbon Sheet of Fused Pentagons” 14th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT13), Aalto University (Espo), 2013年6月27日.
 8. Junki Sone and Susumu Okada, “Slow Dirac Electrons on Hexagonal Dangling Bond Networks on Hydrogen Deposited Diamond (111) and Si (111) Surfaces” 14th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT13), Aalto University (Espo), 2013年6月27日.

9. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Design of New Carbon Allotropes of Fused Small Fullerenes" The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe Convention Center, Kobe, 2013 年 5 月 23 日.
10. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Electrostatic Potential of Hydrogenated Finite-length Carbon Nanotubes under an Electric Field" The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe Convention Center, Kobe, 2013 年 5 月 22 日.
11. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Two-dimensional sp² Carbon Network of Fused Pentagons: All Carbon Ferromagnetic sheet" MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, 2013 年 11 月 7 日.
12. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Structural Dependence of Electronic Properties of Graphene Nanoribbons on an Electric Field" MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, 2013 年 11 月 7 日.
13. Shota Kigure and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of C₆₀ included within [n]Cyclacene Molecules" MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, 2013 年 11 月 7 日.
14. Daisuke Inotani, Yoji Ohashi, and Susumu Okada, "Collective Properties of Superconducting Graphene" MNC2013, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, 2013 年 11 月 7 日.
15. Shota Kigure and Susumu Okada, "Dynamical Properties and Electronic Structure of C₆₀ included in [n]Cyclacene" ISANN 2013 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Poipu Beach, Kauai, 2013 年 12 月 11 日.
16. Mina Maruyama and Susumu Okada, "A Two-dimensional Carbon Network of Fused Pentagons: All Carbon Magnetic Sheet" ISANN 2013 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Poipu Beach, Kauai, 2013 年 12 月 11 日.
17. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Electronic Properties of Graphene under an Electric Field" ISANN 2013 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, 2013 Poipu Beach, Kauai, 2013 年 12 月 11 日.

VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：久保敏弘

研究員：Christoph Peutter

大学院生：博士後期課程2名、前期課程2名

【1】半導体中のスピンの量子物性と量子情報処理への適用

(1) 量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットのコヒーレント操作（論文[8]、国際会議[7, 11, 14, 20]、国内会議シンポジウム講演[2]）

これまで半導体量子ドットに閉じ込められた少数電子系のスピンを量子ビットとして利用する可能性を検討して来ている。我々が最近提案した微小磁石と振動電場を用いる「電気双極子スピン共鳴」によるこれまでの実験では、ラビ振動数が数 MHz に留まっていた。ところが核スピんに起因する位相緩和時間 T_2^* が数 10 nsec であるため、コヒーレント操作の精度は低い状態であった。今回デバイスの改善により 100 MHz を越えるラビ振動数を実現する事ができ、高い精度でコヒーレント操作が可能となった。一方で、従来印加振動電場の振幅とラビ振動数は比例関係にあったが、この様な大きなラビ振動の条件ではこの比例関係から大きくずれてくる事が分かった。その原因について検討したところ、(1) 量子ドットの閉じ込めポテンシャルの非放物性、(2) 微小磁石による磁場勾配の非線形性、が原因である事を指摘した。

(2) 半導体量子ドット系の非平衡量子伝導（論文[2, 9]、国際会議[5, 10]）

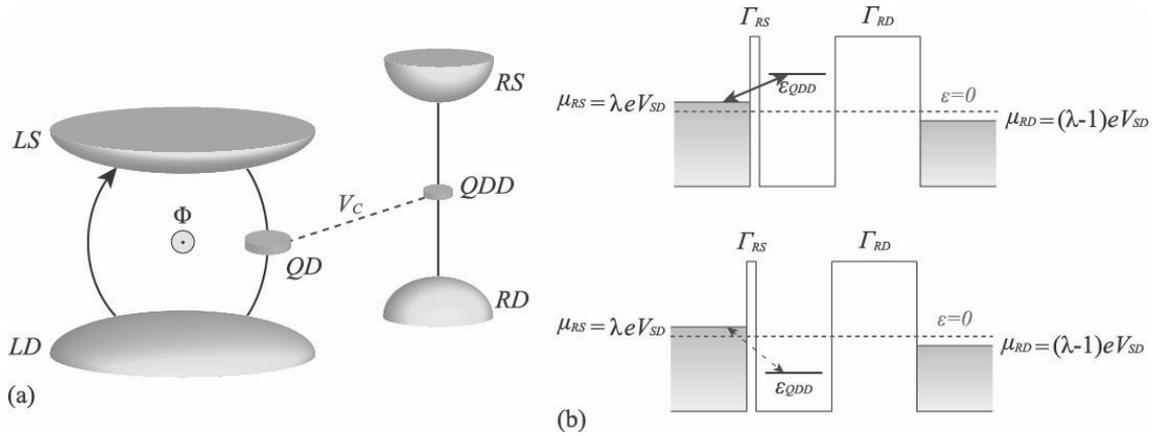
半導体量子ドットを介した量子伝導について検討を加えた。二重量子ドット系の二電子及び三電子状態の励起スペクトルを計算し、縦型構造の結合量子ドット系の非線形伝導の実験結果と比較を行った。その結果、二電子状態では理論と実験は良く整合した。しかし三電子状態では通常はスピン選択則から禁制遷移である励起状態も観測されたが、これは非平衡条件の元で実現した励起状態間の遷移で説明出来る事が分かった。一方電極間に温度勾配を持つ系の熱伝導の問題に着目し、平均熱流と熱電流のゆらぎの関係に代表される「ゆらぎの定理」を理論的に調べた。特に量子ドットに浮遊電極が付いている系を考察した。浮遊電極に流れ込む実質的な熱流は零、その温度は自己無撞着に決まる。関係する時間スケール（トンネル時間と浮遊電極内でのエネルギー緩和時間）が大きく異なる場合に限り、二端子系の「ゆらぎの定理」を確認する事ができた。

【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) 量子ドット電荷計による位相緩和（論文[6]、国際会議[1, 18]）

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ゾ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 1 (a) に示すような Aharonov-Bohm (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た (図 1 (a))。特に、QD が量子ドット電荷計 (QDD) と静電的に結合することによって誘起される位相緩和を議論し、非平衡 2 次摂動理論を用いて、その起源が QDD における電荷揺らぎであることを明らかにした。一方で、

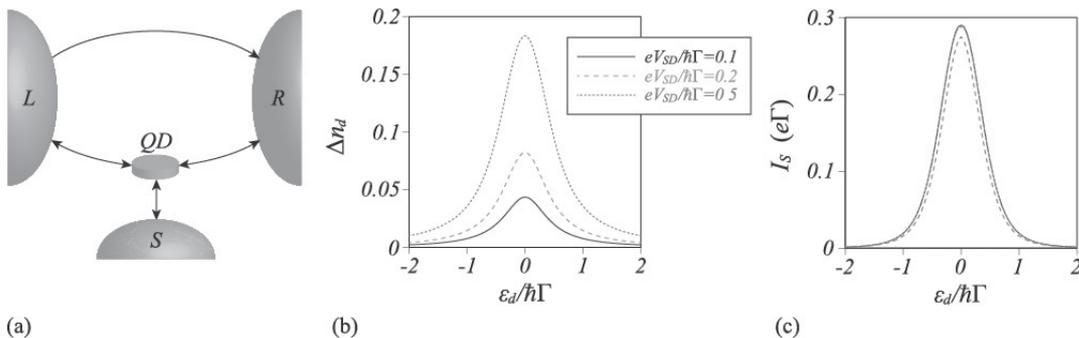
量子ポイントコンタクトと呼ばれる電荷計の場合には、位相緩和の起源は電流揺らぎであることが既に示されているが、これらの起源の違いが位相緩和率のバイアス電圧依存性に現れることも議論した。量子ポイントコンタクト電荷計の場合には、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加する。しかし、QDD の場合には、バイアス電圧が小さい領域においては、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加するだけでなく、減少することもあることを示した。QDD の上記のような特性は(1)QDD のエネルギー準位の位置 (ϵ_{QDD})、(2)QDD と電極との結合強度 ($\Gamma_{RS(RD)}$) の対称性、(3)バイアス電圧 (V_{SD}) の印加の仕方の3つの条件で決定されることを示し、QDD の電荷揺らぎの挙動から理解することができることを示した(図1 (b)) λ は実験的に制御できるパラメタで $0 \leq \lambda \leq 1$ を満たし、 $\mu_{RS(RD)}$ は電極 RS (RD) の電気化学ポテンシャル。



(2) 超伝導電極を用いたスピン分極の検出 (国際会議[4])

近年、スピン・軌道相互作用を利用することで、磁性体や磁場を用いずに電子スピンを制御することができるために、スピン・軌道相互作用を用いたスピン制御の研究が盛んに行われている。2端子常伝導電極(L, R)を用いたスピン干渉計の片方の経路に量子ドット(QD)が埋め込まれた系において、(1)スピン・軌道相互作用が有限で、(2)干渉計が非平衡である、これらの条件が満たされているときには、QD 中の電子スピンの分極が知られている。しかしながら、このような2端子常伝導電極を用いたセットアップでは、スピン分極が生成されていることを実験的に直接測定することはできない。そこで、我々は超伝導電極(S)を導入して(図2 (a))、アンドレーエフ反射を利用することによって、スピン分極が生じていることを実験的に調べることができないかということを議論する。

Nambu-Gor'kov 形式に基づく Keldysh の非平衡グリーン関数法を用いて解析を行った。非平衡な状況が、2つの電極に印加されるバイアス電圧によって実現されたものか、温度勾配によって実現されたものかによって、生じるスピン分極に差ができることを示した。さらに、スピン分極が増大するにつれて、超伝導電極から量子ドットへのアンドレーエフ電流(I_s)が減少することを示した(図2 (b), (c))。



【3】量子ポンプと時間依存伝導現象 (国際会議[8, 9, 15, 17])

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象は重要なテーマである。特に周期的に変化する外部パラメタによる「量子ポンプ」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。今回量子ドット間のトンネル位相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。直列二重ドットの場合は位相の変調幅と共に電流が線形に増大した。特に二重ドット間のトンネル自体が非常に小さい場合は、近似的に有効バイアスの掛かった二電極間のトンネル電流のモデルと同一視できる。またリングを形成した三重ドットの場合はトンネル位相はリングを貫く磁束で制御可能であり、量子ポンプ電流は近似的に量子化された。これらの解析は、「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ていたが、一般化さ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。特に電極の磁場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。従来の研究では見逃されて来た電流成分の寄与を明らかにし、また得られた(スピン)電流の挙動に微視的な考察を加えた。

〈論文〉

(査読論文)

1. Nobuyuki Matsuda, Hiroki Takesue, Kaoru Shimizu, Yasuhiro Tokura, Eiichi Kuramochi, and Masaya Notomi, "Slow light enhanced correlated photon pair generation in photonic-crystal coupled-resonator optical waveguides", *Optics Express* **21**, 8596-8604 (2013)
2. T. Hatano, Y. Tokura, T. Kubo, S. Amaha, S. Teraoka, and S. Tarucha, "Excitation spectroscopy of few-electron states in artificial diatomic molecules", *Phys. Rev. B* **87**, 241414(R) (2013).
3. Stella Bevilacqua, Sergey Cherednichenko, Vladimir Drakinskiy, Hiroyuki Shibata, Yasuhiro Tokura and Jan Stake, "Study of IF Bandwidth of MgB₂ Phonon-Cooled Hot-Electron Bolometer Mixers", *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, **3**, 409 (2013).
4. Hiroyuki Shibata, Kaoru Shimizu, Hiroki Takesue and Yasuhiro Tokura, "Superconducting Nanowire Single-Photon Detector with Ultralow Dark Count Rate Using Cold Optical Filters", *Appl. Phys. Express* **6**, 072801 (2013).
5. Nobuyuki Matsuda, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, Willam John Munro, Kaoru Shimizu, Koji Yamada, Yasuhiro Tokura and Hiroki Takesue, "Monolithic Integration of Polarization-entangled Photon Pair Source Using Silicon Photonics", *NTT Technical Review*, Vol. **11** No.8 Aug. 2013.
6. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, "Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector", *Phys. Rev. B* **88**, 155402 (2013).
7. Takahiro Yokozuka, Kota Ido, Richard Clark, Kyozauro Takeda and Yasuhiro Tokura, "Reconsideration of the relativistic corrections for an electron confined in 2D quantum dot. I. spin-orbit coupling and Rashba effect", *Jpn J. Appl. Phys.* **53**, 031801 (2014).
8. Yasuhiro Tokura, Toshihiro Kubo and William John Munro, "Power dependence of electric dipole spin resonance", *JPS Conference Proceedings* **1**, 012022 (2014).
9. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, "Fluctuation theorem for heat transport probed by a thermal electrode", accepted for publication to *Phys. Rev. B*.
10. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Hideki Gotoh, "Valley-asymmetric potential in graphene under dynamical deformation", arXiv:1404.1170 [cond-mat]. (Submitted to *Phys. Rev. Lett.*)

(解説論文)

1. 都倉康弘、量子もつれ 量子暗号への道、数理科学, No. 608, vol. 2, pp.27-32 (2014).

<講演：国際会議>

1. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Non-Local Aharonov-Bohm Effects in Transport through a Quantum Dot Capacitively Coupled to an Aharonov-Bohm Interferometer out of Equilibrium”, Workshop on Interferometry and Interaction in Non-equilibrium Meso- and Nano- systems”, ICTP Trieste, Italy, 8-12 April (2013).
2. N. Matsuda, E. Kuramochi, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura and M. Notomi, “Ultra- Narrowband Nonlinear Wavelength Conversion Using Coupled Photonic Crystal Nanocavities”, CLEO/EUROPE-IQEC 2013, CK-1.5 SUN, 12-16 May 2013, Munich, Germany. (招待講演)
3. N. Matsuda, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, E. Kuramochi and M. Notomi, “Slow-Light- Enhanced Correlated Photon Pair Generation in a Silicon Photonic Crystal Coupled-Resonator Optical Waveguide”, CLEO/EUROPE-IQEC 2013, IA-6.4 WED, 12-16 May 2013, Munich, Germany.
4. T. Kubo and Y. Tokura, “Spin current and asymmetric Andreev bound state in an interferometer containing a quantum dot with superconducting lead”, 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-16), WeOM5, 1-5 July 2013, Wroclaw, Poland.
5. Y. Tokura and T. Kubo, “Initialization of multiple quantum spins with non-equilibrium bias”, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS- 20), MoP53, 1-5 July 2013, Wroclaw, Poland.
6. Nobuyuki Matsuda, Hanna Le Jeannic, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, William John Munro, Kaoru Shimizu, Yasuhiro Tokura, Koji Yamada and Hiroki Takesue, “Monolithic source of telecom-band polarization entanglement on a silicon photonic chip”, CLEO-Pacific Rim & OECC/PS 2013, ThM1-1, 30 June-4 July, Kyoto, Japan. (招待講演)
7. Yasuhiro Tokura, ” Power Dependence of Electric Dipole Spin Resonance”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14-10 2013, Int Conf. Halls, Makuhari Messe, Japan.
8. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo, and Y. Tokura, “The spin current induced by a geometric pump in quantum dots: Quantum master equation approach”, 2013 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’ 13), AIST Tsukuba Innovation Arena Hall, Tsukuba, July 26, (2013).
9. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo, and Y. Tokura, “Nonequilibrium Green’s function approach to photon-assisted tunneling in quantum dot system”, 2013 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’ 13), AIST Tsukuba Innovation Arena Hall, Tsukuba, July 26, (2013).
10. Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Fluctuation theorem for a two-terminal conductor connected to a voltage or a thermal probe”, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics, 29 July - 3 August 2013, Prague, Czech Republic.
11. Yasuhiro Tokura, Toshihiro Kubo and William John Munro, “Strongly driven spin qubit in a magnetic field gradient”, IXth Rencontres du Vietnam (VietNam 2013), Nanophysics: from fundamentals to applications (the return), August 4-10, 2013. Quy-Nhon Vietnam.
12. Yasuhiro Tokura, Xiaobo Zhu, Shiro Saito, Robert Amsuss, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, William. J. Munro, M. S. Everitt, Kae Nemoto, M. Kasu, Y. Matsuzaki, Norikazu Mizuochi

and K. Semba, “Coherent Coupling of a Superconducting Flux Qubit”, IXth Rencontres du Vietnam (VietNam 2013), Nanophysics: from fundamentals to applications (the return), August 4-10, 2013. Quy-Nhon Vietnam. (招待講演)

13. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura and Tetsuomi Sogawa, “Dirac-cone Migration: Self-energies of Phonons in Graphene”, 5th Int. Conf. on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Sep. 9-13, 2013, Tokyo, Japan, 11p-P2-33.

14. Yasuhiro Tokura, “Electron spins and magnetic field”, FIRST Quantum Spin Information and Technology, School for spin and quantum information, Sep. 24, 2013, Takeda Hall, Univ. of Tokyo. (招待講演)

15. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo and Y. Tokura, “Spin current induced by an adiabatic pump of quantum dots”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 27 2013, Atsugi, Japan.

16. C. M. Peutter, S. Konabe, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and Y. Tokura, “Semiclassical electron dynamics in grapheme-like materials”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 27 2013, Atsugi, Japan.

17. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo and Y. Tokura, “Quantum pumping in quantum dot system”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.

18. T. Kubo and Y. Tokura, “Non-local Aharonov-Bohm effects in transport through a quantum dot capacitively coupled to a non-equilibrium interferometer”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.

19. H. Shibata, K. Shimizu, T. Honjo, H. Takesue, and Y. Tokura, “Fabrication of ultraslow noise SSPD and long distance QKD experiment”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.

20. Yasuhiro Tokura, “Strongly excited electric dipole spin resonance with field gradient”, APS March Meeting, T36.03, March 6, 2014, Denver, Colorado, USA.

〈講演：国内会議〉

1. 松田信幸、武居弘樹、清水薫、都倉康弘、倉持栄一、納富雅也, “フォトニック結晶結合共振器光導波路におけるスローライト効果による光子対生成効率の増強”, 第74回応用物理学会秋季学術講演, 同志社大学、京都、2013/9/17.

2. 都倉康弘, “半導体量子ドットの量子ビット操作”, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学、京都、2013/9/17 (Invited).

3. 山下眞、井桁和浩、清水薫、都倉康弘、井元信之, “不均一広がりをもつ量子ビット系に対する量子 Bang-Bang 制御”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 25pBB-4, 徳島, 2013/9/25.

4. 松崎雄一郎、下岡孝明、田中弘隆、都倉康弘、仙場浩一、水落憲和, “ダイヤモンド中の単一NV中心における電子スピン及び核スピンを用いた磁場検出器”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 25pBB-15, 徳島, 2013/9/25.

5. 中嶋慧、田口真彦、久保敏弘、都倉康弘, “量子ドット系の断熱ポンプによるスピン流：量子マスター方程式による解析”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27aKL-6, 徳島, 2013/9/27.

6. 内海裕洋、O. Entin-Wohlman, A. Aharony, 久保敏弘、都倉康弘, “電圧または温度プローブと結合した2端子量子導体の揺らぎの定理”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27aDD-1, 徳島, 2013/9/27.

7. 都倉康弘、久保敏弘, “磁場勾配を用いた電場誘起スピン共鳴の励起強度依存性”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島 27pDD-5, 徳島, 2013/9/27.
8. 田口真彦、中嶋慧、久保敏弘、都倉康弘, “AB リング・量子ドット複合系における量子断熱ポンプの解析”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27pDD-10, 徳島, 2013/9/27.
9. 久保敏弘、都倉康弘, “非平衡な AB 干渉計と結合した量子ドット系における非局所 AB 効果”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27pDD-11, 徳島, 2013/9/27.
10. 中嶋慧, 田口真彦、久保敏弘, 都倉康弘, “一般化量子マスター方程式による量子断熱ポンプの解析”, 日本物理学会 第69回年次大会、27aBD-12、東海大学, 2014/3/27.
11. 久保敏弘, 都倉康弘, “超伝導電極を含むスピン干渉計におけるスピン依存伝導”, 日本物理学会 第69回年次大会、27pAW-3、東海大学, 平塚, 2014/3/27.
12. 清水賢次, 野口篤史, 松井健太, 田中歌子, 都倉康弘, 占部伸二, “永久磁石付きプレーナートラップを用いたイオンの操作と磁場の評価”, 日本物理学会 第69回年次大会、29pCF-8、東海大学, 平塚, 2014/3/29.

〈学位論文〉

(博士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 大日向正志

“Quantum teleportation for continuous variables via a partially entangled state and nonorthogonal measurement” (部分的エンタングルメント状態と非直交測定をもちいた連続量量子テレポーテーション)

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 中嶋慧

「一般化量子マスター方程式による量子断熱ポンプの解析」

(学位論文)

1. 森田大地

「光格子中の冷却原子を用いた量子ウォークに関する研究」

〈集中講義〉

1. 都倉康弘: 大阪市立大学

凝縮系物理学特別講義 IB 「半導体量子物性」(2013年12月2~3日、大阪市立大学、大阪府)

〈外部資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究(研究領域提案型) 課題番号: 21102003 「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究」平成25年度: 直接経費: 5,450千円(平成21年度~平成25年度、研究代表者: 都倉康弘)

2. 内閣府 最先端研究開発プログラム「量子情報処理」(中心研究者: 山本喜久)「スピン量子コンピュータの理論研究」平成25年度: 8,500千円(平成21年度~平成25年度、研究担当者: 都倉康弘)

〈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~2014年3月
2. 都倉康弘、教員免許更新講習 7月28日

〈外国人招聘〉

1. Prof. Amnon Aharony (Ben-Gurion University, Tel Aviv University), Prof. Ora Entin-Wohlman (Ben-Gurion University, Tel Aviv University, Weizmann Institute) 2014年1月26日～2月11日.

〈その他〉

1. セミナー:久保敏弘「メゾスコピック系における量子コヒーレンス制御」QMS セミナー 早稲田大学、東京 2013. 4. 26.

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

大学院生 3名 (数理物質科学研究科後期過程1名、前期課程2名)

卒研究生 1名

生命物理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等に注目し、そ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。平成25年度には、光合成酸素発生中心(PSII-OEC)、トレオニン合成酵素(TS)における特異的反応機構を生み出す分子メカニズムの解明を高精度計算手法(QM/MM)により行った。また、全原子分子動力学法(MD)により核内受容体の基質結合状態、ウリジンシチジンキナーゼの基質認識機構、トレオニン合成酵素のプロトン化状態の解明を行った。これらの研究には膨大な計算を高速に実行する必要がある為、スーパーコンピューターの効率的利用を改善したうえで、国内のスーパーコンピュータ(T2K-Tsukuba, HA-PACS, 東大 FX10)を利用した。宇宙生命分野においては宇宙理論分野と連携し、アミノ酸生成過程と系外惑星のバイオマーカーについての理論的研究を推進した。

【1】光合成酸素発生中心の電子状態についての理論的研究 (坂本浩隆、庄司光男)

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、生命にとって極めて重要なシステムの1つである。光合成は蛋白質複合体の集合体で構成されており、各複合体は光捕集、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。電子伝達系では重要な化学反応として光合成システムIIにおける酸素発生中心(PSII-OEC)をもち、水の分解反応を行っている。



この反応では電子を水から引き抜いているが、本反応は極めて難しい化学反応である。原子分解能(1.9Å)のX線構造解析は2011年に沈教授(岡大)、神谷教授(大阪市大)によりなされ、初めて活性中心構造とその周りの水分子の位置が明らかになった。活性中心はCaMn4O5クラスターが歪んだ椅子型構造になっている。

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)法を用いて検討を行った。初期の中間状態におけるOEC構造と電荷状態について理論解析を行った。プロトン化状態は実験からではなかなか確定できないため、すべての可能な電荷、スピン、プロトン化状態を検証し、PSII-OECの構造特性を明らかにした。

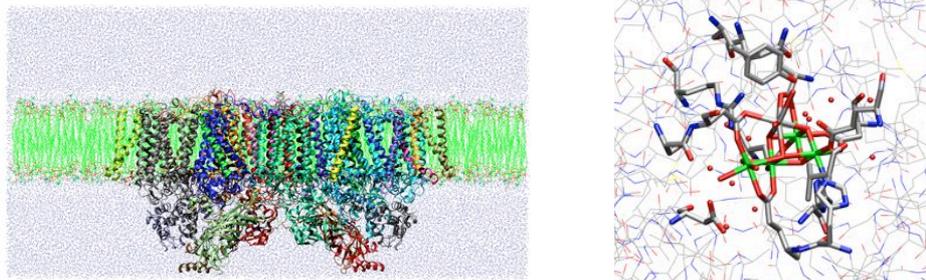


図1. 光合成システム II(左図)と水分解サイト(右図)

【2】トレオニン合成酵素の特異的反応機構の理論的解明（庄司光男）

生体酵素における反応機構と反応制御機構（副反応の抑制機構）は、化学合成における究極のテーマといっても過言でないほど重要である。トレオニン合成酵素(TS)はトレオニン生合成の最終ステップである O-phospho-L-homoserine(OPHS)から L-トレオニンを生成する段階を触媒しており、いくつもの副生成物(α -ケトブチラート、ケトン)の生成を制御している。しかしながら未だTSの反応制御機構は明らかにされておらず、その本質の解明のためには基質・酵素複合体で各反応経路における構造変化とエネルギープロファイルを明らかにすることが不可欠である。

そこで、反応特異性に関わる反応過程に対して高精度理論解析(QM/MM計算)を行い、プロトン化状態と活性中心における水の存在の検証、可能な反応経路を網羅的に探索した。その結果、自由エネルギーが実験値と3kcal以内で一致し、中間体のUVスペクトル形状も完全に実験と一致した。これにより、反応制御因子を明らかにするとともに各中間体の構造特性も初めて明らかにした。研究成果は国際論文誌に掲載され、プレスリリースを行った。

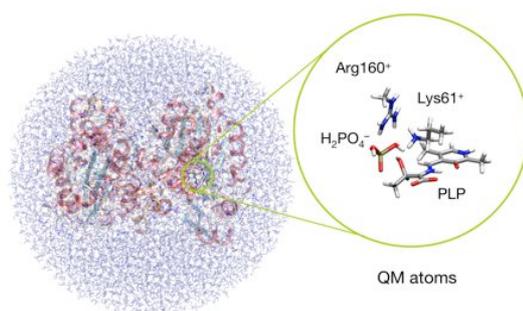


図2. トレオニン合成酵素のQM/MMモデル：(左)全系，(右)QM領域

【3】トレオニン合成酵素の基質結合状態解析（氏家謙）

トレオニン合成酵素における重要な反応中間体について、長時間MDシミュレーションを行うことで、基質結合相互作用解析と基質のプロトン化状態を明らかにした。また、反応過程における活性中心への水分子の侵入についても理論解析を行った。今後は反応制御に関わる中間体における自由エネルギー評価を熱力学積分法により精密に算出することで、酵素反応特有の反応制御機構の解明を試みている。

【4】 ビタミン D 受容体の活性制御機構の解明（花岡恭平）

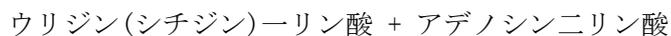
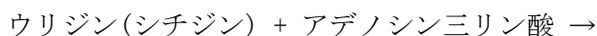
ビタミン D 受容体 (VDR) は核内受容体 (NR) の一つである。NR は重要な創薬標的であり、NR 標的薬は NR のヘリックス 12 を活性構造あるいは不活性構造にする事によって NR が関わる細胞応用を調節する。NR の構造は X 線結晶解析に基づいて理解されて来た。溶液中でのコンフォメーションアンサンブル（可能な構造の集合）が受容体活性の制御に関係する事が実験から示唆されている。しかし、ヘリックス 12 のコンフォメーションアンサンブルの実態は明らかではない。一方で、NR は極めて重要な創薬標的であるため、薬による NR 活性調節機構について多くの計算科学的解析が行われて来たが、NR コンフォメーションアンサンブルの計算モデルは未だ提案されていない。これは全原子分子動力学計算で扱うタイムスケールと実際に蛋白質が構造変化するタイムスケールが大きく異なるためである。

そのため、天然作動薬（受容体を活性化する小分子）結合時のビタミン D 受容体のコンフォメーションアンサンブルを明らかにするために、レプリカ交換分子動力学法による大規模構造探索を行った。レプリカ交換分子動力学法は蛋白質折りたたみ過程の自由エネルギープロファイルの計算などに使われる構造探索加速手法である。

計算によって得られた最安定構造は結晶構造と良く一致する活性構造であった。一方で僅かな自由エネルギー差でヘリックス 12 が大きく構造変化（不活性化）した複数の準安定構造を取りうる事が分かった。これらの準安定構造の一部は、糖質コルチコイド受容体の不活性構造と良く似た構造を取っていた。また、結晶とは異なる準安定な作動薬結合ポケットを発見し、作動薬結合様式とヘリックス 12 構造の関係を明らかにした。それにより、リガンド特異的な VDR 活性制御機構を提案した。

【5】 ウリジンシチジンキナーゼの基質特異性についての理論解明（田中弥）

ウリジンシチジンキナーゼ (uridine-cytidine kinase : UCK) は生体内でエネルギー源や DNA, RNA の材料となる物質をリサイクルする経路で作用し、以下のようにウリジンとシチジンのリン酸化を触媒する。



この反応は腫瘍細胞の成長を抑制する働きも有することから UCK は抗がん剤のターゲットとなっている。UCK では初めにヒト由来のもの結晶構造が解かれたが、高度好熱菌 *Thermus thermophilus* HB8 に由来する UCK (*Thermus thermophilus* UCK : ttCK) は基質が結合する部位に 1 つだけヒト由来 UCK とは異なったアミノ酸残基を持ち、ウリジンには作用しないという基質特異性を持っている。この残基をヒト由来 UCK が持つものと同じ残基に置換された変異体 ttCK ではウリジンにも作用することが置換実験により発見された。

しかしながら ttCK の残基認識がどのようになされているかの分子レベルでの機構が不明であり、1 残基の変化だけで基質認識が大きく変わる理由は結晶構造からでは明らかでない。そこで、MD 法により実際に ttCK と基質の複合体をシミュレーションすることで、正確な相互作用のエネルギーを算出した。野生型および変異体の ttCK と基質であるウリジン、シチジンとの複合体の MD 計算を行った。

酵素基質複合体の安定な結合状態を計算したことにより、野生型 ttCK ウリジン複合体は

シチジン複合体に比べ Arg152 との水素結合がなく、結合の安定性が下がることが分かった。変異体 (ttCKY98H) シチジン複合体では Tyr88, His93, Arg152 の 3 種類の残基がシチジンと水素結合を形成していた。これらの結果は、実験により提唱されたヒト由来 UCK とシチジンとの結合様式と完全に一致していた。一方 Y93H 変異体ウリジン複合体では Tyr88 から His93 にウリジンと水素結合する残基が組み替わっていた。結合自由エネルギー計算からは、ウリジンはシチジンと比べ野生型、変異体ともに ttCK との結合自由エネルギーが小さい結果となった。この結果は、変異体とウリジンの結合は単純な MD 法では記述できない可能性を示唆しており、現在より高精度な方法で理論解析を検討している。

【6】宇宙生命（小松勇*、木立佳理*、* 宇宙物理理論研究室）

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に入る惑星の観測が成功し、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である。

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。

また、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る。そこで、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、グリシン及びアラニンの生成過程について、高精度第一原理計算（密度汎関数法）により検討した。また、水溶液中での反応経路の解析には、Polarizable Continuum Model (PCM) により溶媒効果を考慮した計算を行った。

その結果、真空中では、計算したすべ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。アラニン生成についても同様の傾向が見られた。水溶液中でもグリシンが最も安定であったが、ヒダントイン形成は起こりにくい可能性があることが分かった。以上より、構成要素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。

<論文>

- 1a. [M. Shoji, K. Hanaoka, Y. Ujiie, W. Tanaka, D. Kondo, H. Umeda, Y. Kamoshida, M. Kayanuma, K. Kamiya, K. Shiraiishi, Y. Machida, T. Murakawa, H. Hayashi, "A QM/MM Study of the l-Threonine Formation Reaction of Threonine Synthase: Implications into the Mechanism of the Reaction Specificity", Journal of the American Chemical Society, DOI: 10.1021/ja408780c, 2014.](#)

- 2a. K. Hanaoka, M. Shoji, D. Kondo, A. Sato, M. Y. Yang, K. Kamiya, and K. Shiraishi, "Substrate mediated proton relay mechanism for the religation reaction in topoisomerase II", *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*, DOI:10.1080/07391102.2013.834848, 2013.
- 3a. M. Shoji, K. Hanaoka, D. Kondo, A. Sato, H. Umeda, K. Kamiya, K. Shiraishi, "A QM/MM study of nitric oxide reductase-catalyzed N2O formation", *Molecular Physics*, 112, 3-4, 393-397 (2013).
- 4a. M. Shoji, K. Hanaoka, A. Sato, D. Kondo, M. Yang, K. Kamiya, K. Shiraishi, "Calculation of the Electron Transfer Coupling Matrix Element in Diabatic Reactions", *International Journal of Quantum Chemistry*, 113, 342-347, 2013.
- 5a. K. Yamaguchi, M. Shoji, H. Isobe, Y. Kitagawa, S. Yamada, T. Kawakami, S. Yamanaka, M. Okumura, Theory of chemical bonds in metalloenzymes XVI. Oxygen activation by high-valent transition metal ions in native and artificial systems, *Polyhedron*, 66, 228-244, 2013.
- 6a. M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Umena, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen and K. Yamaguchi, Theoretical insight in to hydrogen-bonding networks and proton wire for the CaMn4O5 cluster of photosystem II. Elongation of Mn-Mn distances with hydrogen bonds, *Catal. Sci. Technol.*, 3, 1831-1848, 2013.
- 7a. K. Yamaguchi, Y. Kitagawa, H. Isobe, M. Shoji, S. Yamanaka, M. Okumura, Theory of chemical bonds in metalloenzymes XVIII. Importance of mixed-valence configurations for Mn5O5, CaMn4O5 and Ca2Mn3O5 clusters revealed by UB3LYP computations. A bio-inspired strategy for artificial photosynthesis, *Polyhedron*, 57, 138-149, 2013.
- 8a. K. Yamaguchi, S. Yamanaka, H. Isobe, T. Saito, K. Kanda, Y. Umena, K. Kawakami, J.-R. Shen, N. Kamiya, M. Okumura, H. Nakamura, M. Shoji and Y. Yoshioka, The nature of chemical bonds of the CaMn4O5 cluster in oxygen evolving complex of photosystem II: Jahn-Teller distortion and its suppression by Ca doping in cubane structures, *Int. J. Quatum. Chem.*, 113, 453-473, 2013.

<学位論文>

- 1b. 花岡恭平、Theoretical elucidations on the activity modulation mechanism of vitamin D receptor and the DNA relegation mechanism of DNA topoisomerase II (ビタミンD受容体の活性制御機構とII型DNAトポイソメラーゼのDNA再結合反応機構に対する計算科学的解明)、博士論文(理学)。

<卒研発表>

- 1c. 坂本浩隆、葉緑体チラコイド膜の構築

<講演>

- 1d. ○庄司光男, 磯辺寛, 山中秀介, 沈建仁, 山口兆, 大規模 QM/MM 法による光合成酸素発生中心の電子状態, 日本化学会春年会 2014, 名古屋大学, 2014/3/27-30, 口頭.
- 2d. ○庄司光男, 氏家謙, 田中弥, 栢沼愛, 梅田宏明, 町田康博, 村川武志, 林秀行, トレオニン合成酵素の反応機構についての理論的研究: 反応特異性決定過程の解明, 日本化学会春年会 2014, 名古屋大学, 2014/3/27-30, 口頭.
- 3d. ○栢沼愛, 花岡恭平, 庄司光男, ニトリルヒドラーゼの触媒機構に関する理論的研究, 日本

- 化学会春年会 2014, 名古屋大学, 2014/3/27-30, ポスター.
- 4d. ○庄司光男、QM/MM 法による光合成酸素発生中心の電子状態と構造, 異分野融合による新材料開発のための計算科学, RIKEN AICS, 2014/3/8 (Invited).
- 5d. ○花岡恭平、庄司光男、栢沼愛、白石賢二、ビタミンD受容体におけるコンフォメーションアンサンブル: 分子動力学法による解明、第36回日本分子生物学会年会、神戸、2013/12/3-6, ポスター.
- 6d. ○M. Shoji, QM/MM study on the photosystem II oxygen evolving complex at the S1 state, 第51回日本生物物理学会年会, 京都, 2013/10/28-30, Oral, invited.
- 7d. ○Megumi Kayanuma, Kyohei Hanaoka, Mitsuo Shoji, Theoretical Study on Catalytic Mechanism of Nitrile Hydratase, 第51回日本生物物理学会年会, 京都, 2013/10/28-30, Poster.
- 8d. ○Mitsuo Shoji, Kyohei Hanaoka, Yuzuru Ujiie, Wataru Tanaka, Megumi Kayanuma, Hiroaki Umeda, Yasuhiro Machida, Takeshi Murakawa, Hideyuki Hayashi, Theoretical elucidation on the reaction control mechanism in Threonine Synthase, 第51回日本生物物理学会年会, 京都, 2013/10/28-30, Poster.
- 9d. ○庄司光男、QM/MM 法による光合成酸素発生中心 S1 状態の電子状態解析、第2回公開シンポジウム人工光合成特別セッション, 立命館大学, 2013/10/28, 口頭、招待講演.
- 10d. ○花岡 恭平, 庄司 光男, 栢沼 愛, 神谷 克政, 白石 賢二、ビタミンD受容体のコンフォメーションアンサンブルと細胞応答, 第86回日本生化学会大会, 横浜, 2013/9/11-12, 口頭+ポスター.
- 11d. ○氏家 謙, 田中 弥, 花岡 恭平, 庄司 光男, 栢沼 愛, 神谷 克政, 白石 賢二, 町田 康博, 村川 武志, 林 秀行、分子動力学法によるトレオニン合成酵素の反応特異性についての理論的解明, 第86回日本生化学会大会, 横浜, 2013/9/11-12, ポスター.
- 12d. ○庄司 光男, 氏家 謙, 田中 弥, 花岡 恭平, 梅田 梅田, 栢沼 愛, 神谷 克政, 白石 賢二, 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特異性についての理論的解明, 第86回日本生化学会大会, 横浜, 2013/9/11-12, 口頭+ポスター.
- 13d. ○田中 弥, 氏家 謙, 花岡 恭平, 庄司 光男, 栢沼 愛, 神谷 克政, 友池 史明, 倉光 成紀, 白石 賢二、ウリジンシチジンキナーゼ (ttCK) の基質認識機構についての分子動力学解析, 第86回日本生化学会大会, 横浜, 2013/9/11-12, ポスター.
- 14d. M. Taguchi, Y. Komatsu, A. Sato, ○M. Shoji, M. Kayanuma, K. Kamiya, K. Shiraishi, K. Yabana, and M. Umemura, Theoretical investigation on the absorption spectrum of photosystem as a biomarker of extrasolar plants, ISTCP-8@Budapest, Hungary, 2013/8/25, poster.
- 15d. ○W. Tanaka, Y. Ujiie, K. Hanaoka, M. Shoji, M. Kayanuma, K. Kamiya, T. Ishida, F. Tomoike, S. Kuramitsu, K. Shiraishi, Theoretical Investigation on the Substrate Specificity of Uridine-cytidine Kinase, ISTCP-8@Budapest, Hungary, 2013/8/25, Poster.
- 16d. ○Y. Ujiie, W. Tanaka, K. Hanaoka, M. Shoji, M. Kayanuma, K. Kamiya, T. Ishida, K. Shiraishi, Y. Machida, T. Murakawa, H. Hayashi, Molecular dynamics study on the substrate binding free energy of Threonine Synthase, ISTCP-8@Budapest, Hungary, 2013/8/25, Poster

- 17d. ○M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, N Kamiya, J.-R. Shen, and K. Yamaguchi, QM/MM study on the photosystem II oxygen evolving complex at the S1 state, The 16th International Congress on Photosynthesis Research @St. Louis(MO), 2013/8/11, Poster.
- 18d. ○M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaka, N. Kamiya, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, Theoretical investigation on the electronic structures of photosystem II oxygen evolving complex at the S2 state, 1st Awaji International Workshop on “Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications” (1st AWEST2013), 2013/6/16, oral (invited).
- 19d. ○Y. Komatsu, M. Umemura, M. Shoji, K. Yabana, K. Shiraishi, K. Kamiya, M. Kayanuma, A. Sato, The energy transfer simulation for detecting photosynthetic biosignatures on extrasolar planets, 1st AWEST2013, 2013/6/16, Poster.
- 20d. ○氏家 謙、田中 弥、花岡 恭平、庄司 光男、栢沼 愛、神谷 克政、白石 賢二、町田 康博、村川 武志、林 秀行、分子動力学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計算、蛋白質科学会年会、鳥取、2013/6/13、ポスター。
- 21d. ○田中 弥、氏家 謙、花岡 恭平、友池 史明、庄司 光男、栢沼 愛、神谷 克政、倉光 成紀、白石 賢二ウリジンシチジンキナーゼの特異的基質認識機構の理論的解明、蛋白質科学会年会、鳥取、2013/6/13、ポスター。
- 22d. ○花岡 恭平、庄司 光男、栢沼 愛、神谷 克政、白石 賢二 QM/MM 法による HIT スーパーファミリー酵素の触媒機構の解明、蛋白質科学会年会、鳥取、2013/6/13、ポスター。
- 23d. ○庄司 光男、花岡 恭平、氏家 謙、田中 弥、梅田 宏明、栢沼 愛、神谷 克政、白石 賢二、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特異性決定過程の理論解明、蛋白質科学会年会、鳥取、2013/6/13、口頭(招待)+ポスター。
- 24d. ○小松勇、梅村雅之、庄司光男、矢花一浩、白石賢二、神谷克政、栢沼愛、田口 真彦、佐藤 皓允、太陽系外惑星バイオマーカー検出に向けた光捕集機構のエネルギー転移計算、Japan Geoscience Union Meeting 2013, 5/19-24, 口頭。
- 25d. 田口 真彦、小松勇、佐藤皓允、○庄司 光男、栢沼愛、神谷克政、白石賢二、矢花一浩、梅村雅之、系外惑星のバイオマーカーのための光合成光吸収についての理論的研究、Japan Geoscience Union Meeting 2013, 5/19-24, 口頭。
- 26d. ○M. Shoji, K. Hanaoka, Y. Ujiie, W. Tanaka, M. Kayanuma, H. Umeda, Y. Machida, T. Murakawa, H. Hayashi, BIT's 4th Symposium on Enzymes and Biocatalysis 2013 (SEB-2013), Nanjing, 2013/4/26, China, oral(invited).

<その他(発表等)>

- 1f. ○M. Shoji, Methods and applications for biomolecular simulations, Computational Science Literacy, Mar. 19, 2014, CCS.
- 2f. 庄司、花岡、坂本、第3回つくば科学研究コンテスト、審査員、2014/3/16.
- 3f. 「筑波大 スパコンを用いてトレオニン生合成の最終過程を明らかに」、QLife Pro, 2014/3/26.
- 4f. 庄司光男、林秀行、必須アミノ酸”トレオニン”生合成の最終過程が明らかに—スーパーコンピュータで網羅的に反応経路を探索、プレスリリース、筑波大学、大阪医科大学、2014/3/14.

- 5f. ○花岡恭平, レプリカ交換分子動力学法によるビタミン D 受容体のコンフォメーションアンサンブルの生成, つくばソフトマター研究会 2014, 2014/3/3.
- 6f. ○庄司光男, 酵素反応機構の理論的解明, つくばソフトマター研究会 2014, 2014/3/3.
- 7f. ○M. Shoji, Computational bioscience with supercomputers, Division of Life Sciences, External Review (Reviewer: Andrew Roger), 2014/2/19.
- 8f. ○庄司光男, 生体内化学反応の理論解明, 物理学セミナー, 2013/11/13.
- 9f. ○庄司光男, 生体システムにおける動作原理の理論的解明, 第 5 回「学際計算科学による新たな知の発展・統合・創出」シンポジウム, 2013/11/6.
- 10f. ○庄司光男, トレオニン合成酵素における反応制御機構の理論的解明, 5th JHPCN, 品川, 2013/7/11.
- 11f. ○M. Shoji, Computational Bioscience Utilizing Supercomputers: Performance and Applications, CCS-EPCC Workshop, CCS-Tsukuba, 2013/7/4-5.
- 12f. 田口真彦, 小松勇, 佐藤皓允, 木立佳里, ○庄司光男, 栢沼愛, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二, L 型アミノ酸生成機構とバイオマーカーのための光合成光吸収機構についての理論的研究, 「宇宙生命計算科学連携拠点」ワークショップ, CCS-Tsukuba, 2013/6/28-29.

<外部資金>

1. 科研費、若手研究 B、生体酵素における反応機構と反応制御機構解明のための理論的研究、研究代表者: 庄司光男.

<受賞>

1. 花岡恭平、研究科長賞 (筑波大学数理物質科学研究科)。

IX-1. 磁性物性グループ

准教授 小野田 雅重

大学院生 8名 (数理物質科学研究科後期課程1名, 前期課程7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」, 「バナジウム酸化物系」, 「コバルト酸化物系」などの研究状況を簡潔に整理する. 2013年度, 本グループが対象とした物質群を図1に示す¹.

【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興味深い. これまで充放電過程における物質の基礎的性質を多角的に追究した例はほとんどなく, 多くの検討すべき課題が存在する.

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.

(1) $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ($3 \leq x < 12$)

$Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の充電過程は, 基本的に $V_3P_8O_{29}$ 当り3モル以上のLi脱離に基づく. これは, $Li_9V_3^{3+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2 \Leftrightarrow Li_6V_3^{4+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2 \Leftrightarrow Li_3V_3^{5+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ 間の2電子反応に対応する. $Li_9V_3^{3+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2 \Leftrightarrow Li_{12}V_3^{2+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の放電過程も含め, X線四軸回折の手法により精密構造を決定するとともに, Liの拡散径路を評価した. Vイオンの結晶場が中間的結晶場にあることを示し, 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2-5; 学会発表1-3, 6, 8; 継続)

(2) $Li_{9-x}Ag_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ($0 < x \leq 1$)

$Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の充放電特性改良のため, $Li_{9-x}Ag_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ 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 (継続)

¹機能性バナジウム酸化物およびポリアニオン系に関する最近の研究成果は, 日本結晶学会誌 56 (2) (2014) に掲載される予定である.

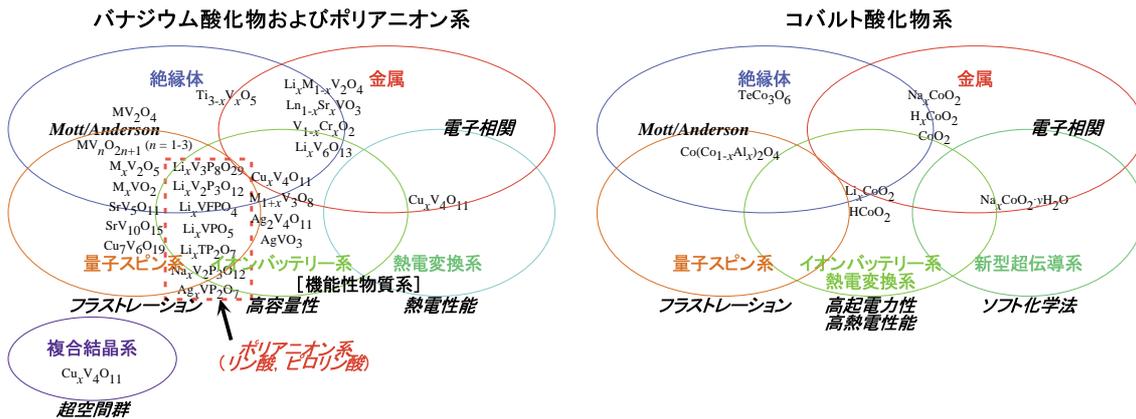


図 1: 2013 年度, 本グループが研究対象としたバナジウム酸化物系, ポリアニオン系ならびにコバルト酸化物系の物質群 .

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

Li イオン二次電池あるいは全固体二次電池への応用を念頭に, $Ag_xVP_2O_7$ 系を開発した. V イオンの結晶場が中間的結晶場にあり, 基底状態が軌道一重項をとることを指摘した (学位論文 2)

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

三斜晶 Li_xVOPO_4 は高温で一次元磁性を示し, 10 K で一種のスピンプイエルス状態に転移する. また一次元常磁性状態とスピンプイエルス状態の間にスピン 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 で低次元スピン系特有の帯磁率極大を持ち, 9.8 K で反強磁性転移を示す. また若干の格子定数の相違により, 帯磁率極大温度が変化する. 本年度は, Li_xVFPO_4 の充放電組成の単相化と物性解析を進めた (論文 1; 学会発表 7-9; 継続)

(5) ナシコン型 $Na_xV_2(PO_4)_3$ 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 (学位論文 1; 学会発表 10; 継続)

【2】バナジウム酸化物系

(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当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全固体電池用正極材料あるいは固体電解質への応用を指摘した. 現在, その基

礎となる実験を進めている．また $(\text{Cu}_{1-z}\text{M}_z)_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ ($x = 2.2$) の元素置換系 ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Ag}$) 単結晶および多結晶に関する物性解析を進めた (論文 3; 学会 2, 8; 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 (継続)

(3) 量子スピン系

幾何学的競合系として, 主として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 Li_xVO_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 Na_xVO_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】コバルト酸化物系

三角格子型 Li_xCoO_2 をはじめとするコバルト酸化物系は, 特に二次電池の観点から精力的に研究されている．一方で, 本系には, 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．また類似の構造を持つ $\text{Na}_{0.3}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$ における超伝導の発見は, Na_xCoO_2 も含めた本系の基礎研究を活発化させた．

これまでに Li_xCoO_2 ($0.5 < x \leq 1$) と $x = 0$ の構造・物性研究を行ってきたが, 本年度は $0 < x < 0.5$ における種々の組成をソフト化学的に合成し, 評価を行った (学位論文 3; 学会発表 4, 5; 継続)

また LiCoO_2 のソフト化学処理により得られる CoO_2 の積層不整および弱相関金属性に基づく電気二重層キャパシタへの応用を考案した (特願 1; 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 SrTiO_3 , 六方晶 BaTiO_3

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酸化物 $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ 系などの輸送機構を検討してきた．現在は, BaTiO_3 の最高安定相である六方晶型 $\text{BaTiO}_{3-\delta/2}$ 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) ペロブスカイト関連格子 Sr_2TiO_4

Sr_2TiO_4 の酸素欠損系に関して, 熱電素材の観点から研究を進めた (保留)

(3) 三角格子 Li_xNiO_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 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. Masashige Onoda and Satoshi Ikeda, Crystal structure and spin-singlet state of the Li_xVOPO_4 insertion electrode system with alternating-bond chain
Journal of the Physical Society of Japan **82**, 053801 (5pp) (2013).
2. Masashige Onoda and Satoshi Ikeda, Crystal structures and long-range spin orders for the delithiated phase of $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ insertion electrode system
Journal of the Physical Society of Japan **82**, 074801 (8pp) (2013).
3. 小野田雅重, バナジウム酸化物およびポリアニオン系を対象とした次世代二次電池正極活物質の結晶構造, 電子状態, 並びにスピンドイナミクス
第 16 回超イオン導電体物性研究会講演集 (2013) pp. 35–42.
4. 小野田雅重, 平成 24 年度知的財産活用プロジェクト: 次世代二次電池正極材料 $\text{Li}_9\text{V}_3\text{P}_{8-\delta}\text{O}_{29-\delta'}$ の高度化および関連物質系の開発
平成 24 年度 ILC センター紀要, pp. 141–144 (2013).
5. 小野田雅重, リン酸ピロリン酸バナジウムリチウム正極活物質の開発
リチウムイオン電池活物質の開発と電極材料技術 (サイエンス&テクノロジー, 東京, 2014) 第 3 章, 第 6 節, pp. 131–143.

〈 学位論文 〉

1. 金沢浩紀, ナシコン型 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ の物性及び関連系の創生
数理工学物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2014 年 3 月
 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ はナシコン型構造をとり, 六方晶的には, V イオンの ab 面内ネットワークは $\text{V}-\text{O}-\text{P}-\text{O}-\text{V}$ 経路を介した蜂の巣格子で表される. X 線回折, 帯磁率・電気抵抗率測定ならびに ^{23}Na 核の NMR を通してその物性を追究するとともに, 電気伝導性の向上を念頭に $\text{Na}-\text{Ag}$ 置換系を作成した. $\text{Na}_{3-x}\text{Ag}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 系において以下の性質を明らかにした: (1) 帯磁率が x にほとんど依存せず, 約 9 K で低次元反強磁性スピン系特有の極大を示す; (2) V^{3+} の結晶場が中間的であるため, キュリー定数が自由イオン値より約 2 割小さい; (3) $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ は約 4 K で反強磁性転移を示す; (4) $\text{Na}-\text{Ag}$ 置換により, 電気抵抗率が一桁以上減少する.
2. 坂本拓磨, ピロリン酸バナジウム銀系の創生
数理工学物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2014 年 3 月
バナジウムポリアニオン系における電気伝導性の改善および新規リチウム二次電池あるいは全固体電池への応用を念頭に物質探索を行った結果, $\text{Ag}_x\text{VP}_2\text{O}_7$ 系の創生に成功した. 帯磁率は低温で飽和傾向を示し, 20 K 以上の領域でキュリー則に従った. ここでキュリー定数は, 自由イオン値より約 2 割減少した. これはバナジウムポリアニオン系の特徴の一つである中間的結晶場を適用することにより理解できた. また電気抵抗率は, ピロリン酸バナジウム塩系の代表物質である LiVP_2O_7 よりも著しく減少することがわかった.
3. 鈴木皓司, 三角格子型 Li_xCoO_2 における Li 低濃度相の磁性と伝導
数理工学物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2014 年 3 月
三角格子型 ATO_2 系 (A : アルカリ金属, T : 遷移金属) は, 基本構造を保持したまま A イオンの脱離・挿入が可能であり, T イオンは 3 価と 4 価の状態をとる. そのため A 濃度に応じて価数分布が変化し, 物性が変化する. Li_xCoO_2 系は二次電池正極活物質として実用化されており, $0.5 \leq x \leq 1$ における正極性能向上あるいは基礎物性の研究が行われてきた. 一方で, $0 < x < 0.5$ の物性は明らかにされていない点が多い. 本研究では, Li_xCoO_2 ($0 < x < 0.5$) 系を合成し, 電気抵抗率, 熱電能, 帯磁率, ESR ならびに MAS-NMR 測定を行った. この領域における電子状態は弱相関金属的であり, $x \approx 0.4$ で現れる 170 K の磁気異常は, 電子状態密度の変形を伴う転移であることがわかった.

〈 学会発表など 〉

1. 小野田雅重, リチウムイオン二次電池用高性能正極材料の開発
つくば国際戦略総合特区 産学官マッチング・デイ 2013, つくば国際会議場大会議室 101, つくば市, 2013 年 6 月 25 日

2. 小野田雅重, バナジウム酸化物およびポリアニオン系を対象とした次世代二次電池正極活物質の結晶構造, 電子状態, 並びにスピンドYNAMIX
第16回超イオン導電体物性研究会 109, 日立シビックセンター, 日立市, 2013年7月11日
3. 小野田雅重, リチウムイオン二次電池用高性能正極材料の開発
インフォーマルミーティング, 2013年8月2日
4. 小野田雅重, 齊藤佑弥, 渋谷龍太, 三角格子型二次電池正極活物質 Li_xCoO_2 系の電子状態とスピンドYNAMIX
日本物理学会 2013年秋季大会 25aKF1, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島市, 2013年9月25日
5. 鈴木皓司, 小野田雅重, 三角格子型二次電池正極活物質 Li_xCoO_2 系における Li 低濃度相の電子状態
日本物理学会 2013年秋季大会 25pPSB40, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島市, 2013年9月25日
6. 齋藤裕亮, 稲垣誠, 小野田雅重, 新型二次電池正極活物質 $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ 系の Li 高ドーブ相の結晶構造と磁性
日本物理学会 2013年秋季大会 26aKM12, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島市, 2013年9月26日
7. 石橋剛彦, 小野田雅重, 二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ 系の構造モデルと磁性 IV
日本物理学会 2013年秋季大会 27pKM10, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島市, 2013年9月2日
8. 小野田雅重, バナジウムポリアニオン正極系の結晶構造, 電子状態, ならびにスピンドYNAMIX
実用化に向けた高容量・高エネルギー密度リチウムイオン電池正極材の開発技術動向 第2部, きやりあん 5階第2講習室, 東京都品川区大井町, 2014年2月27日
9. 石橋剛彦, 小野田雅重, タボライト型 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ 系の結晶構造と磁性 V
日本物理学会第69回年次大会 27aPS56, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2014年3月27日
10. 小野田雅重, 金沢浩紀, ナトリウム含有バナジウムポリアニオン系の結晶構造と電子状態
日本物理学会第69回年次大会 27aPS57, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 2014年3月27日

〈高校生・中学生対象授業, 講演など〉

1. 小野田雅重, 物質科学 - 物理学の基礎から学際領域研究まで -
筑波大学附属高等学校研究室体験, 筑波大学, 2013年5月10日
2. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学
物理チャレンジ2013 フィジックス・ライブ, 筑波大学, 2013年8月6日
3. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学
平成25年度受験生のための筑波大学説明会, 筑波大学, 2013年8月25日
4. 小野田雅重, 物性物理: 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, 2013年11月3日
5. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学
先端科学講座, 茨城県立竹園高等学校, 2013年11月14日

〈産学連携など〉

1. 小野田雅重, 知的財産活用プロジェクト, バナジウムポリアニオン系における二次電池用電極活物質の開発 (2013-2014)

〈特許公開・出願〉

1. 小野田雅重, キャパシタ用電極とその製造方法, 及びキャパシタ, 特願 2014-12836

〈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 2014 (31th Edition), 2013年11月

IX - 2. 半導体物性グループ

名誉教授 舩本 泰章

准教授 野村 晋太郎、池沢 道男

助教 富本 慎一

大学院生 12名

【1】量子ドットの分光研究（池沢道男、舩本泰章）

(1) CdS 量子ドットの電荷移動とスピンドィフェージング（舩本泰章、海野晃）

量子ドットから透明導電体への高速電子移動は、高効率量子ドット太陽電池においては極めて重要な要素である。異なる g 因子を持つ電子、正孔や励起子を分離して極めて感度よくスピンドィフェージングとそのディフェージングを測定できる時間分解ファラデー回転（TRFR）により、量子ドット中に光生成された電子・正孔対が分離して、導電体に移動する過程を可視化する事をめざした。

実験は化学合成された CdS 量子ドットを対象に、フェムト秒 Ti:Sapphire レーザー再生増幅器（250kHz）システムからの二倍波を用いて $1s_e-1s_h$ 遷移を励起して、電磁石による横磁場下で TRFR によって室温においてスピンドィフェージングを測定した。図 1 は、上から順にトルエン中に入れた CdS 量子ドット（平均直径=2.8nm）、TiO₂ ナノ粒子にリンクした CdS 量子ドット、N,N'-Bis(3-methylphenyl)-N,N'-bis(phenyl)benzidine (TPD) と CdS 量子ドット、CdS/ZnSe コアシェル量子ドットについての TRFR 信号を示す。図 1 中の上部の 3 つのトレースは、0.53T 下の TRFR、下部のトレースは、1T 下の TRFR 信号である。LUMO（伝導帯）、HOMO（価電子帯）のエネルギーの上下関係から、CdS 量子ドットから TiO₂ には電子が移動し、正孔輸送材料 TPD へは正孔が移動し、タイプ II 型 CdS/ZnSe コアシェル量子ドットでは電子が CdS コアに残り正孔が ZnSe シェルに移ると期待される。図に見られる TRFR 信号は、 $g=1.95$ の局在電子の歳差運動がもたらす減衰振動成分と正孔・励起子の g 因子の異方性がもたらす非振動成分からなり、室温で $T_2^*=0.35\text{ns}$ の量子ドット集団にある局在電子のスピンドィフェージングと正孔輸送ポリマーへの正孔が少しゆっくり移動しているのが観測された。

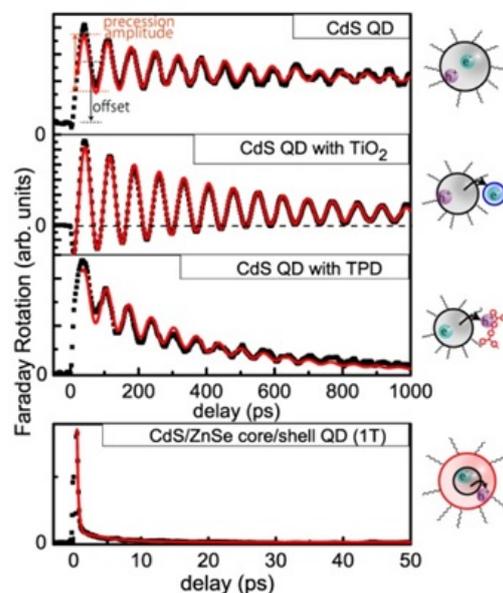


図 1: CdS 量子ドット（平均直径=2.8nm）、TiO₂ ナノ粒子にリンクした CdS 量子ドット、TPD ポリマーと CdS 量子ドット、CdS/ZnSe コアシェル量子ドットについての時間分解ファラデー回転信号。

(2) CuInS₂量子ドットの高速キャリアダイナミクス (Jianhui Sun (孫建輝)^A、Dehua Zhu², Jialong Zhao^{A, B}, 池沢道男, Xiuying Wang^A, 舛本泰章^A Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (中国科学院、長春光学・精密機械・物理研究所)^B College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University (温州大学機械・電気工学部)) [論文4]

毒性の低い量子ドットである CuInS₂量子ドットは太陽電池への応用が期待されている。CuInS₂量子ドットの光学非線形性発現のメカニズム、および超高速キャリアダイナミクスをフェムト秒過渡吸収分光法を用いて研究した。ブリーチングスペクトルには、サイズに依存した 1S 遷移エネルギーが明瞭に観測され、その粒径依存性は有効質量近似を用いた有限井戸のモデルによる計算と良く一致する。過渡的吸収ブリーチング信号は量子化された電子準位の占有に起因する事が示され、その時間変化から CuInS₂量子ドット中の 1S 電子のダイナミクスを議論することが出来る。図 2 に示されるように、CuInS₂量子ドットでは、100ps 以下の時間で初期減衰が見られ、初期減衰速度の粒径依存性から、電子は表面の欠陥準位に捕獲され、その捕獲過程は電子のドット表面での確率振幅により支配され、量子ドットの粒径が小さくなるほど促進されると理解できる。一方、CuInS₂/ZnS コアシェル量子ドットでは、表面欠陥準位への捕獲は効果的に抑制され、初期減衰が見られない。このような事実から、CuInS₂量子ドットの長寿命発光は、1S 電子と局在正孔間の遷移に関係している事が判明した。この研究により、CuInS₂量子ドットの光励起後のキャリアダイナミクスを明らかにすることが出来た。

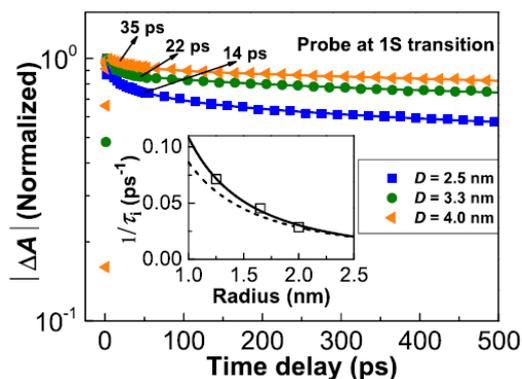


図2: 種類の粒径の CuInS₂量子ドットの過渡吸収時間トレース。挿入図には初期減衰速度をドットの半径に対してプロットを示す。初期減衰速度が表す電子が表面の欠陥準位に捕獲される速度は半径の-1.8 乗に比例している。破線は捕獲過程が電子のドット表面での確率振幅により支配されるとしたモデル計算結果。

(3) ZnO:Gaのトリオン共鳴カー回転 (舛本泰章, 村上瑛, 海野晃)

核スピンのゼロになる核の自然存在比が大きいため長いスピン緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を持つ ZnO 薄膜中の Ga ドナー (濃度 $6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) により与えられた局在電子からトリオンを生成する共鳴励起によるスピン初期化の過程を調べた。

すでにフェムト秒時間分解カー回転測定法では共鳴スピン増幅を用いて長い緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を精度よく求めたが、スペクトル幅が 0.2meV と狭いピコ秒パルス (2ps) を使った時間分解カー回転測定法を用いて、A 励起子の低エネルギー側の裾でレーザーエネルギーを変えてカー回転を調べると、A 励起子と D⁰X 共鳴エネルギー近傍で電子のカー回転信号 (磁場 0.5T のとき周期 74ps) が符号を変えながら増強される。特に D⁰X 共鳴エネルギー近傍では、D⁰X の発光ピークおよびその $2\text{meV} - 4\text{meV}$ ほど低エネルギーでも電子のカー回転信号が増強される。

さらに D⁰X 共鳴エネルギー近傍では、120fs の時間分解カー回転測定法で全く見えなかった電子のオ

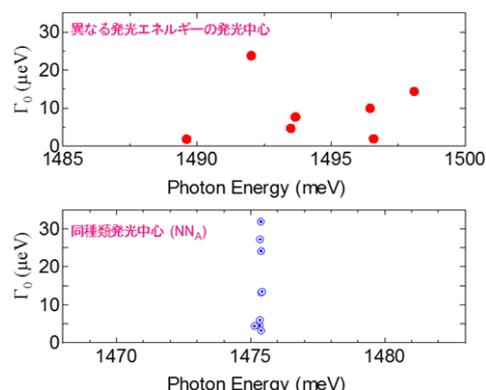


図 3: 上は不均一性のある発光中心の均一幅 (位相緩和時間の逆数で決まる) の測定結果。下は、エネルギーが良くそろった NN_A 等電子トラップの均一幅。同一種類の等電子トラップにもかかわらず、上と同じような大きなばらつきが見られる。

差運動以外の微細な振動構造（周期 19ps）がカー回転信号の立ち上がり部分に観測された。

（4）同じ原子配置からなる等電子トラップに束縛された励起子の位相緩和（張遼，池沢道男，佐久間芳樹^A 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、応用上も光子の干渉性に関わるため重要である。これまでのGaAs中の窒素等電子トラップに関する研究で、エネルギー的には近い発光中心でも位相緩和時間にはばらつきがあることが分かっていた。この原因が、それぞれの発光中心の微細なエネルギー準位の構造に依存するのか、それ以外の効果なのかを切り分けることが必要である。

ある種の等電子トラップは、不純物原子の配置に依存して特定のエネルギーを持ち、同一のエネルギー微細構造を持つので、この問題を議論するために都合が良い。そのような等電子トラップとして、例えばGaP中のNNペアや、GaAs中のNN_A, NN_B, NN_F発光中心などがある。ここでは、GaAs中のNN_A発光中心の位相緩和時間を、発光のフーリエ分光法を用いて測定した。図3上は、不均一性のあるこれまでの試料に関する位相緩和時間の測定結果を示している。横軸に示されているように、10meV程度の発光エネルギーの不均一性があり、対応する均一幅（縦軸）の値もばらついている。図3下に複数のNN_Aについての結果を示す。まず、発光エネルギーは0.1meV程度の不均一性しかなく、極めて良くそろっていることが分かる。しかし、低温での均一幅には3~30μeVもの大きなばらつきが見られる。これは、低温での位相緩和が、主に等電子トラップの周囲の欠陥など、外因性の機構で決まっていることを示している。

（5）単一等電子トラップの共鳴蛍光（池沢道男，張遼，安田直人，佐久間芳樹^A A物質・材料研究機構）

単一の二準位系を狭線幅のレーザーで共鳴励起することによって、二準位系の寿命で決まるフーリエ変換限界の位相緩和時間を超えた、超コヒーレントな単一光子が得られる可能性がある。昨年度までの研究で、GaAs中の窒素等電子トラップについて、試料側面からの共鳴励起光の入射によって散乱光を低減し、単一の等電子トラップから非古典光が発生できる事を確認していた。

これをさらに進めて単一光子としての純度を高めるとともに、発生した非古典光のスペクトルを測定して、自然幅より狭いことを確認することを目指して研究を行った。走査型ファブリーペロー干渉計と、単一光子検出器を組み合わせ、微弱光の高分解能スペクトル測定系を構築した。予備的な実験として、減衰させた励起レーザーのスペクトルを測定する事はできたが、単一の等電子トラップからの共鳴蛍光のスペクトル測定にはまだいくつかの問題があり成功していない。例えば、表面での全反射を利用した現在の手法では、散乱光強度が表面の欠陥に敏感なため、実験の再現性に難がある。さらに、試料内で起こる共鳴励起光の干渉が影響を与えることも分かった。これらは、今後、試料内部に導波路構造を作製することで大幅に改善できるものと期待される。また、共鳴蛍光のスペクトルからは、通常バンド間励起の発光スペクトルでは埋もれていた大きな励起子微細分裂に関する情報が得られることが明らかになり、分光法としても期待される。

（6）GaAs:N中の等電子トラップのパーセル効果（池沢道男，佐久間芳樹^A, 迫田和彰^A, 杉本喜正^A, 張遼^A 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開始した。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。

今年度はGaAs:N中の窒素等電子トラップとのカップリングに最適な2次元フォトニック結晶構造の設計を行い、その試作を行った。高濃度のデルタドーブ層を含む試料についてL3キャビティ（図4上）を作製し、低温で顕微発光スペクトルを測定したところ、キャビティモードに起因すると考えられる鋭いピークが多数観測された。そのエネルギーの設計パラメータ依存性も計算結果とよく一致していた。今後、希薄なデルタドーブ層を持つ試料について同様のフォトニック結晶を作製し、単一の等電子トラップとキャビティモードの結合を実現して、パーセル効果の観測を目指す。

別の方法として、ブラック反射鏡をデルタドーブ層の上下に作りこんだ試料をピラー状にエッチングすることで微小共振器を得る方法も試みている。図4下はGaAsだけの試料についての試作結果で、直径2 μm 程度のピラーが綺麗に形成されているが、ブラック反射鏡のためにはAlGaAsを低屈折率層として用いる必要があり、Alを含む試料についてはエッチング法の改良が必要であることが明らかになった。

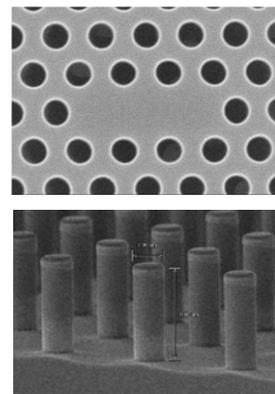


図4: 上はL3キャビティの例。下は試作したGaAsのピラー構造。

【2】半導体ナノメートル構造の光物性（野村晋太郎）

(1) 量子ホール系カイラルエッジ状態のスピ分解観測（間明田、柴田、野村）[論文10]
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。前年度までに、私達は近接場走査型光学顕微鏡を用いてスピ分裂した量子ホール端状態を実空間で観測することに成功した。本年度は、近接場光プローブにさらに改良を加えた。近接場光プローブと希釈冷凍機内に光を導入するための光ファイバにおいて付加される光の位相を、外部から補正する手法を確立した。以上により、近接場光プローブを用いて希釈冷凍機中の試料に円偏光を照射することに成功した。光学的手法の特徴の一つは照射光の円偏光状態を制御することにより、光生成される電子のスピン状態を制御可能なことであるが、従来は近接場光プローブのわずかな歪みによる複屈折や偏光に依存した散乱により近接場走査型光学顕微鏡を用いた偏光に依存した測定は難しいとされていた。

以上の研究成果を受けて、量子ホール系カイラルエッジ状態のスピ分解観測を行った。希釈冷凍機温度においてGaAs/AlGaAs変調ドーブ単一ヘテロ接合ホールバナー構造の光起電圧の空間分布を磁場の符号と入射光の円偏光状態を変えて詳細に調べた。その結果、スピ分裂した量子ホールカイラル端状態のマップ図を得た。さらに、奇数局所電子占有数 ν_L に対して大きな円偏光依存

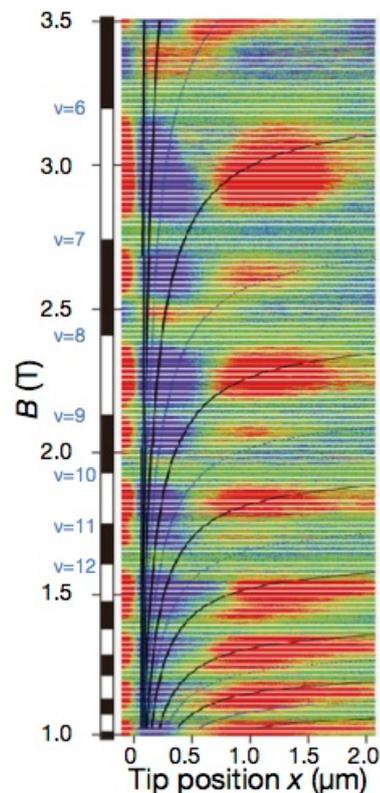


図5: 近接場走査型光学顕微鏡を用いて観測した光起電圧の空間微分のマップ図。スピ分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態が観測された。励起光エネルギーは1.5194 eV、温度は250 mK。

性を示すマップ図を得た。このマップ図は光生成電子のスピンの向きと整合し、スピン偏極した電子が注入されていることを明確に示した。私達の手法は、例えばスピンの向きに依存した方向にキャリアの流れる量子スピンホール端状態を検証するための新しい手法となると期待される。

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) 半導体二次元電子系の分数量子ホール領域における発光分光 (野村) [論文 7]

分数電荷をもつ準電子、準正孔、スピン反転した準電子等の励起が電子-正孔からなる励起子と束縛した「分数電荷準励起子」の可能性が理論的に示されていたが、その存在を示す実験は報告されていなかった。従来、分数量子ホール効果領域の分光学的研究は10 T以上の強磁場で行われてきたが、私達は、高移動度、極低電子密度の二次元電子系をゲート電圧によって誘起可能な高品質な非ドープ量子井戸試料を用い、6 T以下の比較的低い磁場において円偏分解して発光スペクトルを調べた。その結果、 $\nu=1/3$ 近傍の σ^- 円偏光発光において4-5本に分裂した微細構造を見いだした。その内の一つは準電子の存在する $\nu \geq 1/3$ においてのみ観測され、 $\nu < 1/3$ には見られなかった。また、この発光ピークは $T \geq 700$ mK の高温で消失した。この結果はスピン自由度を取り入れた Haldane 球上の厳密対角化計算結果との比較により、分数電荷準励起子からの発光であると理解された。

さらに、 $\nu=1/4$ 近傍において三重項準励起子からの発光が $T=25$ mK において消失し、 $T \geq 700$ mK の高温で回復することが見いだされた。Haldane 球上の厳密対角化計算によって、光遷移確率の電子密度依存性が計算され、 $\nu=1/4$ において有限サイズ効果により三重項準励起子状態の全ての角運動量空間での低いエネルギー状態の振動子強度が0になり、光遷移確率が消失することが示された。 $\nu=1/4$ は、4本の磁束量子を付着させた複合フェルミオンのフェルミ液体として理解されるが、有限系での計算では、ウィグナー結晶状態が形成されて低いエネルギー状態からの光遷移確率が消失する可能性が示された。実験で観測された $\nu=1/4$ 近傍における発光の消失は、試料中の不規則性により有限サイズ効果と同等の状態が実現されているためであると考えられる。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏、東北大学教授平山祥郎氏、NRC Canada, Pawel Hawrylak 氏のグループとの共同研究である。

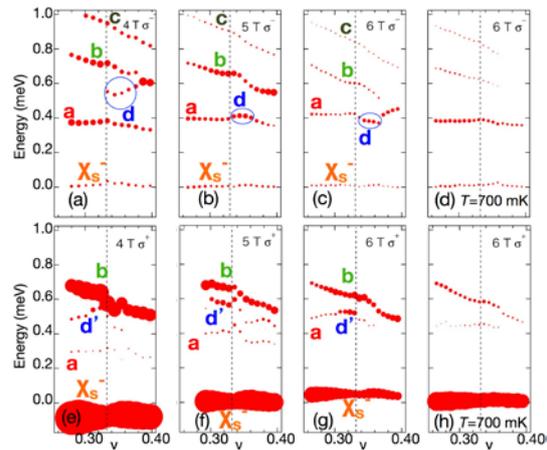


図 6: (a) 4 T, (b) 5 T, (c) 6 T, $T=25$ mK における σ^- 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (d) 6 T, $T=700$ mK における σ^- 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (e) 4 T, (f) 5 T, (g) 6 T, $T=25$ mK における σ^+ 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (h) 6 T, $T=700$ mK における σ^+ 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。円の面積は発光ピーク強度を表す。

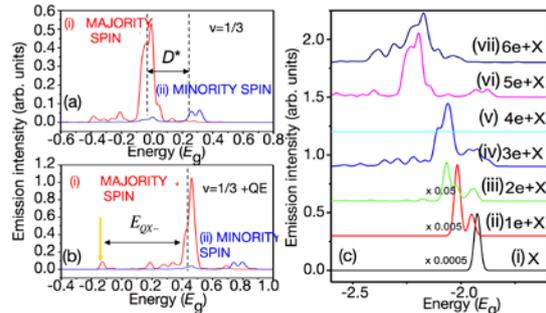


図 7: (a) 電子占有数 $\nu=1/3$ における (i) 多数スピン、(ii) 少数スピン電子の再結合発光スペクトルの計算結果。 (b) 電子占有数 $\nu=1/3$ に準電子 (QE) を一個加えた場合における (i) 多数スピン、(ii) 少数スピン電子の再結合発光スペクトルの計算結果。 (c) 磁場 B を磁束量子 $S^*=12$ に固定した場合の発光スペクトルの電子数依存性。 (i) 0 電子 (e) + 励起子 (X), (ii) $1e+X$, (iii) $2e+X$, (iv) $3e+X$, (v) $4e+X$, (vi) $5e+X$, (vii) $6e+X$, $4e+X$ の場合に発光が消失する。 $5e+X$ が $\nu=1/3$ に相当する。

(3) 半導体中スピン観測のためのナノ SQUID 走査型顕微鏡の開発 (柴田、野村)

少数電子スピンの直接的な観測のために、走査型 Nb 微小 SQUID 顕微鏡の開発を行った。微弱な磁束の局所的な検出を行うためには、SQUID のループサイズを微細化するとともにプローブ上に作成した SQUID と測定対象との間の距離の最小化が必要となる。そこで、シリコン基板の端に Nb 超伝導薄膜からなる 4 端子電極を作成したものを走査用のプローブとして用いた。SQUID プローブの先端には、収束イオンビームで作製した、弱結合マイクロブリッジ型 dc-SQUID を用いた。図に示すように、He 循環型無冷媒冷凍機中の 3 軸ステージ上に試料を設置し、水晶振動子を用いたシアフォース制御により SQUID プローブと試料表面との間の距離の制御を行う実験系を構築した。この実験系を用いて、GaAs 単一ヘテロ接合ホールバー構造試料表面での局所磁気走査観測を行った。試料表面付近での磁束分布の実空間での可視化が可能であることが示され、磁氣的空間分解能と SQUID-試料間距離との対応関係が明らかにされた。

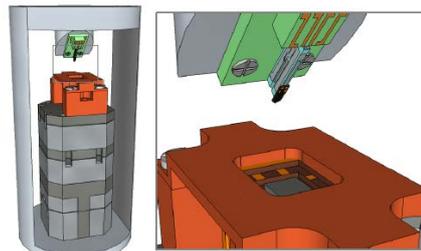


図8：(左) He 循環型無冷媒冷凍機中に設置した走査型 Nb 微小 SQUID 顕微鏡の概略図。(右) 微小 SQUID プローブとホールバー構造試料近傍の拡大図。

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。

(4) Si ナノレイヤー・ナノワイヤーの発光分光 (櫻井、野村) [論文 8, 11]

最近の Si ナノファブリケーションの著しい発展によって、良質の Si ナノレイヤーや Si ナノワイヤー試料が得られるようになった。これらの試料を用いて、低次元系における電子-正孔系の研究を行った。低温かつ強光励起密度下では、バルク半導体中において自由励起子ガス (FE) や電子正孔プラズマ (EHP) は電子正孔液相 (EHD) と呼ばれる液体相へ凝縮することが知られている。低次元系にキャリアを閉じ込めることで、相関エネルギーが増大し、EHD への転移を促す。一方、量子閉じ込めによって、バルク Si のバンドの縮退が解け、EHD への転移温度を抑制する可能性がある。このように、相反する二つの効果のため、閉じ込め効果が凝縮相への相転移を促進させるのか否かは明らかではなかった。そこで、本研究では Si ナノ構造、即ち Si ナノレイヤーと Si ナノワイヤーの発光分光により低次元系での電子正孔状態の研究を行った。発光スペクトルのフィットからキャリア密度、フェルミエネルギー、化学ポテンシャル、キャリア温度を得た。このキャリア密度とキャリア温度のプロットから、Si ナノレイヤーにおける EHD と EHP の相境界が初めて決定された。EHD と EHP の間の、観測された最大の転移温度は、膜厚が薄いほど高くなることが示され、膜厚 6.1 nm の試料では、バルクでの転移温度を越えることを初めて見いだした。以上の結果は、EHD 状態の安定性が閉じ込めにより増すことを分光学的に初めて示したものである。

Si ナノワイヤー試料からの発光スペクトルには、バルク励起子よりも長波長側にブロードなバンドが見られた。Si ナノワイヤー試料の顕微発光マッピングを行った結果、ナノワイヤーの軸方向に均一な発光スペクトルが得られ、ナノワイヤーが均一に作製されていることが示された。また、ワイヤー幅の減少とともに

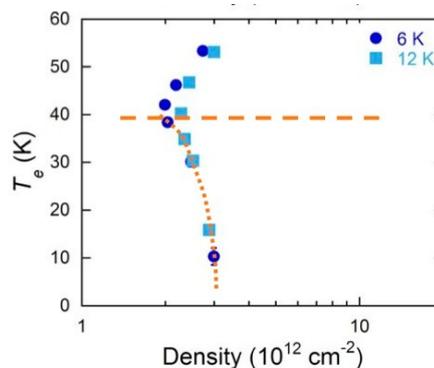


図9：膜厚 6.1 nm の Si ナノレイヤー試料におけるキャリア温度-キャリア密度。点線が今回決定された EHD と EHP の相境界。破線は観測された最大の転移温度 T_e を表す。

ブロードなバンドのピークエネルギーが高エネルギー側へシフトすることが観測された。これらはナノ構造を反映した発光が観測されたことを示している。さらに水素アニール温度の異なる複数のSi ナノワイヤー試料からの発光強度を調べた結果、アニール温度が 400°Cの試料において発光強度が最も大きいことが見いだされた。発光強度はおよそ界面の欠陥密度の逆数に比例すると考えられ、400°Cにおいて水素処理された試料が最も界面準位が少ないことを示している。この結果は電気測定から得られる界面準位密度の結果と整合した。以上により、光学的手法による評価は、Si ナノワイヤーのみならず、他の Si デバイスに対しても広く有用であることが示された。

本研究は山田啓作教授、大毛利健治准教授、名古屋大学教授白石賢二氏、東京工業大学教授岩井洋氏、准教授角嶋邦之氏との共同研究である。

【3】 半導体量子構造のスピン光物性

(1) ZnO中のGaに束縛された電子のスピン緩和 (富本慎一)

半導体中の中性ドナー原子 (D^0) に束縛された電子のスピンは、量子ドット中の電子と同程度の長いスピンコヒーレンス時間 (T_2^*) を持つ。また、ドナー束縛励起子 (D^0X) 状態と D^0 との間の遷移 ($D^0X \rightarrow D^0$ 間遷移) は均一な周波数を持つため、空間的に遠く離れた場所にある別個の電子のスピン状態間の量子もつれ (エンタングルメント) を、光子を介して生成出来ると期待されている。ウルツ鉱型結晶構造をもつZnOでは、結晶場とスピン軌道相互作用の影響で価電子帯が Γ 点においても3つに分裂しており、 D^0X の内部状態が比較的単純であるという特長がある。本研究では、ドナー原子としてGaを含むZnOで時間分解カー回転 (TRKR) 測定を行い、 D^0 の T_2^* を調べた。

図10に、温度 $T=1.8$ K、磁場 $B=0.5$ T (フォークト配置) で測定したTRKRの時間変化を示す。試料は、サファイアのa面基板上にMBE法で成長したZnOの薄膜 (厚さ $1.4 \mu\text{m}$) であり、 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の濃度でGaを含んでいる。ポンプ・プローブ光の波長 (370 nm) は $D^0X \rightarrow D^0$ 間遷移に共鳴している。負の遅延時間においても振動が観測されており、レーザーパルスの繰り返し間隔 (12.2 ns) と同じ程度の長いコヒーレンス時間を持つことが分かる。 T_2^* を正確に求めるために、共鳴スピン増幅 (RSA) 測定を行った (図11)。これは、遅延時間を -250 psに固定して、TRKRを磁場の関数として測定する実験である。実験結果 (点) の $B=0$ T近傍に現れているピークに理論式をフィッティング (実線) することで、 T_2^* は12 nsと求められた。ドナー原子に束縛されている電子のスピンは、その付近の結晶格子中のイオンがもつ核スピンと相互作用しており、それがスピン緩和の原因である。核スピンが電子に及ぼす影響を、有効磁場の大きさとして定量的に評価するために、TRKRの磁場依存性の測定をファラデー配置でも行った (図12)。実験結果は $B=0$ T付近にディップを示す。この幅から有効磁場の大きさは1.3 mTと求められた。

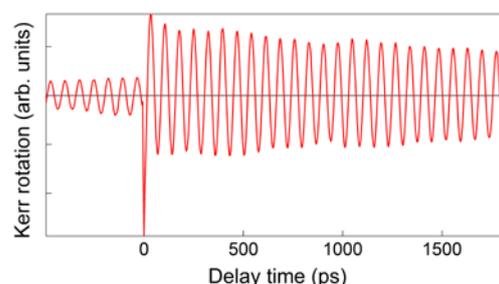


図10 : GaをドーピングしたZnO薄膜におけるTRKRの測定結果

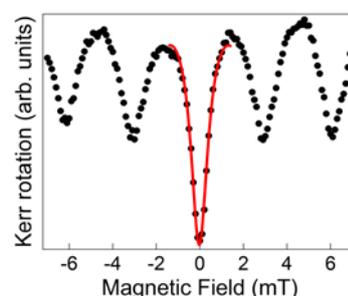


図11 : RSAの測定結果

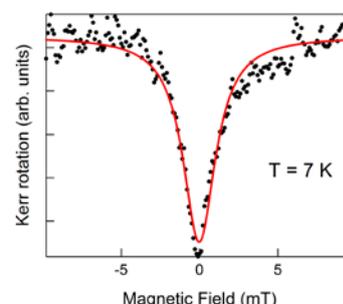


図12 : ファラデー配置での測定結果

<論文>

1. L. Zhang, M. Ikezawa, T. Mori, S. Umehara, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Single photon generation from an impurity center with well-defined emission energy in GaAs", Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CG11 (2013).
2. P. Jing, W. Ji, X. Yuan, M. Ikezawa, L. Zhang, H. Li, J. Zhao, Y. Masumoto: "Photoinduced Charge Separation and Recombination Processes in CdSe Quantum Dot and Graphene Oxide Composites with Methylene Blue as Linker", J. Phys. Chem. Lett. 4, 2919 (2013).
3. 舛本泰章: "量子ドットのスピンの緩和" 固体物理, Vol.48, No.10, 485 (2013).
4. J. Sun, D. Zhu, J. Zhao, M. Ikezawa, X. Wang, Y. Masumoto: "Ultrafast carrier dynamics in CuInS₂ quantum dots", Appl. Phys. Lett. 104, 023118 (2014).
5. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast Electron Transfer from PbSe Quantum Dots to TiO₂", AIP Conf. Proc. 1566, 520 (2013); 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (Zurich, 2012).
6. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, T. Mori, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Fourier Spectroscopy of Individual Nitrogen Impurity Centers in GaAs", AIP Conf. Proc. 1566, 544 (2013); 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (Zurich, 2012).
7. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak: "Photoluminescence fine structures in the fractional quantum Hall effect regime", Phys. Rev. B **89** (11), 115317 (2014).
8. Yoko Sakurai, Kuniyuki Kakushima, Kenji Ohmori, Keisaku Yamada, Hiroshi Iwai, Kenji Shiraishi, and Shintaro Nomura: "Photoluminescence Characterization in Silicon Nanowire Fabricated by Thermal Oxidation of Nano-scale Si Fin Structure", Optics Express **22** (2) 1997-2006 (2014).
9. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura: "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", AIP Conf. Proc. **1566**, 403 (2013).
10. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura: "Imaging of quantum Hall edge states under quasiresonant excitation by a near-field scanning optical microscope", AIP Conf. Proc. **1566**, 271 (2013).
11. Y. Sakurai, T. Tayagaki, K. Ohmori, K. Yamada, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, S. Nomura, "Fast luminescence decay of electron-hole quasi-two dimensional systems in Si nanolayer": AIP Conf. Proc. **1566**, 445 (2013).

<学位論文>

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻博士論文 (2014年3月)

1. 櫻井 蓉子: "Spectroscopic Study of Correlated Electron-Hole Systems in Silicon Nanostructures"
2. 孫 建輝: "Charge transfer from CuInS₂ quantum dots for solar cells"

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2014年3月)

1. 海野 晃: "Charge transfer and spin dephasing in colloidal quantum dots"
2. 薫田 康弘: 「光スイッチを用いた超高速輸送現象測定」
3. 間明田 周平: 「走査型近接場光学顕微鏡を用いたスピンした分裂量子ホール端状態の観測」

<国際会議>

1. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast electron transfer from PbSe quantum dots to TiO₂", 18th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Fuzhou, China, 2013.8).
2. Y. Masumoto: "Fast charge transfer from quantum dots for solar cells", 1st International Conference on Nano-Bio-Medicine Convergence (NBMC-2014) (PNU, Korea, 2014.2) 招待講演
3. H. Ito, S. Mamyouda, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Imaging of spin-resolved quantum Hall edge states by near-field scanning optical microscopy", The 20th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (Wroclow, 2013.7).
4. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge channels", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Atsugi, 2013.11).
5. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Near-field scanning optical microscope imaging of spin-resolved quantum Hall chiral edge states", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, (Kauai, 2013.12).
6. S. Mamyouda, T. Ohira, L. Yoshikawa, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Near-field scanning optical microscopy for investigation of quantum Hall chiral edge state", 2nd DYCE-ASIA Workshop, (Kashiwa, 2013.12).
7. Y. Sakurai, C. Tsukamoto, K. Kakushima, K. Ohmori, K. Yamada, H. Iwai, T. Tayagaki, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, and S. Nomura: "Optical properties of silicon nanostructures at high optical excitations", 2nd DYCE-ASIA Workshop, (Kashiwa, 2013.12).

<講演>

1. 野村晋太郎、「量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究」新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第11回 集中連携研究会「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」(2013年6月)
2. 佐久間大輔, 田野佑典, 石黒亮輔, 柏谷聡, 野村晋太郎, 高柳英明、「アルミニウムトンネル型単一微小ジョセフソン接合の特異な輸送特性研究」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
3. 櫻井蓉子, 大毛利健治, 山田啓作, 野村晋太郎、「Siナノレイヤー中電子正孔凝縮状態の膜厚依存性」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
4. 間明田周平, 柴田祐輔, 伊藤宙陸, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 大塚洋一, 野村晋太郎、「近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
5. 野村晋太郎、「間接型励起子とdarkな励起子」平成25年度東北大プロジェクト研究会2013年11月)
6. 野村晋太郎、「スピン分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態の光学的検出」、新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第4回 領域研究会 (2013年12月)

7. 永合祐輔、土屋翔吾、篠崎智也、石黒亮輔、柏谷裕美、柏谷聡、野村晋太郎、高柳英明、前野悦輝、「 Sr_2RuO_4 中の半整数量子渦検出に向けたマイクロ SQUIDの開発」、新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第4回 領域研究会 (2013年12月)
8. 海野晃、舛本泰章：「CdS 量子ドットの電荷移動とスピンドィフェージング」 日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
9. J. Sun (孫建輝)、J. Zhao、舛本泰章：「Ultrafast carrier dynamics in CuInS_2 quantum dots」 日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
10. 池沢道男、張遼、佐久間芳樹、迫田和彰、舛本泰章：「単一発光中心の共鳴励起による単一光子発生」 第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
11. 塚本知九馬、野村晋太郎、「 MoS_2 薄膜における第二次高調波発生強度の層数依存性」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
12. 柴田祐輔、柏谷裕美、石黒亮輔、柏谷聡、高柳英明、野村晋太郎、「局所磁気観察のための走査型Nb微小SQUID顕微鏡の開発」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
13. 土屋翔吾、篠崎智也、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「 Sr_2RuO_4 に流れるカイラルエッジ電流検出に向けたMicro-SQUIDの開発」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
14. 塚本知九馬、櫻井蓉子、大毛利健治、山田啓作、角嶋邦之、岩井洋、白石賢二、野村晋太郎、「リソグラフィで作製したシリコンナノワイヤーアレーの光学特性」日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
15. 間明田周平、柴田祐輔、伊藤宙陸、大平智也、吉川ルノ、柏谷聡、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、大塚洋一、野村晋太郎、「近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測 II」日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)

I X-3 強相関物性グループ

教授		守友 浩
助教		上岡隼人
助教		小林 航 (H22. 9-)
研究員		柴田恭幸
大学院生	D3	五十嵐一泰
	D3	栗原佑太郎
	D1	米澤宏平
	M2	若梅一真
	M2	高地雅光
	M2	棚辺大輝
	M2	下野貴弘
	M2	高木健太郎 (休学)
	M1	高橋洋輔
	M1	赤羽隆弘
	M1	濱口 純
	M1	平野泰樹(休学)
	M1	後藤謙典
卒業研究生	B4	浦瀬翔太
		中澤香織
研究補助員		田中香織 (H25. 5-H25. 9)
		根来千絵 (H25. 5-H25. 9)

【1】 6T/C₆₀の顕著な電荷移動状態を観測[1] (高橋、米澤、上岡、NIMS, 守友) 図1

有機系太陽電池 6T/C₆₀のヘテロ素子とバルクヘテロ素子を作成し、超高速分光で電荷生成ダイナミクスを調べた。どちらの素子でも顕著な誘導吸収が観測された。この吸収多意は励起子でも電荷でもない、電荷移動状態に帰属した。

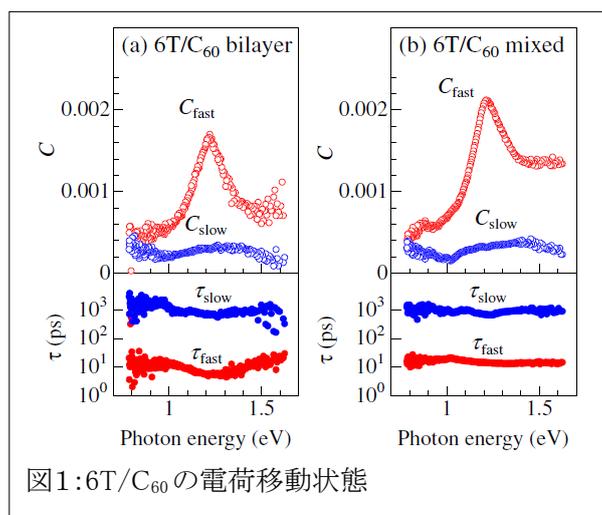
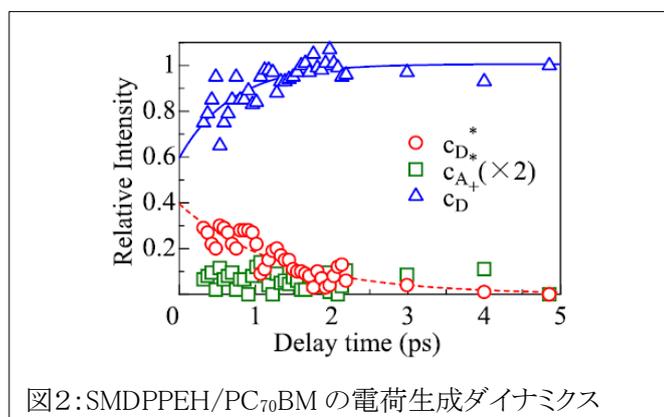


図1: 6T/C₆₀の電荷移動状態

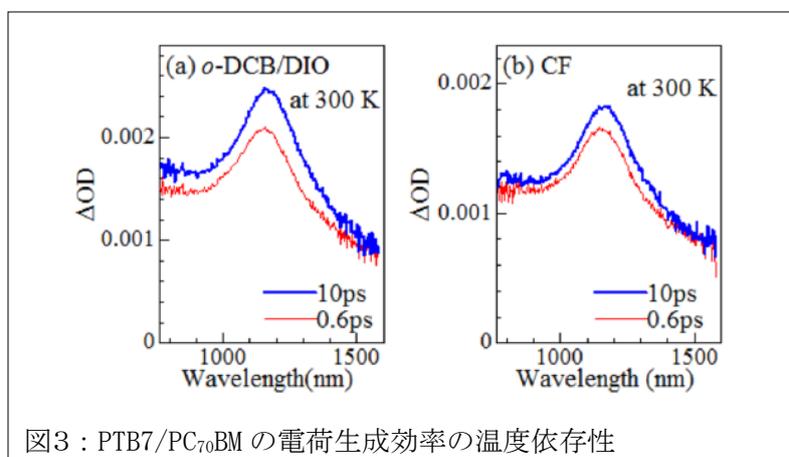
【2】 低分子有機系太陽電池 SMDPPEH/PC₇₀BMの電荷生成ダイナミクス [2] (赤羽、米澤、上岡、NIMS、守友) 図2

超高速分光で、低分子有機系太陽電池 SMDPPEH/PC₇₀BM の電荷生成ダイナミクスを調べた。ドナー励起子からドナーポーラロンへの変換プロセスを観測した。変換時間は、1ps 程度である。



【3】 低バンドギャップ有機系太陽電池 PTB7/PC₇₀BM の電荷生成ダイナミクス [3, 4] (米澤、上岡、NIMS、守友) 図3

超高速分光で、低バンドギャップ有機系太陽電池 PTB7/PC₇₀BM の電荷生成ダイナミクスを調べた。400nm 励起では、アクセプター励起子からドナーポーラロンへの変換プロセスを観測した。660nm 励起では、ドナー励起子からドナーポーラロンへの変換プロセスを観測した。さらに、電荷生成効率の温度依存性を調べたところ、80K での電荷生成効率と 300K での電荷生成効率はほぼ同じであることが分かった。



【4】 Na_xCoO₂ のナトリウムイオン拡散係数 [5] (柴田、小林、守友) 図4

ナトリウムイオン電池正極活物質である Na_xCoO₂ 薄膜をレーザーアブレーション法で作成した。電気化学インピーダンス法で、ナトリウムイオン拡散係数と電荷移動抵抗をナトリウムイオン濃度の関数として決定した。Na_xCoO₂ のナトリウムイオン拡散係数は、Li_xCoO₂ のリチウムイオン拡散係数と同程度であった。民間企業もこうした基礎データに高い関心を示している。

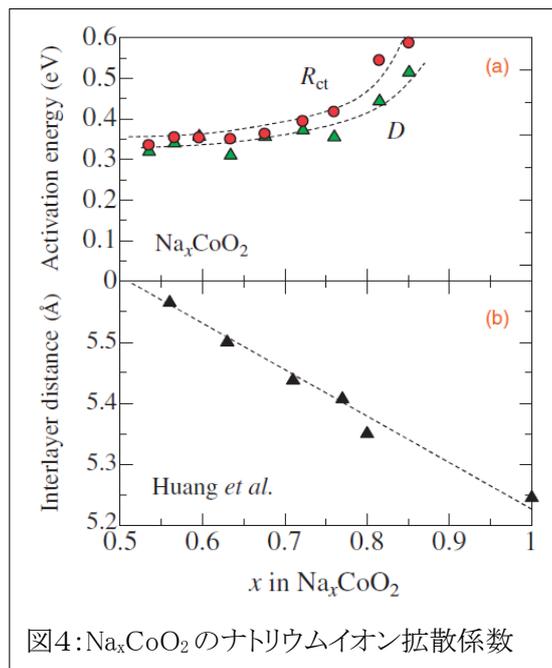


図4: Na_xCoO₂ のナトリウムイオン拡散係数

【5】 プルシャンプルー類似体の放電曲線と格子定数[6-7] (高地、栗原、松田、守友) 図5

プルシャンプルー類似体は、リチウムイオン電池の正極活物質として有望である。プルシャンプルー類似体のホストの構造物性と電子状態をリチウムイオン濃度の関数として詳細に調べた。

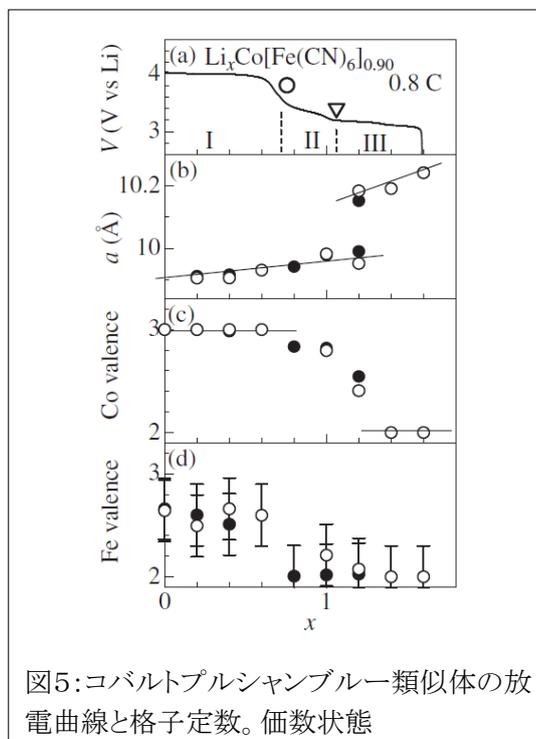


図5: コバルトプルシャンプルー類似体の放電曲線と格子定数。価数状態

【6】 マンガンプルシャンプルー類似体のリチウムイオンダイナミクスの研究 [9] (若

梅、上岡、守友) 図6

マンガンプルシャンブルー類似体のリチウムイオンダイナミクスを調べた。その場合価数差分分光により、領域 I と領域 II ではマンガンサイトは還元されていることが明らかとなった。領域 I/II での電位は、還元される Mn^{3+} サイトにおけるヤンテラー歪のなし/ありを反映していると解釈した。

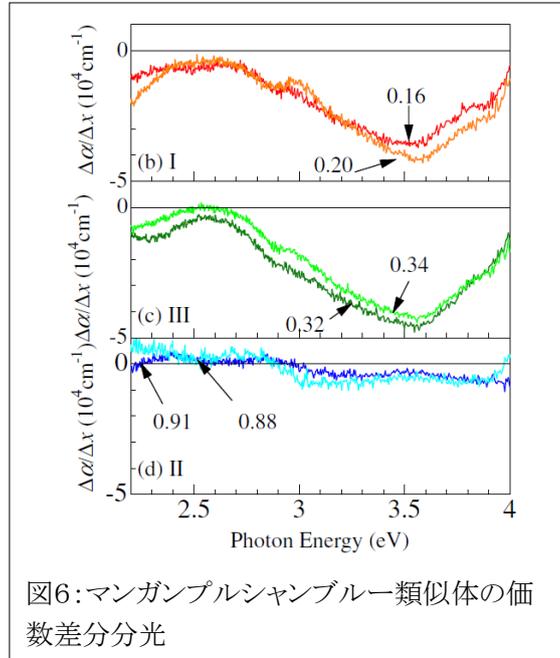


図6:マンガンプルシャンブルー類似体の価数差分分光

【7】 プルシャンブルー類似体の放電曲線と格子定数[10] (高地、松田、守友) 図7

プルシャンブルー類似体は、ナトリウムイオン電池の正極活物質として有望である。プルシャンブルー類似体のホストの構造物性と電子状態をナトリウムイオン濃度の関数として詳細に調べた。

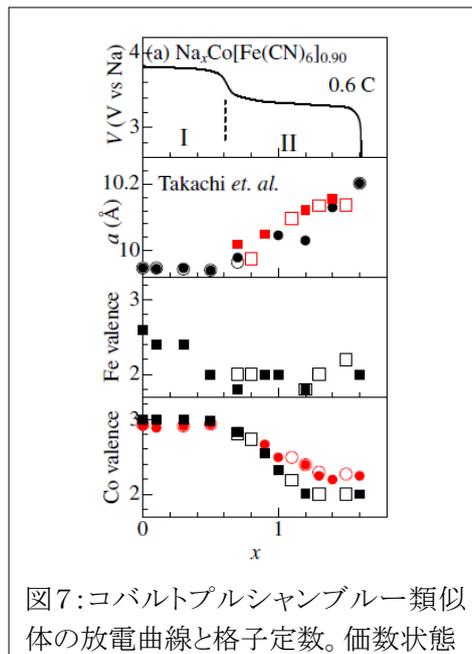
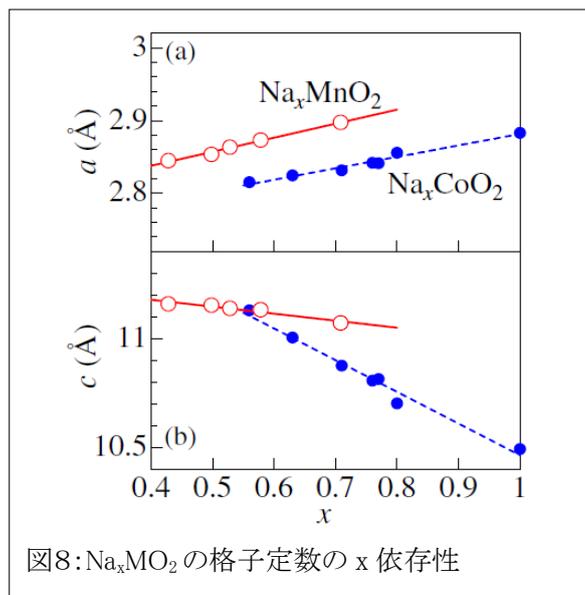


図7:コバルトプルシャンブルー類似体の放電曲線と格子定数。価数状態

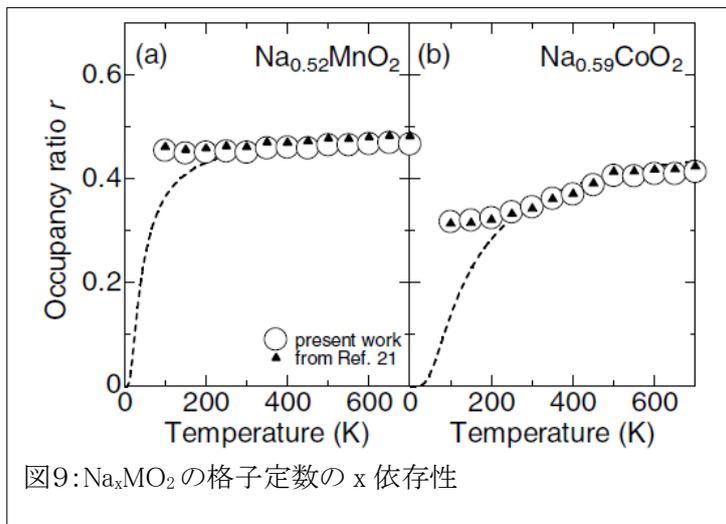
【8】 ナトリウムイオン電池正極活物質 Na_xMO_2 の構造・電子状態の x 依存性 [11-12] (下野、棚辺、守友、PF) 図8

ナトリウムイオン電池正極活物質 Na_xMO_2 の構造・電子状態の x 依存性を詳細に調べた。Mn 化合物の c 軸長の x 係数は、Co 化合物のものに比べ著しく小さいことがわかった。これは、Mn 化合物において、 Na^+ の電荷が遮蔽されているためと解釈した。この解釈は、他のグループの第一原理計算によっても支持される。また、X 線吸収分光により、Mn が高スピン状態、Co が低スピン状態をとることが分った。さらに、遷移金属に配位している酸素にホールが存在していることが示唆された。



【9】 ナトリウムイオン電池正極活物質 Na_xMO_2 の構造物性 [13-14] (棚辺、下野、守友、PF) 図9

ナトリウムイオン電池正極活物質 Na_xMO_2 の構造物性の温度依存性を詳細に調べた。Mn 化合物のナトリウムサイトエネルギーの差 (56K) が Co 化合物のもの (190K) に比べ小さいことがわかった。この差も Na^+ の電荷が遮蔽されているためと解釈できる。



【10】強相関酸化物 $\text{LaCo}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_3$ の構造物性[15] (小林、名大、明大、CROSS-tokai、KEK、JAEA、茨大、Aalto Univ.) 図10

LaCoO_3 は 100 K で低スピン状態へのスピン状態遷移を示す。Co サイトを一部イオン半径の大きな Rh で置換し、その結晶構造の温度依存性を放射光を用いて精密に調べた。Rh を置換した試料では無置換試料に比べて 70 K 以下で体積の減少が抑えられた。この結果は Co のスピン状態が高スピンと低スピンの混合状態になっていることを示唆している。

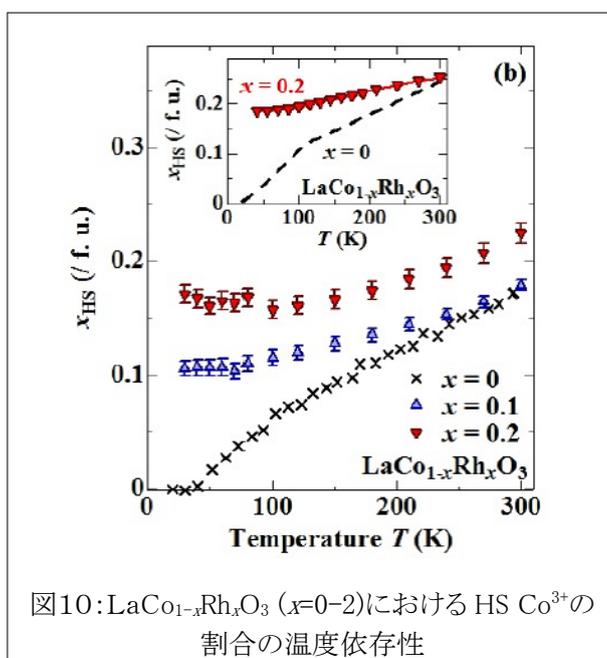


図10: $\text{LaCo}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_3$ ($x=0-2$)における HS Co^{3+} の割合の温度依存性

【11】プレ戦略イニシャティブに関する活動

プレ戦略イニシャティブ「グリーンイノベーションのためのキーマテリアル高度デザイン研究拠点 (代表: 中村潤児)」(平成23年度-25年度)のメンバーとして、拠点形成に向けた活動を行った。

【12】KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成24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. Y. Takahashi, K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Prominant charge-transfer state at alpha-sexithiophene/C60 interface", J. Phys. Soc. Jpn. 82, 063709 (2013).
2. T. Akaba, Y. Takahashi, K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Carrier formation dynamics of small-molecular organic photovoltaic", Appl. Phys. Lett. 102, 133901 (2013)

3. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Robust carrier formation process in low-band gap organic photovoltaic", *Appl. Phys. Lett.* 103, 173901 (2013).
4. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Exciton-to-carrier conversion processes in a low-band-gap organic photovoltaic", *Jan. J. Appl. Phys.* 52, 162405 (2013).
5. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Sodium ion diffusion in layered Na_xCoO_2 ", *Appl. Phys. Express* 6, 097101 (2013).
6. M. Takachi, T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Structure, electronic, and electrochemical properties of $\text{Li}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ", *Jan. J. Appl. Phys.* 52, 044301 (2013).
7. Y. Moritomo and M. Takachi, Y. Kurihara, T. Matsuda, "Synchrotron-radiation x-ray investigation of Li^+/Na^+ intercalation into Prussian Blue Analogues", *Advance in Materials Science and Engineering*, 2013, 967285 (2013).
8. Y. Kurihara, T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Structural Properties of Manganese Hexacyanoferrates against Li Concentration", *Japanese Journal of Applied Physics* 52, 017301(2013).
9. Y. Moritomo, K. Wakaume, M. Takachi, X. Zhu, and H. Kamioka, " Li^+ intercalation of manganese ferrocyanide as investigated by in situ valence-differential absorption spectroscopy", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 094710 (2013).
10. M. Takachi, T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Redox reaction in Prussian Blue Analogue films with fast Na^+ intercalation", *Jan. J. Appl. Phys.* 52, 090202 (2013).
11. T. Shimono, D. Tanabe, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Structural Response of P2-type Na_xMnO_2 against Na^+ intercalation", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 083601 (2013).
12. T. Shimono, D. Tanabe, W. Kobayashi, H. Nitani, and Y. Moritomo, "Electronic state of P2-type Na_xMnO_2 (M = Mn and Co) as investigated by in situ x-ray absorption spectroscopy", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 124717 (2013).
13. D. Tanabe, T. Shimono, W. Kobayashi, H. Nitani, and Y. Moritomo, "Na-site energy of P2-type Na_xMO_2 (M = Mn and Co)", *Phys. Status Solidi ERL* 7, 1097-1101 (2013).
14. D. Tanabe, T. Shimono, W. Kobayashi, H. Nitani, and Y. Moritomo, "Temperature dependence of anisotropic displacement parameters in O3-type NaMO_2 (M = Cr and Fe): comparison with isotropic LiCoO_2 ", *Phys. Status Solidi ERL* 8, 287-290 (2014).
15. S. Asai, R. Okazaki, I. Terasaki, Y. Yasui, W. Kobayashi, A. Nakao, K. Kobayashi, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami, N. Igawa, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, O. Parkkima, M. Karppinen, and H. Yamauchi, "Spin state of Co^{3+} in $\text{LaCo}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_3$ investigated by structural phenomena", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 114606 (2013).

<著書>

1. 守友 浩, 上岡隼人, 柴田恭幸, 野澤俊介, 佐藤篤志, 足立伸一、「光で作られる隠れた準安定相」、*固体物理* 48. 269-275 (2013)

<学位論文>

1. 修士論文 棚辺大輝、「層状遷移金属酸化物 Na_xMO_2 の構造物性」
2. 修士論文 若梅一真、「プルシャンブルー類似体におけるイオンダイナミクスの分光学的研究」
3. 修士論文 高地雅光、「コバルトプルシャンブルー類似体への Li,Na インターカレーションと物性評価」
4. 修士論文 下野貴弘、「層状酸化物のエレクトロケミカルドーピングに伴う物性変化」

<講演>

口頭発表(主要なもの)

1. Y. Moritomo, "carrier formation dynamics of organic photovoltaics", EMN2014 @Lasvegas, 2014/2/27-3/2 (invited)
2. 守友 浩(招待講演)「二次電池正極材料としてのプルシャンブルー類似体」、東北大リーディング研究会@仙台 2014/2/21-23
3. Y. Moritomo (Plenary), " Prussian blue analogues as promising cathode candidates for Na^+ secondary battery", TJSST2013, Tunisia, 2013/11/15-19
4. 守友 浩「時間分解分光による有機薄膜太陽電池の電荷生成の機構解明へ」筑波大一大理科大研究会、筑波、2013/10/19
5. Y. Moritomo, "Prussian blue analogues as promising cathode candidates for Na^+ secondary battery", 電池討論会@大阪、2013/10/7-9
6. Y, Moritomo, "Prussian blue analogues as promising cathode candidates for Li^+ and Na^+ secondary battery", ISIS17@仙台、2013/5/14
7. W. Kobayashi (invited), "Thermal rectification and thermal Hall effect-experimental demonstration of heat control-", 1st International Conference on Photonics and Thermal Energy Science, 2013/9/2, Shanghai, Dongji University
8. W. Kobayashi, "Layered Oxide Na_xMO_2 ($M=\text{Co}$, and Mn) as Cathode Material of Na^+ Secondary Battery", 2014 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, 2014/1/6, Hsinchu, Taiwan
9. 下野貴弘, 赤羽隆弘, 棚辺大輝, 小林航, 守友浩「 $\text{Na}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_2$ のナトリウム濃度と結晶構造」日本物理学会 2013 年年次大会@神奈川、2014/3/27-30
10. 赤羽隆弘, 棚辺大輝, 下野貴弘, 小林航, 守友浩「 $\text{Na}_{0.7}\text{Mn}_{0.5}\text{M}_{0.5}\text{O}_2$ ($M=\text{Co}, \text{Fe}$) の構造解析」日本物理学会 2013 年年次大会@神奈川、2014/3/27-30
11. 上岡隼人, 守友浩「 Ti_4O_7 における光誘起相転移とその領域拡大過程の観測」日本物理学会 2013 年年次大会@神奈川、2014/3/27-30
12. 下野貴弘, 棚辺大輝, 小林航, 守友浩「 Na_xMO_2 ($M=\text{Co}, \text{Mn}$) のナトリウム濃度と電子状態」日本物理学会 2013 年秋季大会@徳島、2013/9/25-28
13. 棚辺大輝, 下野貴弘, 小林航, 守友浩「 NaMO_2 ($M=\text{Cr}, \text{Fe}$) の構造解析」日本物理学会 2013 年秋季大会@徳島、2013/9/25-28
14. 守友浩(招待)「(シンポジウム講演)プルシャンブルー類似体の負の熱膨張効果」日本物理学会 2013 年秋季大会@徳島、2013/9/25-28

15. 柴田恭幸、小林航、守友 浩「 Na_xCoO_2 におけるナトリウムイオン拡散係数」応用物理学会秋季大会@京田辺市、2013/9/16-20
16. 守友 浩、高橋洋輔、米澤宏平、上岡隼人、安田剛、韓礼元「6T-C60における顕著な電荷移動状態」応用物理学会秋季大会@京田辺市、2013/9/16-20
17. 米澤宏平、上岡隼人、安田剛、韓礼元、守友 浩「低バンドギャップ有機薄膜太陽電池の励起子解離エネルギー」応用物理学会秋季大会@京田辺市、2013/9/16-20
18. 米澤宏平、上岡隼人、安田剛、韓礼元、守友 浩「SMDPEEH/PC₇₀BM の電荷生成プロセスにおける温度依存性」応用物理学会春季大会@青山、2014/3/17-20
19. 柴田恭幸、小林航、守友 浩「 Na_xMnO_2 におけるナトリウムイオン拡散係数」応用物理学会春季大会@青山、2014/3/17-20
20. 高地雅光、松田智行、守友 浩「コバルトプルシアンブルー薄膜の電気化学特性」電池討論会@大阪、2013/10/7-9
21. 小林 航、下野貴弘、棚辺大輝、守友 浩「P2 型 Na_xMO_2 (M=Co, Mn)の Na^+ インターカレーションと構造変化」電池討論会@大阪、2013/10/7-9
22. 柴田恭幸、小林 航、守友 浩「 Na_xCoO_2 薄膜のレート特性とナトリウムイオン拡散係数」電池討論会@大阪、2013/10/7-9

ポスター発表

1. W. Kobayashi, T. Shibata, Y. Moritomo, "Intrinsic rapid Na^+ intercalation observed in Na_xCoO_2 thin film", 17th international symposium on intercalation compounds, 2013/5/12, Sendai
2. K. Yonezawa "Carrier Generation Efficiency in Organic Photovoltaic", 2014 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, 2014/1/6, Hsinchu, Taiwan

<特許>

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	森下将史
大学院生	友利ひかり (数理物質科学研究科博士課程3年)、 稲垣匠哉、大賀和人、仁平慎太郎、廣瀬桃子 (同修士課程2年) 青木 仁、伊藤 優、片倉健太 (同修士課程1年)
卒業研究	池田尚樹、加藤大貴、田中宏和、平出璃音可 (物理学類4年)

低温物性実験グループでは、主に1K以下の極低温領域を舞台として、グラフェンや単分子架橋系などのナノ-あるいはメゾ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。

【1】グラフェンの電気伝導 (友利、貫井、仁平、片倉、神田)

(1) グラフェンの歪み効果 (友利、神田)

グラフェンには格子歪みによって擬似ゲージ場 (ベクトル/スカラーポテンシャル) が生じるという特別な性質がある。これをうまく使うとグラフェンに大きな伝導ギャップを誘起できるという理論予測があり、歪み効果はグラフェンの電子デバイス応用のためのブレークスルーになる可能性を持っている。この歪み効果を実験的に検証するのが本研究の目的である。今年度は以下の成果を得た。

- 我々独自の方法である、グラフェンと基板の間にレジストでできた任意形状のナノ構造を挿入するという方法を用いて、グラフェンに1次元局所歪みを導入し、電気伝導を測定した。歪み分布は顕微ラマン分光によって確認した。電気伝導率のバックゲート電圧依存性 (σ - V_g 特性) では、電気伝導率が最小になる点 (電荷中性点) よりも高ゲート電圧側で傾きが大幅に小さくなる非対称のV字型カーブが観測されることを見いだしたが、伝導ギャップは観測されなかった。電子とホール電界効果移動度の比 μ_{FE}^e/μ_{FE}^h は0~0.5 (14試料、平均0.22、標準偏差0.14) となった。これは、歪みのないグラフェンでは、 σ - V_g 特性が電荷中性点に対してほぼ対称のV字型のカーブを示し、電子とホール電界効果移動度の比 μ_{FE}^e/μ_{FE}^h が0.6~1.0 (7試料、平均0.78、標準偏差0.09) の値を示すのとは対照的である。この原因を解明するための対照実験や数値計算を行い、非対称な電気伝導は局所歪みによって誘起されたスカラーポテンシャルに起因している可能性が高いことを明らかにした。理論で予測されている伝導ギャップが見られないのは、電子の平均自由行程内での歪みの空間変化量が小さいためであると考えられる。
- 電子の平均自由行程が短くなる原因として、レジストナノ構造を形成する際のグラフェンへの電子線照射があげられる。実際、顕微ラマン分光によって、電子線照射領域から約1ミクロン離れたところまで欠陥が生成することがわかった。そこで、レジストナノ構造作製時の電子線照射がグラフェンの電気伝導に影響を与えないような歪み導入法を2種類考案し、実際にグラフェン試料を作製して、電気伝導特性を評価した。その結果、依然として、電子の平均自由行程内での歪みの空間変化量が小さいことが示唆された。

(2) グラフェンの電気伝導特性における電子線照射の影響 (友利、平出、田中、神田)

電子線照射がグラフェンの電気伝導に与える影響を、ラマン分光、電気伝導測定によって評価した。実験では、同一のグラフェン試料に対して電子線照射を断続的に行い、各電子線照射の直後に

ラマン分光と電気伝導測定を行った。その結果、電子線照射の総量の増加に伴い、ラマンDバンドとGバンドの強度比 I_D/I_G が大きくなること、その一方で平均自由行程 l_{mp} が短くなることがわかった。これらの結果から、 I_D/I_G と l_{mp} の関係式を得た。この関係式を用いると、ラマンスペクトルから平均自由行程や移動度を評価することが可能となる。また、電子線照射によって欠陥を導入したグラフェンに対してラマンマッピングを繰り返すと、 I_D/I_G 比が著しく減少することを見いだした。 I_D/I_G 比は、単にグラフェンを室温で保存しておいたり、アニールしたりすることによっても減少する。これは、ラマンDバンドがグラフェン中の荷電不純物に起因していることを示唆するが、詳細の原因は検討中である。

(3) グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響 (片倉、伊藤、神田)

グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響を低減し、短チャネル2端子デバイスにおいてもグラフェン本来の高移動度を実現することを目標として、昨年度に引き続き以下の研究を行った。

- Cr/Au, CrO/Cr/Au の電極を接続したグラフェン電界効果素子の電気伝導のチャネル長依存性を調べた。その結果、抵抗のゲート電圧依存性に2つのピーク(ディラック点)が出現することを見出した。この結果は、以前実施したTi/Alの電極の場合とは明らかに異なる。チャネル長依存性から、①高ゲート電圧側のピークは電極の影響を受けていないグラフェン領域、②低ゲート電圧側のピークは電極近傍にあるグラフェン領域に由来することが明らかとなった。また、1次元抵抗モデルにもとづく数値シミュレーションによって、電極直下のグラフェンは電極からの電荷ドーピングを受けているがキャリア密度は完全にはピン止めされていないことがわかった。
- 昨年度開発した、多層グラフェンをSi基板上に直接成長する方法を利用して、多層グラフェンを金属電極とグラフェンとの界面に挟みこんだ構造を作製し、電極からのキャリアドーピングを軽減することを試みた。電子線リソグラフィーで定義した横幅10ミクロン程度の領域にアモルファスカーボン(a-C)/Ni/Auを堆積し高温アニールした結果、大面積膜では見られなかったNi/Au膜の微粒子化が起り、一様な多層グラフェン膜は形成されなかった。そこで、予備実験として、a-Cを界面に挟み込んだ構造について測定を行った。測定では、単一のグラフェン上に、(a)4端子素子、(b)界面にa-Cを挟んでいない短チャネル2端子素子、(c)界面にa-Cを挟んだ2端子素子の3つの試料を作製し、電気伝導率のゲート電圧依存を比較した。電極にはCr/Auを用いた。その結果、試料cでは低ゲート電圧側のディラック点が消滅し、電極からの電荷ドーピングが除去されていることが確認されたが、a-Cの存在による荷電不純物散乱増大の傾向が見られ、移動度の改善は不十分であることがわかった。今後は、グラフェン上に多層グラフェンを直接成長する手法を開発し、電極接続の影響の更なる軽減を目指したい。

【2】金属ナノコンタクトにおける熱現象(青木、池田、大塚)

機械破断接合MBJを用いたナノコンタクトの研究を行ってきた。数年前に超伝導ナノコンタクトの電流電圧特性に特有な構造を見出し、これがコンタクト部分の電子温度上昇に伴う超伝導の消失によるものであることを明らかにした。電流が集中するコンタクト部ではジュール熱による過熱が容易に進行する。このナノコンタクトの過熱現象はこれまで接合の不安定化やテレグラフ雑音の増大を通して議論されてきたが、これらはいずれも格子温度の増加を通して起きるものであり、電子温度の上昇を直接検知するものではなかった。ナノコンタクトでの発熱や熱輸送にはまだ不明なことが多く、これを調べるために独立の温度センサーを接合近傍に配置した超伝導MBJの実験を計画しその準備を行った。AuGe合金を用いた約0.2 μ m四方の抵抗温度計をリフトオフで作製している。

【 3 】 鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ のポイントコンタクトスペクトロスコピー (稲垣、大塚)

多バンド超伝導体である鉄系超伝導体は複数のオーダーパラメータを持つとともに、電子ポケットと正孔ポケットのオーダーパラメータの符号は互いに異なるとされる。われわれはこれまでに鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ に対してポイントコンタクトスペクトロスコピーの測定を行ってきた。常伝導探針を用いた SN 接合では少なくとも3つの超伝導ギャップがあることを明らかにしたが、超伝導探針による S-S 接合では超伝導電流も多重アンドレーエフ反射構造も観測することができなかった。Stanev と Koshelev による従来型 S 波超伝導体と多ギャップ超伝導体の間の近接効果の理論によれば、従来型超伝導体の局所状態密度は多ギャップ超伝導体のギャップによる影響を受けるとともに、オーダーパラメータの相対的符号によって状態密度は増加あるいは減少する。この異常近接効果を確認するべく試料構造を検討し、鉄系結晶-Al-AlO_x-Au の試料の作製を試みたが、良質な接合界面やトンネル接合がまだ実現できず結果を得るには至らなかった。なお、本研究で用いた $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ は小野田研究室で作製された結晶試料であり、小野田雅重准教授に感謝する。

【 4 】 トンネル接合型マイクロ SQUID (大賀、廣瀬、大塚)

(1) SQUID をセンサーとしたプローブ顕微鏡の開発 (大賀)

マイクロ SQUID をプローブとした走査型磁気顕微鏡を実現するために、希釈冷凍温度域で動作する x-y 平面移動ステージの開発を行った。よく使われているピエゾ素子ではなく、ヘリウムガスの圧力によるベローズの変形を駆動力に利用するという独自の方法を試み、さらに位置検出のための 0.2mm ピッチの電気容量型変位センサーを開発した。既存の希釈冷凍機に取り付けを行い、その動作を室温で確認し、約 7 μm の位置精度を得た。さらに Nb マイクロ SQUID による低温試験を行い、SQUID の動作を確認した。ただし、加圧用ヘリウムラインのリークとブロックのためステージ動作の低温での確認には至らなかった。

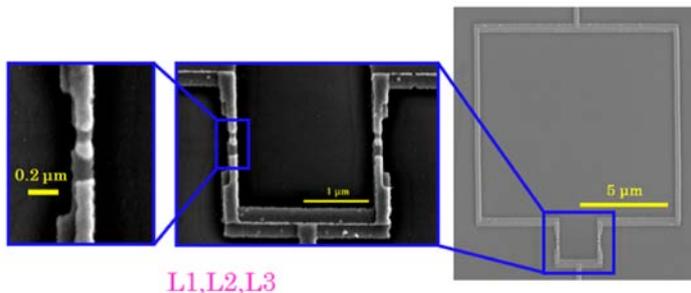
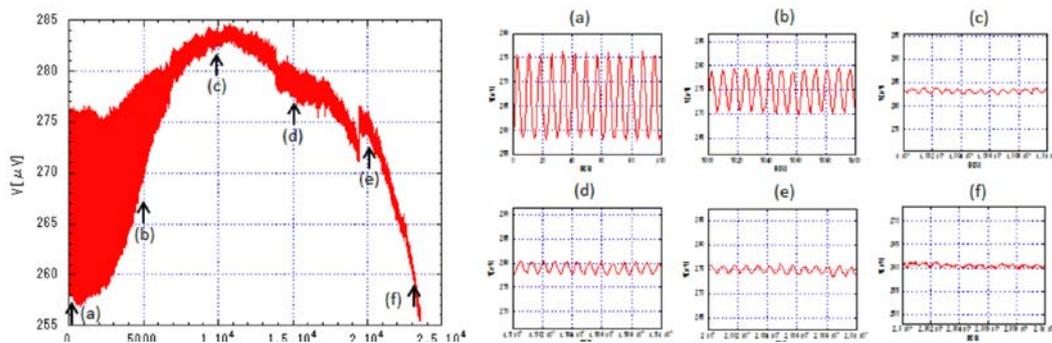


図1 (左): Nb-マイクロ SQUID の電子顕微鏡写真

図2 (左下): 平行磁場下における Nb-マイクロ SQUID の磁気応答。SQUID に特有な周期的な電圧振動は 2 T 以上の磁場でも観測できる。



(2) Nb を用いたトンネル接合型マイクロ SQUID の開発 (廣瀬)

トンネル接合型マイクロ SQUID をより広い温度および磁場領域で使用可能なものにするために、アルミニウムではなくニオブウム製の SQUID 素子の開発を行った。ニオブは高融点の活性金属であるとともに、アルミニウムとは異なりその酸化膜はトンネル障壁として良好な特性を有しない。このため作製プロセスを一から見直し、作製条件を探った。まず良質な Nb 細線をリフトオフで作るために、蒸着方法に超高真空中での電子線加熱蒸着を、微細加工には PES-Ge-PMMA の三層レジスト法を採用した。これによって、約 $0.2 \mu\text{m}$ の細線が 4.6 K で超伝導になるのを確認した。トンネル接合は、二度の Nb 蒸着の間に、ロードロック室でアルミナをスパッタ蒸着することで作製した。この工程ではニオブ酸化膜が形成されこれがバリアとして働く場合があることが分かり、条件を探った。

図 1 に作製した SQUID 素子の電子顕微鏡写真を示す。斜め蒸着による約 $0.1 \mu\text{m}$ 四方の接合がほぼ設計通りにできている。極低温での電流-電圧特性は、Al-微小トンネル接合型マイクロ SQUID と同様に、ゼロバイアス付近でも電圧状態となり有限抵抗を持ち、その抵抗が試料面に垂直に印加した磁場に対して周期的に振動する SQUID 動作をしめす。SQUID ループに垂直、平行に印加した磁場に対して、この振動はそれぞれ 1800 G 、 23000 G まで継続することを確認した (図 2)。さらに温度については約 4 K まで動作することが確認できた。これより、Nb-微小トンネル接合型マイクロ SQUID は、従来の Al-微小トンネル接合型マイクロ SQUID と比較して、動作可能な磁場領域を 1 T から 2.5 T 以上に、温度領域を約 1 K から約 4 K まで広げることに成功した。

【 5 】 石英チューニングフォークを用いた液体ヘリウムの粘性測定 (加藤、大塚)

電子時計の基準発振器に使用される石英チューニングフォークは高い Q 値を持つ安定した圧電振動子であり、走査型プローブ顕微鏡などの物理計測にも多用されている。卒業研究のテーマとして石英チューニングフォークの特性を調べ、液体ヘリウム中での共振曲線から超流動転移に伴う密度と粘性の変化を確認した。

【 6 】 グラファイト上ヘリウム薄膜における 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ヘリウム薄膜は、よく定義された層構造をもち、それぞれの層は理想的な 2次元系を与える。核スピン $1/2$ をもつ Fermi 粒子系であるヘリウム 3 (^3He) 薄膜の固相は 2次元量子スピン系を与え、複数の原子が循環的に位置を交換して生ずるリング交換相互作用の競合が磁性を支配する。gapless spin liquid が強く示唆される相を始め、面密度により多彩な磁性が現れるが、これはリング交換相互作用の競合に、吸着構造が強く影響を及ぼしているためとして理解されている。一方、Bose 粒子系であるヘリウム 4 (^4He) 薄膜では、固相において零点空孔子が媒介する超流動、即ち超固体の存在などの新奇な物理現象の出現が期待されるが、測定手段が限られるために吸着構造に関する情報が著しく不足しており、固体なのか流体なのかすら、必ずしも明らかになっていない。

本研究では、 ^4He 薄膜に少量の ^3He を混入しての熱容量測定により、 ^4He 薄膜の状態・吸着構造の調査を行っている。 ^4He は低温でフォノンに由来する小さな熱容量しか持たないが、混入した ^3He は ^4He 薄膜の最上層内に ^4He と共存し、 ^4He 薄膜が流体であれば Fermi 気体として振る舞う。一方、 ^4He 薄膜が固体になると局在してほとんど熱容量をもたない。即ち、 ^4He 薄膜の状態や構造を反映した熱容量を示す。 ^3He の吸着量を 0.1 nm^2 或いは 0.2 nm^2 に固定し、 ^4He の吸着量を増やしながら行った吸着第 1 原子層における熱容量測定の結果、熱容量の等温曲線で 6.4 nm^2 近傍に鋭いディップが観測された。これは ^3He - ^4He 薄膜が $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相と呼ばれる、グラファイトの吸着ポテンシャルの凹凸に整合で非常に安定な固相に固化し、 ^3He が局在しているとして理解できる。これより低面密度領域は流体相として従来の知見と矛盾はない。高面密度領域での増大は、フォノンによる寄与や、相分離した ^3He - ^4He が昇温とともに混合による寄与などでは全く説明することができず、ヘリウム薄膜が再融解、或いは流動性を獲得して

いることを強く示唆する。従来、この面密度では ^4He 薄膜はグラファイト基盤に整合性をもった固相を形成すると考えられており、その予測とは全く異なる上、圧縮により再融解するという特異な現象を示すことになる。

“再融解”している領域での熱容量は ^3He の量に比例し、また、 7 nm^2 を境に熱容量の温度依存性が線形から自乗に急激に変化している。これらの振る舞いは2次元フェルミ流体の比熱としては異常であり、 ^3He は2次元空間を自由に運動してはいない、即ち、 ^3He - ^4He 薄膜が一様に融解している訳ではないことを示唆する。この面密度領域では、 ^3He - ^4He 薄膜が固化していれば吸着構造は domain wall 構造となることが期待される。domain wall 内では、ハードコア斥力とともにヘリウム原子を局在させるようとする吸着ポテンシャルの凹凸の影響が弱まる。従って、domain wall が流動性を有している可能性は残される。domain wall が流動性を有すると、 ^3He は零点エネルギーを得するために、流動性のある domain wall 内に集中することになる。domain wall 構造としては、一般に低面密度では平行に配列した striped domain wall、高面密度では蜂の巣状に配列した honeycomb domain wall 構造が期待される。domain wall が流動性を有すると、striped domain wall 構造では ^3He は1次元系を運動することになり熱容量は温度に比例する。一方、honeycomb domain wall 構造では、 ^3He 原子は蜂の巣構造上を運動することになり、グラフェンの伝導電子と類似の自由度を持ち、線形分散をもった Dirac 粒子として振る舞う可能性が考えられる。このとき、熱容量は温度の自乗に比例することが期待される。熱容量の線形から自乗への振る舞いの変化は striped から honeycomb への構造相転移で説明でき、 ^3He 薄膜における吸着構造の知見とも一致する。

Dirac 粒子系は、通常の Fermi 粒子系と異なり、全ての粒子が同じ速さ(Fermi 速度)をもち、その大きさが通常の Fermi 粒子系に比べ桁違いに大きいという特徴をもつ。Dirac 粒子系が実現されているとの仮定のもと測定された熱容量から得られる Fermi 速度は、きれいな蜂の巣構造をとる面密度で極大となり、一様な ^3He 薄膜での Fermi 速度に比べ最大2倍程度の値が得られる。また、 ^3He 面密度をさらに小さくすることにより1桁程度大きな Fermi 速度が実際観測可能であると期待される。

“再融解”を示唆する異常な振る舞いが観測されただけでなく、グラフェン・金属基板上分子・冷却原子などに続き、新たな系で Dirac 粒子系が実現されている可能性が高い。

<学位論文>

(博士論文)

友利ひかり、“Effect of local lattice strain and electron beam irradiation on electrical transport properties of graphene”、理学 (博士)、数理物質科学研究科、2014 年 3 月

(修士論文)

稲垣匠哉 鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ -S 波超伝導体接合の電気伝導、理学 (修士)、数理物質科学研究科、2014 年 3 月

大賀和人 希釈冷凍温度域 SQUID 顕微鏡の開発、理学 (修士)、数理物質科学研究科、2014 年 3 月

仁平慎太郎 2次元原子膜の電子・スピン伝導、理学 (修士)、数理物質科学研究科、2014 年 3 月

廣瀬桃子 Nb を用いた微小トンネル接合型マイクロ SQUID の開発、理学 (修士)、数理物質科学研究科、2014 年 3 月

(卒業論文)

池田尚樹 Pb-ナノポイントコンタクトの電気伝導、物理学類、2014 年 3 月

加藤大貴 石英チューニングフォークを用いた液体ヘリウムの粘性測定、物理学類、2014 年 3 月

田中宏和 グラフェンの転写方法の開発と架橋グラフェンのラマンスペクトル、物理学類、

2014年3月

平出璃音可 欠陥を導入したグラフェンのラマンスペクトル、物理学類、2014年3月

<論文>

1. Kenta Katakura, Hikari Tomori, Youiti Ootuka, and Akinobu Kanda, "Surface morphology of multilayer graphene synthesized directly on silicon dioxide", *Phys. Status Solidi C*, Vol. 10 (2013) p.p.1628–1631.
2. M. Morishita: "Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Films on Graphite", *J. Low Temp. Phys.* **171**, 664-669 (2013).

<講演>

国際会議

1. Yousuke Nukui, Hikari Tomori, Hidenori Goto, Youiti Ootuka, and Akinobu Kanda, "Temperature dependence of mobility in top and bottom surfaces of multilayer graphene placed on silicon dioxide", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe (Japan), May 22, 2013
2. Hikari Tomori, Youiti Ootuka, and Akinobu Kanda, "Comparison of Electron Transport in Graphene with Uniform and Nonuniform One-dimensional Strain", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe (Japan), May 20, 2013
3. Kenta Katakura, Hikari Tomori, Youiti Ootuka, and Akinobu Kanda, "Surface morphology of few-layer graphene synthesized directly on silicon dioxide", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe (Japan), May 20, 2013
4. H. Ito, s.Mamyoda, Y. Shibata, Y.Ootuka, S.Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H.Tamura and T.Akazaki, Imaging of spin-resolved quantum Hall edge states by near-field scanning optical microscopy, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), Wroclaw University of Technology, Poland, 1-5 July, 2013.
5. Hikari Tomori, Youiti Ootuka and Akinobu Kanda, "Electron transport in graphene with one dimensional local strain", 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), Wroclaw (Poland), Jul. 1, 2013
6. Akinobu Kanda, Yosuke Nukui, Hidenori Goto, Hikari Tomori, Youiti Ootuka, "Determination of mobility in top and bottom surfaces of multilayer graphene placed on SiO_2/Si substrate", 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), Wroclaw (Poland), Jul. 3, 2013
7. M. Morishita, "Reentrant Solidification of First Layer of ^4He Film on Graphite", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013) (Matsue, August 5, 2013).
8. Hikari Tomori, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, "Electronic transport measurement and Raman spectroscopy of e-beam irradiated graphene", 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Tokyo (Japan), Sep. 12, 2013
9. Yu Ito, Shintaro Nihei, Kenta Katakura, Hikari Tomori, Hirokazu Tanaka, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, "Channel length dependence of field effect mobility in short-channel graphene field-effect devices", 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Tokyo (Japan), Sep. 12, 2013
10. Kenta Katakura, Hikari Tomori, Yu Ito, Shintaro Nihei, Rineka Hiraide, Hirokazu Tanaka, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, "Fabrication and transport measurement of graphene field effect devices with multilayer graphene inserted into graphene/metal interfaces", 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Tokyo (Japan), Sep. 12, 2013
11. Hikari Tomori, Youiti Ootuka and Akinobu Kanda, "Introducing Nonuniform Strain to Graphene without e-beam

- Damage”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto (Japan), Sep. 20, 2013
12. Akinobu Kanda, Yousuke Nukui, Hidenori Goto, Hikari Tomori and Youiti Ootuka, “Mobility of Top and Bottom Surfaces of Multilayer Graphene Placed on SiO₂ Substrate”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto (Japan), Sep. 20, 2013
 13. H. Tomori, K. Katakura, Y. Ito, R. Hiraide, H. Tanaka, Y. Ootuka and A. Kanda, “Relationship between Transport Properties and Raman Spectra in Graphene Field Effect Devices”, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), Fukuoka (Japan), Sep. 26, 2013
 14. K. Katakura, S. Nihei, H. Tomori, Y. Ito, Y. Ootuka and A. Kanda, “Reducing Carrier Density Pinning at Graphene/Metal Interfaces Using Multi-layer Graphene”, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), Fukuoka (Japan), Sep. 27, 2013
 15. H. Tomori, R. Hiraide, H. Tanaka, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka and A. Kanda, “Inducing Local Strain in Graphene without Direct E-beam Exposure”, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2013), Sapporo (Japan), Nov. 7, 2013
 16. H. Tomori, R. Hiraide, H. Tanaka, Y. Ito, K. Katakura, Y. Ootuka and A. Kanda, “Effect of Electron Beam Irradiation on Raman Spectra and Transport Properties in Graphene”, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2013), Sapporo (Japan), Nov. 8, 2013
 17. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki, Mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge channels, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2013), NTT Atsugi R&D center, Kanagawa, Japan, November 26-29 (2013)
 18. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Hirokazu Tanaka, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, “Effect of electron beam irradiation on Raman spectra and transport properties in graphene”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2013), Kauai (USA), Dec. 11, 2013
 19. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Hirokazu Tanaka, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, “Relationship between Transport Properties and Raman Spectra in Electron Beam Irradiated Graphene”, APS March Meeting 2014, Denver (USA), Mar. 5, 2014
 20. Akinobu Kanda, Kenta Katakura, Yu Ito, Shintaro Nihei, Rineka Hiraide, Hirokazu Tanaka, Youiti Ootuka, Hikari Tomori, “Reducing Carrier Density Pinning at Graphene/Metal Interfaces Using Interfacial Multilayer Graphene”, APS March Meeting 2014, Denver (USA), Mar. 7, 2014

国内会議

1. 神田晶申, 「グラフェンナノリボンの電気伝導特性」, 福井大グラフェン研究会「グラフェンナノリボンFET へ向けて」, 福井大学, 2013年6月13日
2. 伊藤優, 仁平慎太郎, 片倉健太, 友利ひかり, 田中宏和, 平出璃音可, 大塚洋一, 神田晶申, 「グラフェン電界効果トランジスタにおける電界効果移動度のチャンネル長依存性」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学(京都), 2013年9月18日
3. 片倉健太, 友利ひかり, 伊藤優, 仁平慎太郎, 平出璃音可, 田中宏和, 大塚洋一, 神田晶申, 「グラフェン/金属電極界面に多層グラフェンを挿入したグラフェン電界効果トランジスタの電気伝導評価」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学(京都), 2013年9月18日
4. 森下将史, 「グラファイト上ヘリウム4薄膜吸着第1原子層の状態」, 日本物理学会 2013年秋季大会(徳島大学, 2013年9月28日).
5. 森下将史, 「グラファイト上ヘリウム4薄膜 domain wall の流動性」, 日本物理学会第69回年次大会(東海大学, 2014年3月30日).
6. 大賀和人, 廣瀬桃子, 大塚洋一, 「トンネル接合型マイクロ SQUID を用いた高磁場動作可能な走査型 SQUID 顕微鏡の開発」, 日本物理学会 2013年秋季大会, 徳島大学, 2013. 9. 25

7. 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」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 25
8. 松下慎平, 斎藤政通, 大塚洋一、「白金細線におけるスピホールエッジ磁化の計測」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 26
9. 稲垣匠哉, 小野田雅重, 大塚洋一、「鉄系超伝導体 FeSe_{0.5}Te_{0.5} の超伝導ポイントコンタクトスペクトロスコピー」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 26
10. 間明田周平, 柴田祐輔, 伊藤宙陸, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 大塚洋一, 野村晋太郎、「近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 26
11. 岸澤眞一, 浅井吉蔵, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 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, 遠山潤志, 長谷川修司, 深津晋, 味野道信、「第 9 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2013 実験問題」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 26
12. 近藤泰洋, 北原和夫, 原田勲, 増子寛, 荒船次郎, 岸沢眞一, 大塚洋一, 東山和幸、「物理チャレンジ 2013 報告 : V. 物理チャレンジ全体報告」、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学 2013. 9. 26
13. 友利ひかり, 平出璃音可, 田中宏和, 大塚洋一, 神田晶申, 「グラフェンのラマンスペクトルと電気伝導特性の関係」, 第 61 回春季応用物理学会学術講演会, 青山学院大学 (神奈川), 2014 年 3 月 19 日
14. 林正彦, 吉岡英生, 友利ひかり, 神田晶申, 「グラフェンの電気伝導における形状効果について」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 (神奈川), 2014 年 3 月 27 日
15. 友利ひかり, 平出璃音可, 田中宏和, 大塚洋一, 神田晶申, 「グラフェンの電気伝導特性とラマンスペクトルの関係」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 (神奈川), 2014 年 3 月 27 日

XI 物理教育および物理教育の研究

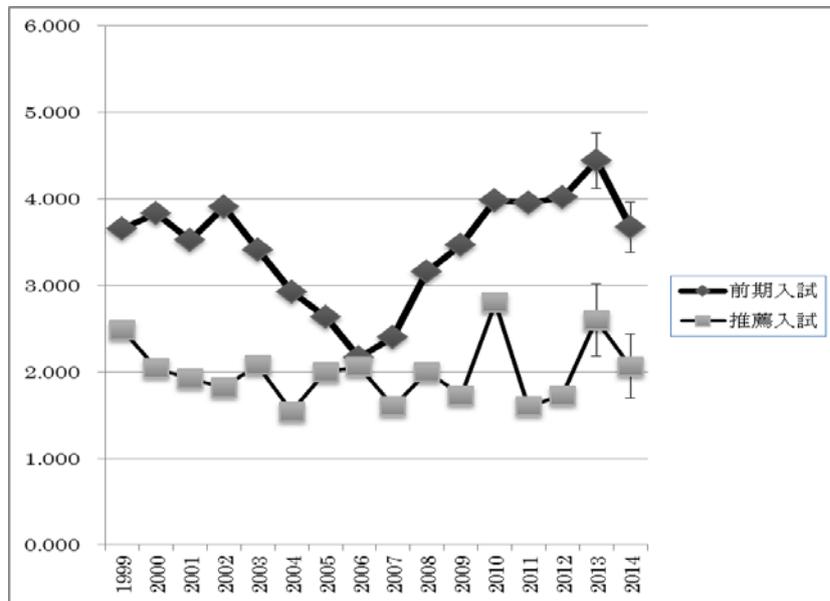
【1】物理教育

(1) 学類教育 (受川史彦)

平成 25 年度は、2007 年 4 月にそれまでの第一学群自然科学類物理学主専攻が改組されて理工学群物理学類が発足してから 7 年目である。4 月には 65 名が 1 年次に入学し、また 70 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 25 年度の卒業生は 72 名であり、その進路は、大学院進学が 59 名、就職が 9 名（民間企業 6 名、教員・公務員 3 名）、その他（進学準備中など）4 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。筑波大学は平成 25 年度より 2 学期制へ移行し、それに伴いカリキュラムが変更・再編された。これを機会に、形式的な変更だけでなく、学生が系統的に学べるよう科目の整備を行った。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、また、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の導入（年次進行）が完了した。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、夏休みに春学期科目（力学、電磁気学）の補習を行った。1・2 年次の物理学実験では、2 学期制移行に伴い、単位数の増減、内容の統合や新テーマの導入を行った。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強化し、これを用いた授業科目を開設した。

物理学類の在籍者は、1 年次 63 名、2 年次 63 名、3 年次 83 名、4 年次 75 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 25 名、合格者 3 名）、帰国生徒特別入試（志願者 1 名、合格者なし）、アドミッションセンター入試（志願者 5 名、合格者なし）、国際科学オリンピック特別入試（志願者 4 名、合格者 1 名）、推薦入試（志願者 31 名、合格者 15 名）、個別学力検査・前期日程（志願者 163 名、合格者 48 名）、私費外国人留学生入試（志願者 1 名、合格者 1 名）である。2014 年 4 月には 65 名が 1 年次に入学した。個別学力検査（前期日程）と推薦入試の志願倍率の推移を図に示す。前期日程入試は、物理学類への改組以降、上昇していたが、今年度は若干低下し、約 3.7 倍であった。



(2) 大学院教育（石橋延幸）

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。

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25年度から2学期制が導入され、それにもない授業科目・修了要件等が大幅に変わったが、大きな混乱はなかった。

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る。5月に行われるオープンキャンパスや各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外からも多くの受験生を集めている。

前期課程

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)	入学者数 (外部)
7月	31 (7)	23 (6)	16 (3)
8月	55 (20)	47 (14)	32 (6)
2月	14 (10)	10 (6)	9 (5)

後期課程

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)	入学者数 (外部)
8月	6 (0)	6 (0)	6 (0)
2月	5 (0)	5 (0)	5 (0)

平成25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・後期課程修了後も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
16	35	1	0	2	4

後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	その他
0	8	6	0	0	2

【2】体験学習（梅村雅之）

物理学類では、大学における物理学の教育の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25年度は、8月9日（金）に実施し、68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テーマのうちからひとつ選択）と在学生との懇談を行い、さらに希望者は学内の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，事務連絡	(受川史彦)
9:40-10:00	物理学類説明，実験内容説明，アンケート	(梅村雅之，坂本瑞樹)
10:05-10:40	【講義1】 素粒子	(金谷 和至)
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	(坂本瑞樹)
13:50-16:30	【物理実験】	
	① 水と固体の比熱	(東山 和幸)
	② 放射線と宇宙線	(小沢 顕)
	③ 極低温現象	(大塚 洋一)
	④ 光の干渉と回折	(富本 慎一)
16:35-17:00	質疑応答・在学生との懇談	(受川史彦，梅村雅之)
17:05-17:20	修了式	(受川史彦，梅村雅之)
17:30-18:00	計算科学研究センター見学 プラズマセンター見学	

()内は担当者であるが、その他に多数の学群生・大学院生諸氏，事務方の協力を得た。また、昼食は学類生に食堂に案内をしてもらうことにより、受講生とのコミュニケーションを図り、その後の実験や懇談で受講生が相談しやすい雰囲気づくりを心がけた。

【3】カリキュラム関係（梅村雅之）

平成 25 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) 重複履修制限の改定について

平成22年度以前科目を合わせた重複履修制限を策定し確認した。

(2) 科目の英語名について

2学期制科目の英語名称を，未決定科目について決定し，その他の英語名称の確認・修正を行った。

(3) 専門物理セミナー1, 2について

平成26年度は専門物理セミナー1のみの開講とし，次年度以降は，専門物理セミナー1, 2 ともに開講しない方針とした。

2. 大学院カリキュラム

(1) G30英語コースの設立について検討を行った。

(2) 留学等により必修科目等を欠席する学生に対する配慮措置について検討し，レポートの提出をもって出席に変えることができる措置を講じることとした。

3. 新たな教育方法の開拓と実践

(ア) 学生の能動的な学習を喚起するために，前年度に引き続いて「課題探究実習」を実施した。

(イ) 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，統計力学で実施した。

(ウ) 講義資料の閲覧やレポートの提出などに，E-learning を積極的に活用している。

(エ) 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た。

4. 教養教育・リメディアル教育

(ア) 高校で物理学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」を開講した。また，より広い学生を対象とし高度な内容まで含んだ「現代物理学への招待」も開講した。

(イ) 1年次1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」の補習を夏休みに実施した。

《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25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	4	0	0	2	1	7	3	1	{ 0 }	[7]	11 { 0 } [7]
宇宙理論	4	4	2	2	2	14	6	0	{ 1 }	[5]	20 { 1 } [5]
原子核理論	1	1	0	1	2	5	1	1	{ 1 }	[4]	7 { 1 } [4]
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	2	4	1	1	6	14	1	0	{ 0 }	[9]	15 { 0 } [9]
ナノ量子物性	0	0	0	0	0	0	1	0	{ 0 }	[0]	1 { 0 } [0]
ソフトマター理論	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[0]	0 { 0 } [0]
半導体ナノ物性 (D2ナノ)	0	0	0	2	0	2	2	0	{ 0 }	[0]	4 { 0 } [0]
ナノ構造物性 (D1, D2ナノ・D3創)	5	5	2	1	2	15	3	0	{ 0 }	[5]	18 { 0 } [5]
量子輸送研究 (D1, D2ナノ)	1	1	1	1	0	4	2	0	{ 0 }	[3]	6 { 0 } [3]
生命物理	0	0	0	0	0	0	3	0	{ 0 }	[0]	3 { 0 } [0]
素粒子実験	8	3	2	0	1	14	8	0	{ 0 }	[9]	22 { 0 } [9]
宇宙観測	2	7	1	0	3	13	2	0	{ 2 }	[11]	15 { 2 } [11]
原子核高エネ	4	5	2	1	4	16	6	0	{ 0 }	[5]	22 { 0 } [5]
原子核低エネ	3	5	1	2	1	12	0	0	{ 0 }	[6]	12 { 0 } [6]
磁性物性	1	6	1	0	0	8	4	0	{ 0 }	[2]	12 { 0 } [2]
半導体物性 (D1, D2ナノ・創, D3創)	4	3	1	3	3	14	8	0	{ 0 }	[5]	22 { 0 } [5]
強相関物性	8	5	1	0	2	16	2	0	{ 1 }	[8]	18 { 1 } [8]
表面物性	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[0]	0 { 0 } [0]
低温物性	3	5	0	0	2	10	4	0	{ 1 }	[5]	14 { 1 } [5]
プラズマ	10	11	0	3	2	26	14	0	{ 0 }	[11]	40 { 0 } [11]
物質材料	1	2	/	/	/	3	0	0	{ 0 }	[1]	3 { 0 } [1]
合計	61	67	15	19	31	193	70	2	{ 6 }	[96]	265 { 6 } [96]
(ナノ・創)	0	0	4	7	5	16	12	0	{ 0 }	[2]	28 { 0 } [2]

*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) 扇谷 豪 [森 正夫]
Solving the core-cusp problem of cold dark matter halos and the origin of their observational universalities
(コールドダークマターハローのコア-カusp問題の解決とその観測的経験則の起源)
- 2) 岡本 稔 [丸山 敏毅]
Three-dimensional calculation of non-uniform structures in low-density nuclear matter and neutron star by a relativistic mean field model
(相対論的平均場模型による低密度原子核物質と中性子星における非一様構造の3次元計算)
- 3) 友利 ひかり [大塚 洋一]
Effect of local lattice strain and electron beam irradiation on electrical transport properties of graphene
(グラフェンの電気伝導特性における局所格子歪みと電子線照射の影響)
- 4) 長崎 岳人 [中井 直正]
Development of the Low Noise 500-GHz Heterodyne Receiver for Antarctic Telescopes
(南極望遠鏡用低雑音500GHz帯ヘテロダイナ受信機の開発)
- 5) 新田 冬夢 [中井 直正]
Development of the Wide-Field Camera System Using Kinetic Inductance Detectors for the Antarctic Terahertz Telescope
(南極テラヘルツ望遠鏡のための力学インダクタンス検出器を用いた広視野カメラシステムの開発)
- 6) 馬場 隆行 [石橋 延幸]
Energy from the gauge invariant observables
(弦の場の理論の古典解における、エネルギーとゲージ不変観測量の関係)
- 7) 福岡 佑太 [矢花 一浩]
Deformation and cluster structures in light nuclei studied with configuration mixing using Skyrme interaction
(Skyrme力を用いた軽い核における変形およびクラスター構造の配位混合による記述)
- 8) 細井 克洋 [中嶋 洋輔]
Study of particle control based on Haline measurement and Monte-Carlo simulation in the GAMMA 10 tandem mirror
(GAMMA 10 タンデムミラーにおけるH α 線計測およびモンテカルロシミュレーションに基づく粒子制御に関する研究)

- 9) 三木 洋平 [森 正夫]
Numerical Investigation of Galactic Merger Utilizing High Performance Computing Architectures: Ancient Satellite Galaxy and Wandering Supermassive Black Hole
(高性能計算を駆使した銀河衝突の数値的探求: 過去の衛星銀河と銀河ハローを漂う超巨大ブラックホール)
- 10) SALAK Dragan [中井 直正]
Galactic Winds in Nearby Starburst Galaxies: Observations of M82 and NGC 1808
(近傍爆発的星形成銀河の銀河風: M82とNGC1808の観測)
- 11) 黒岩 健 [初貝 安弘]
Brownian Motion and Glassy Dynamics with Disparately Separated Time Scales
(時間スケールの分離があるときのブラウン運動とガラスダイナミクス)
- 12) 棚谷 翔 [初貝 安弘]
Numerical studies of edge states in hydrogen terminated silicene ribbons
(シリセンリボンの水素終端とエッジ状態の数値的研究)
- 13) 轟木 貴人 [江角 晋一]
Measurements of Two-Particle Correlations with respect to Higher-Order Event Planes in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au Collisions at RHIC-PHENIX
(RHIC-PHENIX $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金・金衝突実験における二粒子相関の反応平面依存性の測定)
- 14) 新井田 貴文 [江角 晋一]
Measurements of Quantum Interference of Two Identical Particles with respect to the Event Plane in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-PHENIX
(RHIC-PHENIX実験200GeV金+金衝突における同種2粒子を用いた量子力学的干渉効果の反応平面依存性の測定)
- 15) 大日向 正志 [初貝 安弘]
Quantum teleportation for continuous variables via a partially entangled state and nonorthogonal measurement
(部分的エンタングルド状態と非直交測定をもちいた連続量量子テレポーテーション)
- 16) 水口 正紀 [坂本 瑞樹]
Study of potential formation and low frequency fluctuations in the GAMMA10 tandem mirror
(GAMMA 10タンデムミラーにおける電位形成と低周波揺動に関する研究)

【博士論文】

<論文博士> [] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 池田 義雅 [江角 晋一]

Measurement of Particle Species Dependence of Elliptic Anisotropy
with High Resolution Reaction Plane Detector at $\sqrt{s_{NN}}=39, 62$ and 200
GeV Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX

(RHIC-PHENIX実験での核子対あたり39, 62, 200GeV金+金衝突における高分解能反応平面
検出器を用いた楕円型方位角異方性の粒子種依存性の測定)

- 2) 伊藤 由太 [小沢 顕]

A multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for high-precision mass
measurements of short-lived nuclei

(短寿命核精密質量測定のための多重反射型飛行時間質量分析器)

【博士論文】

<課程博士> [] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻

- 1) 花岡恭平 [岡田 晋]

Theoretical elucidations on the activity modulation mechanism of vitamin D receptor
and the DNA religation mechanism of DNA topoisomerase II

(ビタミンD受容体の活性制御機構とII型DNAトポイソメラーゼのDNA再結合反応機構に対
する計算科学的解明)

- 2) 梁 文榮 [岡田 晋]

First-Principles Atomistic Study of the Physical Mechanisms in the Next Generation
Memory Devices

(次世代メモリデバイスにおける原子レベルの物理機構に関する第一原理計算の研究)

- 3) 孙 建辉 [池沢 道男]

Charge transfer from CuInS₂ quantum dots for solar cells

(太陽電池のためのCuInS₂量子ドットからの電荷移動)

- 4) 櫻井 蓉子 [野村 晋太郎]

Spectroscopic Study of Correlated Electron-Hole Systems in Silicon Nanostructures

(シリコンナノ構造中電子-正孔相関係の分光学的研究)

【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) 池田 晴國 [初貝 安弘]
ガラス転移における平均場描像の検証
- 2) 伊藤 史哲 [金 信弘]
宇宙線ミュオン・ラジオグラフィ・システムを用いた原子炉内構造測定
- 3) 稲垣 匠哉 [大塚 洋一]
鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ -S波超伝導体接合の電気伝導
- 4) 稲葉 成紀 [小沢 顕]
回転磁場を使用した β -NMRによる不安定核核磁気モーメントの符号測定
- 5) 海野 晃 [池沢 道男]
Charge transfer and spin dephasing in colloidal quantum dots
(コロイド状量子ドットの電荷移動とスピンドィフェイジング)
- 6) 江口 濯 [假家 強]
プラズマ加熱用大電力ジャイロトロンの開発とGAMMA 10 ELM模擬実験に向けた端損失熱流束生成
- 7) 大賀 和人 [大塚 洋一]
希釈冷凍温度域SQUID顕微鏡の開発
- 8) 大島 一軌 [江角 晋一]
LHC-ALICE実験 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 陽子・鉛衝突における前方検出器を含めた長距離相関の研究
- 9) 大西 貴博 [小沢 顕]
低エネルギー領域における $^{45}\text{Sc}(p, \alpha)^{42}\text{Ca}$ 反応の研究
- 10) 岡田 俊祐 [小沢 顕]
稀少RIリングに用いる飛行時間検出器の開発
- 11) 小口 拓郎 [初貝 安弘]
乱流燃焼における燃料密度スペクトルの解析
- 12) 奥山 陽平 [今井 剛]
密度勾配によるドリフト波不安定性の粒子シミュレーション
- 13) 尾崎 瞳 [江角 晋一]
RHIC-PHENIX実験における $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金・銅衝突を用いた荷電粒子の高次方位角異方性の測定
- 14) 小野寺 唯 [中井 直正]
南極10mテラヘルツ望遠鏡主鏡パネルの開発

- 15) 笠原 宏太 [受川 史彦]
ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のためのSOI-STJ一体型検出器の開発研究
- 16) 加藤 重徳 [岡田 晋]
超格子GeTe/Sb₂Te₃相変化メモリの動作メカニズムの検討
- 17) 金沢 浩紀 [小野田 雅重]
ナシコン型Na₃V₂(PO₄)₃の物性及び関連系の創生
- 18) 軽部 大雅 [大塚 洋一]
表面プラズモン波束の金属ナノ構造における光学応答
- 19) 川崎 将平 [中井 直正]
南極30cm可搬型サブミリ波望遠鏡の日中における光学ポインティングシステムの開発とその全自動化
- 20) 河原崎 遼 [今井 剛]
GAMMA10における軟X線トモグラフィー計測によるセントラル部ECH電子加熱特性の研究
- 21) 木暮 諭 [中嶋 洋輔]
高速カメラと複合プローブを用いたGAMMA 10プラズマ計測
- 22) 北川 和 [吉川 正志]
衝突輻射モデル計算コードの開発及びGAMMA10不純物スペクトルの解析
- 23) 木原 宏一 [江角 晋一]
RHIC-PHENIX実験における荷電ハドロンを用いた2粒子相関及び高次方位角異方性の衝突システムサイズ依存性の研究
- 24) 桐原 崇亘 [森 正夫]
矮小銀河の衝突シミュレーションで探る銀河とダークマターハローの内部構造
- 25) 薫田 康弘 [野村 晋太郎]
光スイッチを用いた超高速輸送現象測定
- 26) 小林 大洋 [江角 晋一]
LHC-ALICE実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 鉛-鉛衝突におけるジェット対を伴った低横運動量ハドロン生成の研究
- 27) 斉藤 佑多 [小沢 顕]
³³Clの荷電変換断面積の測定と荷電核半径の導出
- 28) 坂本 拓磨 [小野田 雅重]
ピロリン酸バナジウム銀系の創生
- 29) 佐藤 駿丞 [矢花 一浩]
Theoretical study on optical properties of solids excited by ultra-short laser pulses
(極短パルス光によって励起された固体の光学応答に関する理論的研究)

- 30) 塩川 太郎 [岡田 晋]
多電子波束ダイナミクスの理論的研究
- 31) 下野 貴弘 [守友 浩]
層状酸化物のエレクトロケミカルドーピングに伴う物性変化
- 32) 菅谷 元典 [中井 直正]
南極10mテラヘルツ望遠鏡ヘテロダイン受信機系の開発
- 33) 鈴木 裕行 [梅村 雅之]
内部紫外線と背景紫外線が及ぼす銀河形成への影響
- 34) 鷺見 理沙 [初貝 安弘]
ツイストした2層グラフェンのホール伝導度
- 35) 高地 雅光 [守友 浩]
コバルトプルシヤンブルー類似体へのLi, Naインターカレーションと物性評価
- 36) 高橋 樹仁 [中嶋 洋輔]
GAMMA10におけるECH実験時のセントラル部イオンエネルギーバランスの時間発展解析
- 37) 田中 直斗 [江角 晋一]
LHC-ALICE実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 鉛・鉛衝突における量子力学干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究
- 38) 棚辺 大輝 [守友 浩]
層状遷移金属酸化物 Na_xMO_2 の構造物性
- 39) 長川 健太 [岡田 晋]
SiCの欠陥への理論的考察
- 40) 中澤 和寛 [今井 剛]
GAMMA10 セントラル部ECHアンテナの吸収分布制御によるプラズマ加熱特性評価および改良研究
- 41) 中嶋 慧 [都倉 康弘]
一般化量子マスター方程式による量子断熱ポンプの解析
- 42) 長塚 優 [坂本 瑞樹]
GAMMA 10/PDXにおけるダイバータ模擬実験装置内部への希ガス導入時の静電プローブ計測
- 43) 仁平 慎太郎 [大塚 洋一]
2次元原子膜の電子・スピン伝導
- 44) 長谷川 裕平 [吉川 正志]
多チャンネルマイクロ波干渉計によるGAMMA10セントラル部におけるプラズマ電子密度計測

- 45) 廣瀬 桃子 [大塚 洋一]
Nbを用いた微小トンネル接合型マイクロSQUIDの開発
- 46) 藤井 英樹 [初貝 安弘]
ガウス型コアモデルに対する自己拡散係数の理論的計算
- 47) 藤田 真司 [中井 直正]
国土地理院つくば32m電波望遠鏡のアンテナ基礎と指向性の研究
- 48) 舟橋 史祥 [中井 直正]
水蒸気レーザー観測による2型セイファート銀河NGC5495の巨大質量ブラックホールとレーザー円盤の研究
- 49) 古舘 謙一 [坂本 瑞樹]
GAMMA 10 におけるプラズマの電位及び密度揺動の統計的解析
- 50) 間明田 周平 [野村 晋太郎]
走査型近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測
- 51) 丸山 実那 [岡田 晋]
新奇炭素結晶相の物質設計と物性解明
- 52) 向井 もも [小沢 顕]
KISS実験のための高融点元素の高効率レーザー共鳴イオン化経路の探索
- 53) 山井 勇樹 [梅村 雅之]
ガスによる力学的摩擦を考慮した原始銀河ブラックホールの合体過程の研究
- 54) 山中 綾香 [岡田 晋]
電界下における有限長カーボンナノチューブの電子物性
- 55) 若梅 一真 [守友 浩]
プルシャンブルー類似体におけるイオンダイナミクスの分光学的研究
- 56) Duong Thi Diem My [大野 隆央]
First principles study on cathode materials $\text{Li}_3\text{FePO}_4\text{CO}_3$ and $\text{Li}_3\text{NiPO}_4\text{CO}_3$ for rechargeable Li-ion batteries
(Li二次電池正極材料 $\text{Li}_3\text{FePO}_4\text{CO}_3$ 及び $\text{Li}_3\text{NiPO}_4\text{CO}_3$ に関する第一原理計算)
- 57) 鈴木 皓司 [小野田 雅重]
三角格子型 Li_xCoO_2 におけるLi低濃度相の磁性と伝導
- 58) 鍋倉 修英 [中井 直正]
公開用アンモニア観測データベース検索解析システムの開発

物理学セミナー

平成25年度

	開催日	講師	題目
第1回	10月2日	中井 直正 (宇宙観測)	生きたシーラカンスの発見物語
第2回	10月9日	野村 晋太郎 (物性実験)	分数荷電準励起子と二次元電子系端状態の観測
第3回	12月11日	谷口 裕介 (素粒子理論)	2 flavor QCD の有限温度相転移次数は一次？二次？
第4回	10月23日	梅村 雅之 (宇宙物理)	宇宙進化と巨大ブラックホールの合体
第5回	10月30日	井手 俊介 (プラズマ) (連携大学院)	核融合、エネルギー開発とプラズマ物理
第6回	11月13日	庄司 光男 (物性理論)	生体内化学反応の理論解明
第7回	11月20日	原 和彦 (素粒子実験)	LHC-ATLAS 実験におけるヒッグス粒子の観測
第8回	11月27日	矢花 一浩 (原子核理論)	トリプルアルファ反応率の量子力学計算
第9回	12月4日	江角 晋一 (原子核実験)	クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP) - 高温・高密度の宇宙初期や中性子星内部の状態の解明

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 7,047,315 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
218,295 円

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	名誉教授 舛本 泰章	24102702	電子スピンのコヒーレント初期化の研究	4,100
"	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	13,300
"	計	補助金	教授 都倉 康弘	21102003	半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究	15,600
"	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	900
"	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	800
"	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 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	11,800
"	"	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	11,800
"	"	補助金	講師 瀬田 益道	22244011	南極から探る銀河系の星間ダストの姿	3,900
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	800
		助成金				1,400
"	"	補助金	名誉教授 舛本 泰章	23340084	人工原子の新機能性の開拓	3,800
"	"	補助金	教授 金谷 和至	21340049	物理的クォーク質量における有限温度・有限密度QCDの格子研究	3,000
"	"	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	2,700
		助成金				1,600
"	"	補助金	教授 初貝 安弘	23340112	幾何学的位相による物質相：量子液体及びグラフェンでの応用と展開	4,100
"	"	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 石塚 成人	23340054	格子QCDによるK中間子崩壊振幅の研究	2,900
"	"	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	4,800
		助成金				5,000
"	"	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	2,000
		助成金				3,100
基盤研究(C)	一般	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 今井 剛	23560997	EC加熱変調を用いたELM状熱流束模擬による境界プラズマ制御研究	700
"	"	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	1,600
"	"	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	1,400
"	"	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	900
"	"	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 原 和彦	25400294	アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定	1,500
"	"	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系統樹の構築	800
"	"	助成金	講師 小松原哲郎	24540298	ビッグバン元素合成におけるリチウム合成機構の解明	700

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	補助金	講師	谷口 裕介	22540265	格子上的非摂動論的な繰り込みの実践	500	
"	"	助成金	助教	上岡 隼人	25400315	Ti酸化物における光誘起相転移領域の時間・空間発展の研究	1,400
"	"	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	森下 将史	23540401	2次元量子固体フラストレート量子スピン系における非磁性置換とバリステック熱伝導	800
挑戦的萌芽研究	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	1,900	
"	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	2,100	
"	助成金	准教授	神田 晶申	24651166	グラフェン/金属電極間の界面制御による短チャネルグラフェン電界効果素子	700	
"	助成金	准教授	笹 公和	23656586	難測定核種カルシウム41を高エネルギー加速器質量分析により超高感度で検出する試み	700	
若手研究(A)	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	5,700	
若手研究(B)	補助金	助教	神谷 克政	22740259	蛋白質環境下におけるアミノ酸のプロトン親和性変化の量子論的解析	700	
"	助成金	助教	庄司 光男	24750007	生体酵素における反応機構と反応制御機構解明のための理論的研究	700	
"	助成金	助教	長江 大輔	24740141	磁気双極子モーメントの符号決定手法の開発	1,300	
合 計						130,200	

※ 網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

平成25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	都倉 康弘	大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構	スピン量子コンピュータの理論研究	9,265,000
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	75,660,000
3	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—」	4,785,000
合 計					89,710,000

平成25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)	450,000
2	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
3	講師	中條 達也	(独)日本学術振興会	平成25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」	2,492,000
4	助教	佐藤 勇二	(独)日本学術振興会	平成25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
合 計					5,712,000

平成25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	ブルシヤンブルー類似体膜によるイオン吸脱着素子の開発	2,620,000
2	教授	岡田 晋	株式会社東芝	バルクSi層、酸化膜中におけるAg拡散及び電流パス(フィラメント)形成/分解に関する理論検討	420,000
3	教授	白石 賢二	超低電圧デバイス技術研究組合	超格子や界面層を用いた低電力相変化デバイスの信頼性研究開発【計算科学研究センター受入 34,94,352円 / 数理工物質系受入 4,905,648円】	4,905,648
4	准教授	小野田雅重	TDK株式会社 技術本部	リン酸ピロリン酸バナジウムリチウム正極に関する共同研究	2,832,500
合 計					10,778,148

平成25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	守友 浩	一般財団法人キャンソ財団	「ネットワークポリマーを用いた『カラー電池』の開発」に対する研究助成	4,000,000
2	教授	守友 浩	公益財団法人双葉電子記念財団	「有機太陽電池の電荷生成効率の決定手法の開発」に関する研究	1,000,000
3	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の研究」に対する研究助成	2,500,000
4	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	1,300,000
5	助教	小林 航	一般財団法人熱・電気エネルギー技術財団	「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」に対する研究助成	1,000,000
合 計					9,800,000

平成25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	金 信弘 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	8,650,000
2	物理学専攻		文部科学省	卓越した大学院拠点形成支援補助金:研究拠点形成費等補助金(若手研究者養成費)	10,797,017
合 計					19,447,017

平成25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	平成25年度日本表面科学会 第19回技術賞	フェムト秒レーザー励起光電子顕微鏡法による表面プラズモン波の可視化	11月
2	教授	今井 剛	平成25年度プラズマ・核融合学会賞（第18回技術進歩賞）	ジャイロトロンの高効率化運転によるマルチメガワット ECRHシステムの構築とプラズマの高電子温度化への貢献	12月
3	助教	池添竜也	プラズマ・核融合学会第30回年会 2013年度若手学会発表賞	GAMMA10セントラル部における高周波波動の空間構造および非線形結合現象	12月

役割分担（平成25年度）

【物理学域】

物理学域長	大塚
グループ長	藏増、梅村、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
理論グループ懇談会議長	矢花
実験系教授懇談会世話人	中井
自己点検自己評価委員会	藏増、梅村、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
カリキュラム委員長	梅村
カリキュラム委員	坂本、橋本、梅村、中井、初貝、小沢、石橋、受川、大塚
物理学域広報委員会	岡田
物理学域教育研究倫理委員会	藏増、梅村、矢花、初貝、白石、金、中井、小沢、守友、今井、大塚、石橋、受川
物理学域図書係	谷口(裕)
学生支援対応チーム	大塚、石橋、受川、梅村
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、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
校正線源管理責任者	大塚
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	池沢、原
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

【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	金谷(物理)
研究科長	秋本(電物)
物理学専攻長	大塚
物理学専攻学務委員	石橋
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、大塚
系人事委員会総会委員	金谷、大塚、受川、梅村、今井
系運営委員会委員	金谷、大塚、受川
研究科運営委員会委員	金谷、大塚、受川、石橋
研究科学務委員会	石橋
研究科就職委員会	石橋
系広報委員会委員	石橋
系図書委員会委員	谷口(裕)
系施設・安全管理委員会委員	大塚
系情報環境委員会	大塚、新井、岡田、笹
系総合研究棟B棟管理委員会委員	岡田、大塚
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	石橋
研究科学生相談室員	森

【物理学類】

物理学類長	受川
物理学類学務委員	梅村
物理学実験責任者	坂本
学類クラス担任（1年）	藏増、久保(敦)
（2年）	瀬田、東山
（3年）	石橋、中嶋
（4年）	初貝、池沢

【理工学群】

入学試験実施委員会	原、笹
全学学群教育課程委員会	梅村
全学学群教職課程委員会	小野田
学生担当教員	江角
スポーツ運営委員会	南
理工学群FD委員(FD窓口教員)	梅村
理工学群総合政策室委員	初貝
理工学群ネットワーク委員会	橋本
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	野村
附属図書館運営委員会	坂本
教養教育機構	金
総合科目編成委員会	
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	池沢
学情分散サテライト	橋本

【センター】

計算科学研究センター長	梅村
研究基盤総合センター運営委員会	小沢
研究基盤センター低温部門運営委員会	神田、野村
研究基盤センター工作部門運営委員会	野村
研究基盤センター分析部門運営委員会	池沢
アイソトープ環境動態センター運営委員会	金
プラズマ研究センター運営委員会	矢花、中井、金
プラズマ研究センター運営協議会	矢花、中井、金
計算科学研究センター運営委・運営協議会	都倉、矢花
学際物質科学研究センター運営委員会	専攻長

【全学委員会委員等】

筑波大学学長補佐室	大塚
ダイバシティ推進委員会委員	(物工)
ハラスメント相談員	森
放射線管理委員会委員	原
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	梅村、野村
教育企画室 室員	新井
教育イニシアティブ機構会議 構成員	新井
筑波大学交通安全会理事	中嶋
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25.4.1～平26.3.31)

【物理学域に来られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
池添 竜也	助教	H25.4.1	筑波大学研究員
苅宿 俊風	助教	H25.4.1	東京大学特任研究員
益井 宙	助教	H25.6.1	ローレンスバーク国立研究所(アメリカ)
重田 育照	教授	H26.3.16	大阪大学

【物理学域を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
白石 賢二	教授	H25.5.15	名古屋大学
小松原哲郎	准教授	H25.8.15	Institute for Basic Science(韓国)
神谷 克政	助教	H25.8.31	神奈川工科大学
宇川 彰	教授	H26.3.31	理化学研究所計算科学研究機構
上岡 隼人	助教	H26.3.31	日本大学

	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 宇川 彰 金谷和至 藏増嘉伸	計算科学セ	実験	宇宙観測	教授 講師 助教	中井直正 瀬田益道 永井 誠	
		准教授	石井理修 石塚成人 根村英克 吉江友照 谷口裕介 佐藤勇二 毛利健司	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			原子核	教授 准教授 講師 助教 助教 技術職員	三明康郎 小沢 顕 新井一郎 江角晋一 笹 公和 中條達也 小松原 哲郎 長江大輔 益井 宙 加藤純雄
		講師 助教				物性		教授 准教授	守友 浩 大塚洋一 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 上岡隼人 小林 航 舛本泰章
		教授	梅村雅之 森 正夫 吉川耕司	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ			物性	教授 准教授 講師 助教 研究員	
実験	素粒子	教授	受川史彦 金 信弘 原 和彦 佐藤構二 武内勇司		プラズマ	教授 准教授 講師 技術職員 シニアスタッフ	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 大川和夫 平田久子	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 プラズマセンター	
		准教授 講師							
	宇宙物理	教授 准教授 講師	梅村雅之 森 正夫 吉川耕司	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ					
	原子核	教授 准教授 講師	矢花一浩 寺崎 順 橋本幸男	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ					
	物性	教授 准教授 助教	有光敏彦 岡田 晋 都倉康弘 初貝安弘 白石賢二 重田育照 谷口伸彦 苅宿俊風 久保敏弘 庄司光男 吉田 恭 神谷克政	TIMS 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ					

研究員

石井 峻	宇宙観測
荒井 均	宇宙観測
金子紘之	宇宙観測
小鍋 哲	物性理論
柴田恭幸	物性実験
猪谷太輔	物性理論
クリフト ミル プーター	物性理論
松中哲也	原子核実験

連係大学院

宇治進也	NIMS
大野隆央	NIMS
迫田和彰	NIMS
胡 暁	NIMS

連携大学院

蔡 兆申	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
濱松清隆	原研	物理
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
横尾 篤	NTT	物理, ナノ

客員教員

新井康夫	KEK
浦川順治	KEK
幅 淳二	KEK
宮武宇也	KEK
田中真伸	KEK
高崎史彦	KEK
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
岡野久美子	教務
石井浩子	会計
夏井久美子	KEK連携

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2013（平成25）年度

発行 2014年10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 029-853-4492

印刷 谷田部印刷株式会社

ISSN 2187-4824