

ISSN 2187-4824

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2011 (平成23) 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	28
III	宇宙物理理論グループ	64
IV	宇宙観測グループ	82
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	124
VII-2	量子物性理論グループ	131
VII-3	ナノ量子物性グループ	138
VII-4	ソフトマター理論グループ	143
VII-5	半導体ナノ物性グループ	149
VII-6	ナノ構造物性グループ	157
VIII	生命物理グループ	163
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	171
IX-2	半導体物性グループ	177
IX-3	強相関物性グループ	190
IX-4	表面物性グループ	203
IX-5	低温物性グループ	208
X	プラズマ研究グループ	216

— 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	255
	【1】 物理教育	
	【2】 体験学習	
	【3】 カリキュラム関係	

— 補足資料 —

	大学院資料	259
	物理学域資料	267

1. 素粒子理論グループ

教授 青木 慎也、石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至

准教授 石塚 成人、藏増 嘉伸、吉江 友照、石井 理修、根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、八田 佳孝、毛利 健司

研究員 浮田 尚哉、Nguyen Hoang Oanh、大野 浩史、佐々木 健志、
土井 琢身、滑川 裕介、西山 陽大

大学院生 (10名)

【人事異動】

西山陽大氏(京都大学研究員)が研究員として着任した(2011年4月1日)。石井理修計算科学研究センター主任研究員(HPCI戦略プログラム分野5)が、計算科学研究センター准教授(HPCI戦略プログラム分野5)となった(2011年4月1日)。根村英克氏(東北大学助教)が、計算科学研究センター准教授(HPCI戦略プログラム分野5)に着任した(2011年8月16日)。

土井琢身研究員(計算科学研究センター)が東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター特任助教として転出した(2011年6月30日)。Nguyen Hoang Oanh氏(2012年1月31日まで計算科学研究センター研究員)が、ベトナム国立大学に転出した(2012年3月)。大野浩史研究員が、ドイツ・ビーレフェルト大学研究員に転出した(2012年3月31日)。西山陽大研究員が、京都産業大学研究員として転出した(2012年3月31日)。

八田佳孝助教(筑波大学若手大学人育成イニシアティブ)が、数理物質系准教授(物理学専攻)に昇任した(2012年4月1日)。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論、超弦理論、高エネルギー・ハドロン物理学の、3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た。格子場の理論グループの研究者の大部分は、2006年7月に計算科学研究センターの次期並列計算機としてPACS-CSが導入されたのを契機として新たに立ち上げられた研究グループPACS-CS Collaborationに参加している。PACS-CS Collaborationでは、計算科学研究センターのPACS-CSやT2K-Tsukubaを主要な計算機資源として、QCDに関する近似のない物理的予言を行うことを目的として、3種類(up、down、strange)の軽いクォークをその物理的質量(物理点)において動的に扱う $N_f = 2 + 1$ QCDの大規模シミュレーションを進めた。また、up、down間の質量差や電磁相互作用を取り入れる $N_f = 1 + 1 + 1$ QCDの研究や、格子QCDによるHe原子核の研究などにも着手した。さらに、こ

れと並行して、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同してオーバーラップ・フェルミオンを用いた研究を推進している JLQCD Collaboration や、核子間ポテンシャルやハドロン間相互作用の研究を推進している HAL QCD Collaboration、有限温度・有限密度 QCD の研究を推進している WHOT-QCD Collaboration など、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。

次世代スーパーコンピュータ「京」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。HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、青木が統括責任者を務める、分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2010 年度から準備研究を行い、2011 年度は本格的な研究を開始した。分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木が拠点長を勤める「計算基礎科学連携拠点」(<http://www.jicfus.jp/jp/>) である。分野 5 の活動に関しては、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/> を参照のこと。また、「京」を用いて計算機科学と計算科学分野の連携・融合を促す国際的な研究拠点として、神戸に計算科学研究機構 (AICS) が設立され、2010 年度から藏増が計算科学研究機構の主任研究員を兼任している。

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、弦の場の理論と次元正則化、重力理論／ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅等についての研究を行った。

高エネルギー・ハドロン物理の分野では、高エネルギー重イオン衝突直後のグルオン物質の時間発展と熱化過程の研究、陽子スピンのクォークとグルオンのヘリシティと軌道角運動量にどのように分解されるかの研究、さらに、LHC の陽子衝突実験で観測された終状態の生成粒子数が極めて大きい現象に関して、原子核衝突でみられるような楕円形フローが起こる可能性の研究を行った。

【1】 格子場の理論

(青木 慎也、宇川 彰、金谷 和至、石塚 成人、藏増 嘉伸、吉江 友照、石井 理修、根村 英克、谷口 裕介、浮田 尚哉、Nguyen Hoang Oanh、大野 浩史、佐々木 健志、土井 琢身、滑川 裕介)

(1) PACS-CS Collaboration の活動

計算科学研究センターでは、平成 17 年度から 3 ヶ年計画で特別教育研究経費（拠点形成）を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機 PACS-CS（計算ノード数 2560、ピーク演算性能 14.3Tflops）が平成 18 年 7 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として

格子 QCD の研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学系メンバーを中心として組織されている。その目標は、3種類 (up、down、strange) の軽いクォークをその物理的質量 (物理点) において動的に扱うシミュレーションを行い、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことである。平成 18、19 年度から物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くし、平成 20 年度より PACS-CS プロジェクトの目標である物理点でのシミュレーションへの取り組みを開始し、平成 21 年度に、reweighting 法を用いた物理点直上でのシミュレーションに成功した。平成 22 年度からは、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションの開発と、物理点における体積効果の検証を開始した。

なお、PACS-CS は平成 23 年 9 月末をもって運用を終了し、平成 24 年 2 月より後継機となる密結合並列演算加速機構実証システム 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) が稼働を開始した。

1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションと物理点における体積効果

従来の格子 QCD 計算では、アルゴリズム的理由により up と down クォークの質量は人為的に等しくし (2+1 フレーバー)、電磁相互作用の効果も無視していた。これに対して、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションでは自然界を再現すべく up、down、strange クォークの質量をすべて独立なものとして扱い、電磁相互作用の効果も同時に評価することを目指している。電磁相互作用および up と down クォークの質量差は reweighting 法によって取り入れている。本格計算は $32^3 \times 64$ の格子サイズを用いて行われ、up クォーク質量、down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するための 4 つの物理インプットとして π^+ メソン、 K^0 メソン、 K^+ メソン、 Ω バリオンを採用した。これにより、up と down クォークの質量差を直接定量的に評価することが可能となった。現在計算は終了し、論文を準備中である (論文 24)。

物理点における体積効果の検証に関しては、超並列クラスタ計算機 T2K-Tsukuba (計算ノード数 648、ピーク演算性能 94 Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始) を利用して 64^4 の格子サイズを用いた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを実行中である (論文 13)。本年度は reweighting 法を用いた物理点へのチューニングが主な課題であった。図 1 は、ハドロン質量の実験値との比較を表している。ここでは、up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するための 3 つの物理インプットとして、 π メソン、 K メソン、 Ω バリオンの質量を用いており、黒丸がオリジナルなシミュレーション結果、青丸はチューニング後の物理インプット、赤丸はそれ以外のハドロン質量を表している。青丸で表された結果から、reweighting 法を用いたクォーク質量の物理点へのチューニングが適切になされていることがわかる。チューニング後も ρ メソン質量と Δ バリオン質量の実験値からのズレが他のハドロンに比べて顕著であるが、それらは実験的には共鳴状態であることが知られており、その効果は図中の結果には取り入れられていない。その他のハドロンに関しては、実験値とのズレは最大で数%程度である (論文 23)。

格子 QCD による原子核の直接構成

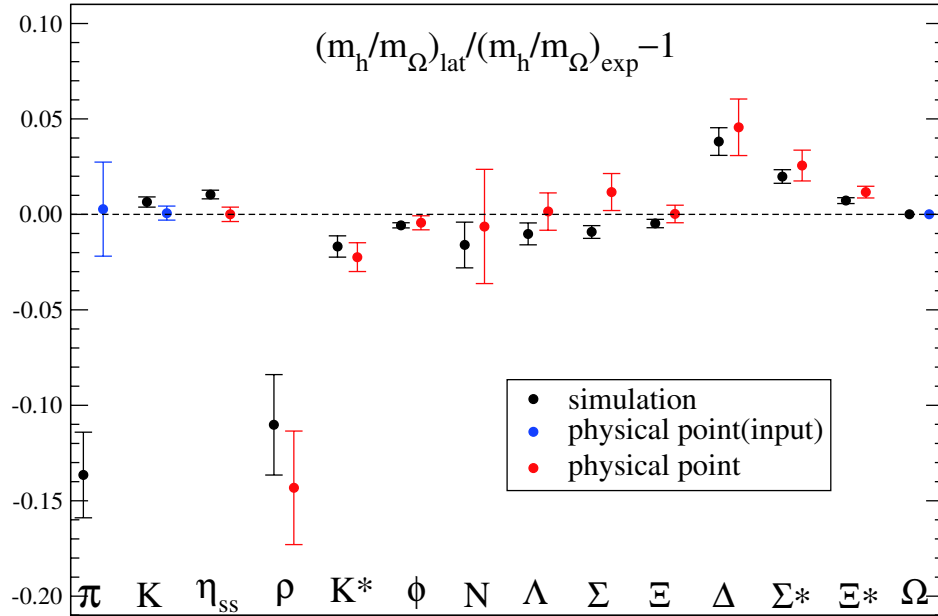


図 1: 物理点直上でのシミュレーションによる、ハドロン質量の実験値との比較。Ωバリオンの質量で規格化されている。黒丸、青丸、赤丸に関しては本文を参照。

格子QCDによる原子核の直接構成の研究は、宇川、蔵増らにより、平成21年度にヘリウム原子核の束縛エネルギー計算が開始され、平成22年度には2核子系の計算が試みられた。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る。2核子系にはスピン三重項チャンネル（重陽子）とスピン一重項チャンネルが存在するが、前者のみが束縛状態であり、その束縛エネルギーが3 MeV弱と極めて小さいことが大きな特徴である。しかしながら、シミュレーション結果は両チャンネルとも束縛状態であり、われわれが見出したスピン一重項チャンネルの束縛状態は、クエンチ近似かつ重いクォーク質量で計算を行ったことによる効果だと考えている（論文11,12）。そのため、真空偏極効果を取り入れ物理的クォーク質量に近づけていけば、スピン一重項チャンネルの束縛エネルギーは徐々に減少して最終的に非束縛状態になるのではないかと推測し、本年度は2+1フレーバーQCDシミュレーションによりヘリウム原子核および2核子系の束縛エネルギー計算を実行した。現在のところ、πメソン質量が約500 MeV程度の世界でも2核子系の両チャンネルは束縛状態であることが示唆されている。結果は、近々に論文に纏める予定である（論文25）。

U(1)問題の研究

これまでPACS-CSおよびT2K-Tsukubaを利用して生成された配位を用いて様々な物理量を計算することが可能である（論文16）。その興味深い一つとして、フレーバー1重項の疑スカラー粒子(η'粒子)の質量の問題(U(1)問題)の研究があげられる。このη'粒子は、他の疑スカラー粒子と異なり、大きい質量を持つ。これは、U(1)_Aの量子異常による破れによって、質量を獲得するためだと考えられている。この現象の深い理解の為には、この粒子の質量を格

子上の数値計算により定量的に評価し、実験値と比較することが非常に重要である。石塚、宇川、吉江らは、PACS-CS グループによって生成されたゲージ配位 ($a = 0.0907$ fm, $L = 2.9$ fm) の中で、 π 中間子質量が $m_\pi = 410$ MeV と $m_\pi = 300$ MeV の二つの場合について数値計算を行った。このような大きい体積での計算は、これまでに行われていなかった。同じ量子数を持つ擬スカラー粒子である η 粒子との混合は、二種類の演算子を使い相関関数行列を計算する事によって解いた (論文 22)。

得られた η 粒子 と η' 粒子 の質量の結果は以下である。 $m_\pi = 410$ MeV の場合は $m_\eta = 593 \pm 43$ MeV, $m_{\eta'} = 850 \pm 68$ MeV、また $m_\pi = 300$ MeV では $m_\eta = 617 \pm 53$ MeV, $m_{\eta'} = 1050 \pm 240$ MeV である。これらは実験値 : $m_\eta = 548$ MeV, $m_{\eta'} = 958$ MeV を、おおむね再現している。しかし、この問題の完全な理解のためには、更に統計誤差を小さくし、クォーク質量を詳細に調査し、その後実験値と比較する必要がある。現在、統計精度を向上させるための計算を継続中である。

(2) 格子 QCD によるバリオン間力の研究 (HAL QCD Collaboration)

2つの核子の間に働く力、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、特に近距離での斥力 (斥力芯と呼ばれている) 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。青木、石井らは、東京大学の初田との共同研究で、二核子系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用いて格子 QCD により計算する方法を提案し、さまざまな研究を進めている (論文 7,9,14)。青木はポテンシャルの近距離での振舞を解析的に調べる方法を提案したが、今年度はその方法を3体力に拡張し、核子の場合は3体力は近距離で常に斥力になることを示した。また、石井らはポテンシャルを精度よく求める新しい方法を提案し、力学的クォークの寄与を含んだ計算で核力ポテンシャルを求めた (論文 4)。

フレーバー SU(3) 極限での H ダイバリオン

昨年度、HAL QCD Collaboration は、フレーバー SU(3) 対称極限では H ダイバリオンが存在することを示したが、今年度はクォーク質量がより重いものと軽いもので計算を行い、H ダイバリオンの束縛エネルギーの質量依存性を詳細にしらべた。また得られたポテンシャルを用いて、SU(3) の破れの効果を近似的な手法で計算した (論文 17)。

ストレンジネス $S = -2$ のバリオン間相互作用

佐々木らは、従来の HAL QCD collaboration によるポテンシャルの導出方法を結合チャンネル Schrödinger 方程式に適用しストレンジネス $S = -2$ の2体バリオン系のポテンシャル行列を得た。この系の spin singlet 部分は SU(3) 極限で H-dibaryon が束縛しているチャンネルであり、s クォークが u,d より重くなり、SU(3) の破れに伴ってこの束縛系がどのように変化するかを調べる上で重要な計算となる。現在の計算では、CP-PACS/JLQCD Collaboration によって生成されたパイオン質量が 875 MeV に対応する 2+1 フレーバーゲー

ジ配位を使っており、その散乱位相差を見ると H-dibaryon が深く束縛している兆候 (図 2) を示している。今後の計算により、ハドロン質量が現実世界に近づくにつれて H-dibaryon がどのような運命を辿るかを検証できると期待される (論文 30)。

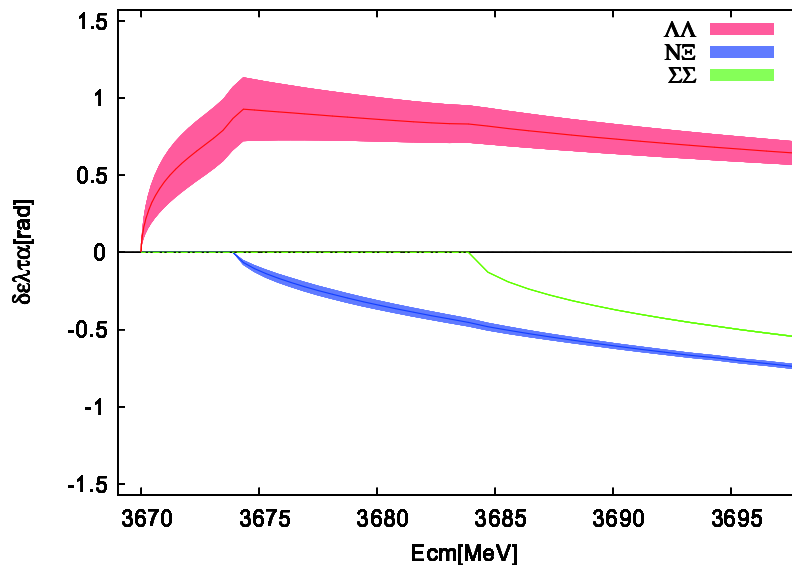


図 2: ストレンジネス $S = -2$ 系の散乱位相差。

バリオン間三体力の研究

近年、原子核の性質、あるいは超新星爆発や中性子星といった高密度系の性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が認識されている。土井らは、格子 QCD による三体力の決定に向けた研究を行った本年度は、三核子系としては三重陽子チャンネルを対象とし、三核子が等距離直線上に並んだ空間配置における三体力を研究対象とした。三体力を不定性無く求めるためのフレームワークを構築すると共に、実際の格子計算を、CP-PACS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 1.1 GeV に対応する 2 フレーバージェ配位を用いて行った。その結果、近距離において三体斥力効果が存在することを見出した (図 3, 論文 40,39)。

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

金谷、青木らは、東京大学初田教授、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田助教らとの共同研究で、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 (論文 5)。

固定格子間隔アプローチと T -integral 法による状態方程式の研究

平成 20 年度に開発した T -integral 法に基づく固定格子間隔アプローチは、様々な温度のシミュレーションを、一つの格子スケールで実行する方法で、計算時間を大幅に抑えつつ、精度の高い有限温度計算を遂行する可能性を拓いている。平成 20 年度にクエンチ近似による試験研究で方法としての有効性を確認し、平成 21 年度から、現実的な $N_f = 2 + 1$ でのシミュレーションを進めて

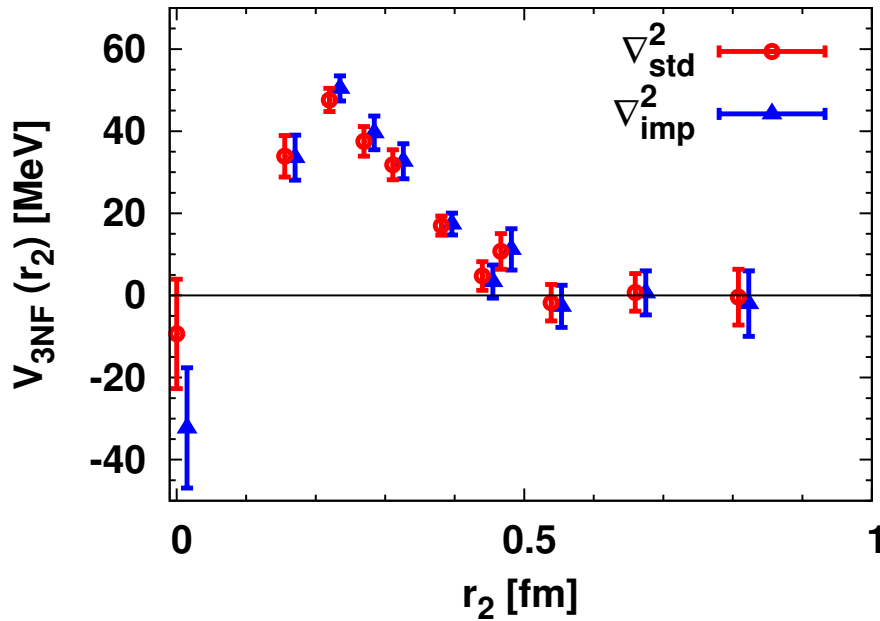


図 3: 三核子が等距離 r_2 [fm] で直線上に並んだ場合における三体力 [MeV]。

いる。第一段階として、u, dクォーク質量が現実より重い点で有限温度シミュレーションを実行し、ウィルソン型クォークとして初めて、 $N_f = 2 + 1$ の状態方程式の計算に成功した。固定格子間隔アプローチでは、既存のゼロ温度配位を活用できるメリットがある。この研究では、CP-PACS+JLQCDグループによる $N_f = 2 + 1$ QCD の温度ゼロでの研究結果と公開されているゼロ温度ゲージ配位を利用することで、計算コストを大幅に削減した (図4、論文41)。

有効ポテンシャルによる QCD 有限温度・有限密度相転移の研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の次数を判定するうえで、観測量のヒストグラムは最も直感的な情報を含んでいる。他方、系の作用に現れる物理量に関するヒストグラムは、reweighting 法で系のパラメータ依存性を調べる上で、中心的な役割をはたしており、reweighting 法を使う上で必ず計算する量でもある。我々は、これらのヒストグラムから定義される有効ポテンシャルと reweighting 法を組み合わせることにより、相転移次数を容易に判定する解析方法を開発した (論文38)。

その第一段階のテストとして、クォークが重い領域の QCD の相構造を、密度がゼロの場合 (平成22年度) と有限密度の場合 (平成23年度) の両方について研究した。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。密度がゼロの場合には、系のゲージ部分の内部エネルギー密度に相当するプラケットの有効ポテンシャルを計算し、その振る舞いから相構造を研究した。reweighting 法から導かれる有効ポテンシャルの微分の簡単な振る舞いを利用して、様々なゲージ結合定数 β におけるシミュレーショ

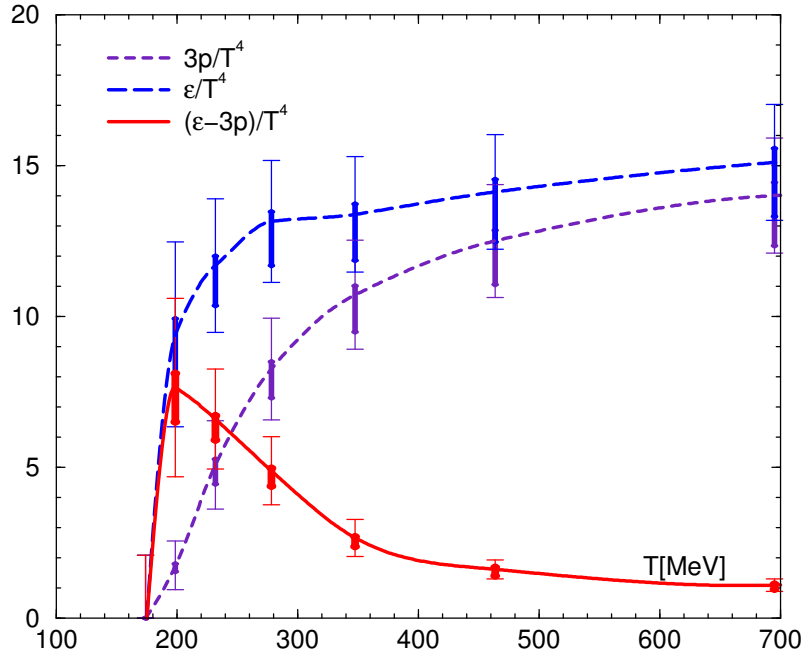


図 4: ウィルソン型クォークを用いた $N_f = 2 + 1$ QCD の状態方程式。 p はクォーク物質の圧力、 ϵ はエネルギー密度、 $\epsilon - 3p$ はトレース・アノーマリを表す。 u, d クォークは現実より重く、 $T \sim 200$ MeV あたりが有限温度クロスオーバー温度に相当する。

ン結果を組み合わせて、ブラケット期待値の広い範囲で有効ポテンシャルの微分を評価した (図5左)。それに基づき、有効ポテンシャルを計算して、純ゲージ理論の1次相転移が、動的クォークの効果によりクロスオーバーに変わる臨界点の位置を評価した (図5左)。有限密度では、ブラケットと、重いクォークの自由エネルギーに相当するポリアコフループの二つの観測量に関する有効ポテンシャルを調べる必要がある (図5右)。化学ポテンシャルを含むホッピングパラメータ展開とシミュレーションにより、クォークによる有限密度位相項の評価を行い、1次相転移がクロスオーバーに変わる臨界点の位置は、位相項を無視した「位相クエンチ QCD」の臨界点からほとんど動かないことを示した (論文34)。

この研究の最終目標は、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である。現在それに向けて、研究を進めている。クォークが軽くなると、ポリアコフループは重要な役割を果たさなくなるので、クォーク部分の内部エネルギーに対応する、クォーク行列式そのものに関する有効ポテンシャルを研究する。位相クエンチ QCD でシミュレーションを実行し、化学ポテンシャルが小さい領域で有限密度位相項の効果を reweighting 法で評価した結果、この領域では位相項の効果が小さいことを確認した。現在、化学ポテンシャルがより大きい場合を研究している (論文32)。

格子上の中間子スペクトル関数の研究

チャーモニウムなどのスペクトル関数の研究は、クォーク・グルーオン・プラ

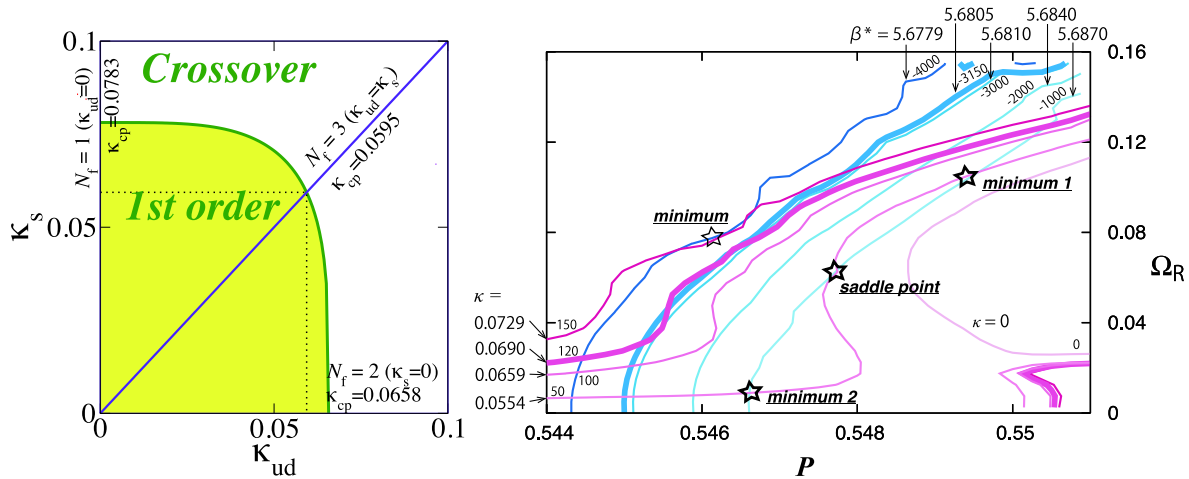


図 5: 重クォーク領域における $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度相構造の研究。(左) 密度ゼロの場合の、有限温度相転移次数のクォーク質量依存性。横軸は ud クォーク質量の逆数、縦軸は s クォーク質量の逆数を表し、緑の領域は有限温度相転移が 1 次となる範囲を表す。(右) 有限密度の場合の有効ポテンシャルの温度、およびクォーク質量依存性。赤い線と青い線は、それぞれ、有効ポテンシャルの物理量 P (プラケット) と Ω_R (ポリアコフ・ループ) に関する微分がゼロになる場所を表す。赤い線と青い線が交差する点で、有効ポテンシャルの極小点や鞍点の位置がわかる。極小点が二つある場合は相転移が 1 次で、一つになるとクロスオーバーになる。

ズマ (QGP) の性質を研究する上で重要な情報を与えている。これまで格子上では、最大エントロピー法を用いた計算が主に行われてきたが、仮想モデルの選び方に由来する結果の不定性の問題や、有限の格子上では離散的なはずのスペクトル関数が連続関数になってしまう原理的な欠陥があり、最終的なスペクトル関数の信頼性が問題となっている。我々は、対角化の方法を用いて、離散的なスペクトル関数を評価する方法を開発し、その有効性を検証した。自由 Wilson クォークの場合に、中間子伝搬関数から対角化の方法を使って得られるスペクトル関数と、スペクトル関数の解析解を比較し、対角化の方法で用いる規定の数を十分大きくすることで、解析解が再現されることを確認した。他方、時間方向の格子サイズや数値精度の限界による制限も明らかにした。次に、クエンチ近似 QCD を研究し、基底状態に関しては、最大エントロピー法によるスペクトル関数のピークの位置とピーク周りの面積を、対角化の方法でよく再現することを示した。他方、第一励起状態に関しては、対角化の方法の方が実験値に近い結果を導くことを示した。有限温度では、格子サイズの制限により明確な結論は得られなかったが、少なくとも臨界温度の 1.4 倍の温度まで、 J/ψ などが消失する兆候は確認できなかった (論文 15)。

(4) 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。しかし、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。そのような困難を克服すべく、宇川、藏増らは、符号問題の解

析的研究を行った。具体的には、クォーク行列式を巻き付き展開法を用いて表すことにより、符号問題の根源である複素位相を解析的に表現し、さらに重質量展開法を適用することによって位相の上限値が格子の空間体積に比例し、時間方向の伸張とともに指数関数的に抑制されることを見出した。この解析的結果を検証するために、格子サイズ $6^3 \times N_T$ の 4 フレーバー QCD において N_T を変えることにより、位相がどのように変化するかを調べた結果が図 6 にまとめられている。化学ポテンシャル μ を固定すれば、 N_T を大きくするほど位相 θ の大きさが小さくなることを見て取れる (論文 46)。今後、巻き付き展開法を用いて相転移のオーダーパラメータであるクォーク数密度を計算し、相転移の次数や相転移温度を決定する計画である。

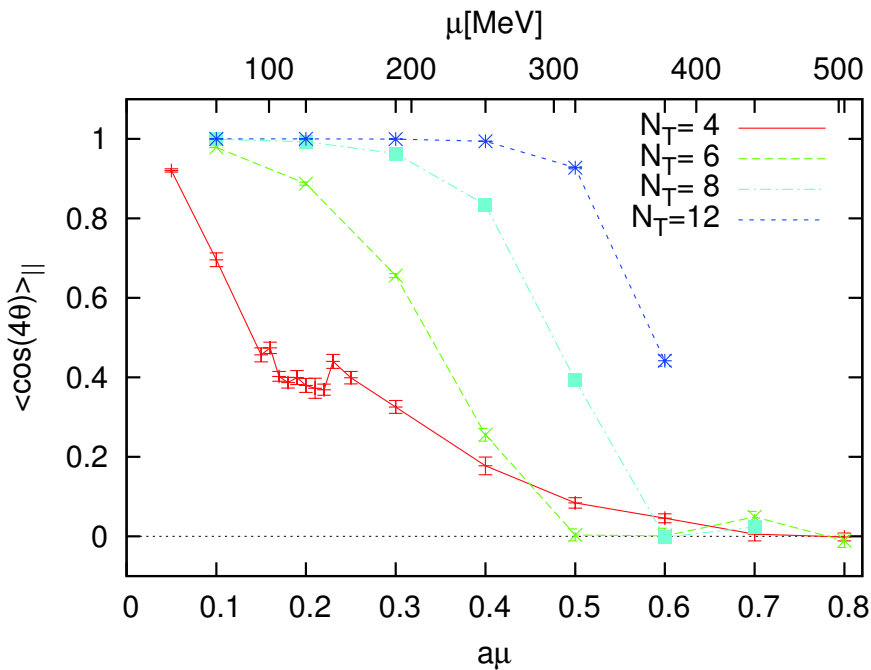


図 6: 4 フレーバー QCD における位相の化学ポテンシャル依存性。

(5) 繰り込み定数と改良係数の決定

$K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊過程の行列要素を繰り込むために必要な繰り込み定数を、Iwasaki gauge action と clover 項により改良された Wilson fermion action の組み合わせについて計算した (論文 37,49)。

次世代の京コンピューターにおける数値計算で採用すべき action のパラメータ探索の一環として、smeared link を用いた Wilson fermion action において、clover 項の改良パラメータ c_{sw} の決定を行った。今回は手始めとして、smearing の回数は一回で、smearing parameter は $\rho = 0.1, 0.2$ を採用した (図 7)。

(6) カイラル対称性を持つクォーク作用を用いた QCD (JLQCD Collaboration)

JLQCD Collaboration は、格子上で厳密なカイラル対称性を持つオーバーラップ・フェルミオンを力学的クォーク作用に用いた $N_f = 2$ 格子 QCD と $N_f = 2+1$

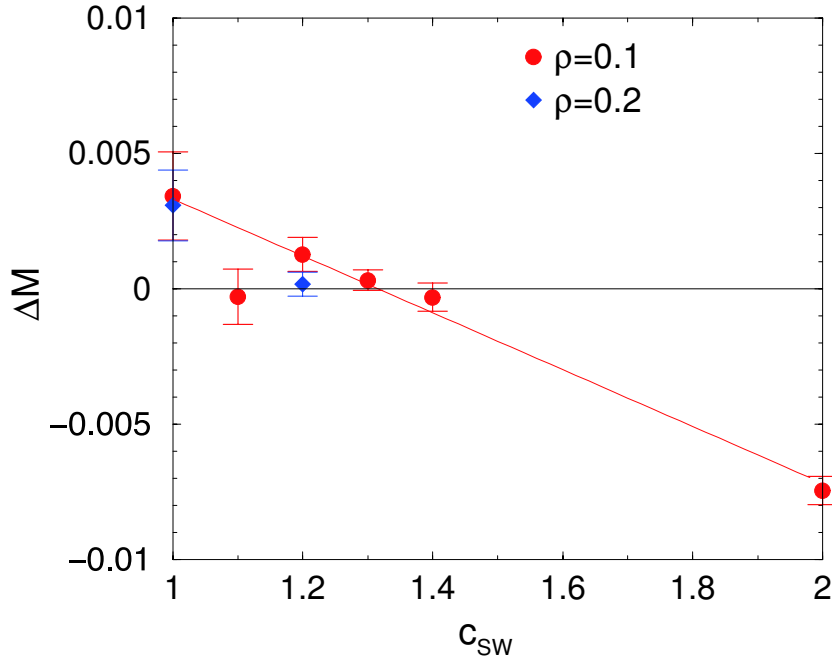


図 7: 改良パラメータ c_{SW} の決定。 $\Delta M = 0$ となる点として c_{SW} を求める。

格子 QCD でゲージ配位を生成し、それを用いて、パイ中間子の形状因子の計算 (論文 2)、核子中のストレンジクォークの成分量の決定 (論文 6)、カイラル凝縮の決定 (論文 20) などを行った。また、有限温度相転移に対するトポロジーを固定した影響を調べた (論文 31)。

(7) ILDG/JLDG の構築と運用

国内の格子 QCD 研究者のデータグリッド Japan Lattice Data Grid (JLDG) の利便性・可用性の向上のため、吉江、浮田らは、以下の改良を行った。(1) 既設拠点のサーバ増設 (筑波大、KEK、大阪大、広島大)、(2) 拠点の新設 (東京大、名古屋大)、(3) JLDG ファイルシステムマウント機能の実装 (筑波大)、(4) 管理機器の 2 重化、(5) 管理・運用・保守マニュアルの作成 (外注)。

HPCI 戦略プログラム分野 5 の研究の一部として推進している格子 QCD 共通コード開発と ILDG(International Lattice Data Grid) の連携に関し、次の検討を行った。(1) ILDG フォーマットの配位入出力、(2) エジンバラ大学と共同で開発した Metadata Capture システムの利用

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論と次元正則化

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。昨年度までの研究で、石橋は馬場・村上とともに、弦理論に次元正則化を適用することが出来ることを見出した。この次元正則化を用いて光円錐ゲージの超弦の場の理論の散乱振幅を計算し、全ての外線がボゾンの場合の tree 振幅について、コンタクトタームの問題を解決できることを示した。(論文 50,51)

今年度の研究では、これらの結果を外線にフェルミオンを含む場合について拡張し、次元正則化を用いれば全ての tree 振幅についてコンタクトタームの問題を解決できることを示した(論文 54)。

コンタクトタームの問題は、Witten 型の開弦の場の理論の場合にも存在する。石橋は村上(岡山光量子研)とともに、次元正則化を Witten 型の開弦の場の理論にも適用できることを示した(論文 57)。

(2) 重力理論／ゲージ理論双対性と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、強結合における 4 次元超対称ゲージ理論の散乱振幅／光的な経路からなるウィルソンループは、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。

佐藤は初田(京都大基礎物理学研究所)、伊藤(東京工業大)、酒井(京都大基礎物理学研究所)と共に、このような極小曲面が homogeneous sine-Gordon 模型と呼ばれる 2 次元可解模型の熱力学的ベーテ方程式で記述されることを示した。また、このような 4 次元超対称ゲージ理論と 2 次元可解模型の対応に基づき、強結合 6 点散乱振幅／光的ウィルソンループに対する正多角形ウィルソンループ周りの解析的な展開式を導いた(論文 52)。

さらに、 g -関数(境界エントロピー)とスペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比(Y -関数)の関係をを用いることにより、運動量が 2 次元空間に制限される場合の $2n$ 点振幅に対して、正多角形ウィルソンループ周りの解析的展開式が得られることを示した。この結果を 2 ループの摂動計算と比べることにより、適切に規格化された散乱振幅／ウィルソンループの展開式が、強結合側と摂動論側で非常に近いことも明らかにした。この結果は、超対称ゲージ理論の散乱振幅／ウィルソンループを統制する未知の機構の可能性を示唆している(論文 53,55)。

(3) 弦理論における共形界面

共形場理論において、共形不変性を保つ世界面中の界面／欠陥は共形界面と呼ばれる。共形界面は、弦理論のソリトン(D ブレイン)や境界のある物性系を記述する共形境界の自然な拡張であり、弦理論や物性系の研究で興味深い役割を果たすと期待される。しかしながら、共形界面を弦理論に埋め込む際には、ユニタリ性の問題が生じる可能性が指摘されていた。

佐藤は、物理的な空間でのユニタリ性が明白な Green-Schwarz 形式を用いて、共形界面に対応する、超対称性を保つ界面をタイプ II 超弦理論において構成した。その結果、この界面が T-双対性を生成し T-双対性の Buscher 則を再現すること、界面が D ブレインの空間に作用し D ブレインの変換を引き起こすことを示した。また、界面による Casimir エネルギーを求めた (論文 56)。

【3】 高エネルギー・ハドロン物理

(八田佳孝、西山陽大)

(1) 高エネルギー重イオン衝突直後の時間発展

重イオン衝突で生成されるグルオン物質がどのように熱平衡に達するかはクォークグルオンプラズマ物理の最重要問題の一つである。八田と西山はカラーグラス凝縮に基づいた初期条件から出発し、2 粒子既約形式 (2PI formalism) を用いることによって古典場と量子揺らぎの結合した方程式系を導いた (論文 62)。これは従来の古典統計近似と異なり、ボーズアインシュタイン分布を持つ量子熱平衡を実現することができる。

(2) 陽子スピンの分解

陽子のスピン 2 分の 1 がクォークとグルオンのヘリシティと軌道角運動量にどのように分解されるのかは QCD の基本的な問題の一つである。ところが角運動量各成分の演算子による定義に関してさまざまな問題が知られており、満足のいく分解はなかった。これに対して数年前に Chen たちのグループが全く新しい分解方法を提案した。八田は彼らの方法を拡張し、まず Chen たちのグルオンヘリシティが実験で測られる ΔG と同定できることを示し (論文 59)、軌道角運動量演算子のゲージ不変かつ交換関係を満たす定義を導いた (論文 63)。

(3) 陽子衝突による楕円形フロー

LHC の陽子衝突実験において、終状態の生成粒子数が原子核衝突に匹敵するほど高いイベントが観測された。このようなイベントでは、原子核衝突でみられるような生成粒子の集団的振る舞いが起こることが期待されている。八田は Avsar, Flensburg, Ollitrault, 植田らとともに、RHIC でよく知られる楕円形フローと呼ばれる集団運動が陽子衝突で起こる可能性を研究した。BFKL 発展を組み込む最先端のイベントジェネレーター (DIPSY) を用いて衝突のシミュレーションを行い、衝突時における eccentricity と楕円形フローの大きさを評価した。さらに実験での観測可能性として、4 粒子角度相関を見ることを提案した (論文 60)。

(4) 高エネルギー重イオン衝突実験で発生したグルオン場の熱化過程

RHIC 及び LHC の高エネルギー重イオン衝突実験で発生したグルオン場の熱化に至る過程では、Boltzmann 方程式による理論が流体模型の初期条件と矛盾しており、単純なパートン描像に基づくアプローチを超えた手段が必要とされ

ている。そこで西山らは、場の量子論に基づくアプローチとして、Kadanoff-Baym(KB) 方程式に代表される方法を提案した。まず、スカラー $O(N)$ 模型において Kadanoff-Baym 方程式を解き、エントロピー生成と熱平衡化が実現することを数値計算で確かめた (論文 58)。

次にゲージ理論において、膨張のない系で KB 方程式を解き、熱平衡化過程を追跡した。そこでは、熱化の時間スケールが流体模型の初期条件と矛盾しないという結果を得た。

〈論文〉

1. Oanh Hoang Nguyen, Ken-Ichi Ishikawa, Akira Ukawa, Naoya Ukita, Electromagnetic form factor of pion from $N_f = 2 + 1$ dynamical flavor QCD, JHEP 1104 (2011) ref.122, pp.1-23
2. JLQCD and TWQCD Collaborations: H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi and N. Yamada, Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice, Phys. Rev. D 83, No.7 (2011) ref.074501, pp.1-16
3. HAL QCD Collaboration: Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki, Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) ref.162002, pp.1-4
4. N. Ishii, Nuclear forces from lattice QCD, AIP Conf. Proc. 1355 (2011) 206-213
5. Kazuyuki Kanaya, Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite temperature, AIP Conference Proceedings 1343 (2011) 57-62
6. JLQCD collaboration: K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki and T. Onogi, Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry, Phys. Rev. D 83, No.11 (2011) ref.114506, pp.1-14
7. Keiko Murano, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Nucleon-Nucleon Potential and its Non-locality in Lattice QCD, Prog. Theor. Phys. 125, No.6 (2011) 1225-1240
8. Sinya Aoki and Hidenori Fukaya, Interpolation between the ϵ and p regimes, Phys. Rev. D 84, No.1 (2011) ref.014501, pp.1-27
9. HAL QCD Collaboration: Sinya Aoki, Noriyoshi Ishii, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura,

- Kenji Sasaki, Extraction of Hadron Interactions above Inelastic Threshold in Lattice QCD, Proc. Jpn. Acad., Ser.B 87, No.8 (2011) 509-571
10. WHOT-QCD Collaboration: H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, T. Umeda, Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark region, Phys. Rev. D 84, No.5 (2011) ref.054502, pp.1-9
 11. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, for the PACS-CS Collaboration, Two-Nucleon Bound States in Quenched Lattice QCD, Phys. Rev. D 84, No.5 (2011) ref.054506, pp.1-14
 12. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, for PACS-CS Collaboration, Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD, AIP Conf. Proc. 1374 (2011) 627-630
 13. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 84, No.7 (2011) ref.074505, pp.1-11
 14. Sinya Aoki, for HAL QCD Collaboration, Hadron interactions in lattice QCD, Progress in Particle and Nuclear Physics 66, No.4 (2011) 687-726
 15. WHOT-QCD Collaboration: H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito and T. Umeda, Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD, Phys. Rev. D 84, No.9 (2011) ref.094504, pp.1-13
 16. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, ρ Meson Decay in 2+1 Flavor Lattice QCD, Phys. Rev. D 84, No.9 (2011) ref.094505, pp.1-12
 17. Takashi Inoue, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura and Kanji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Two-Baryon Potentials and H-Dibaryon from 3-flavor Lattice QCD Simulations, Nucl. Phys. A 881 (2012) 28-43
 18. Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, T. Sakurai, H. Tadano, Modified Block BiCGSTAB for Lattice QCD, Comput. Phys. Commun. 183, No.1 (2012) 34-37
 19. Taro Kimura, Shota Komatsu, Tatsuhiro Misumi, Toshifumi Noumi, Shingo Torii, Sinya Aoki, Revisiting symmetries of lattice fermions via spin-flavor representation, JHEP 1201 (2012) ref.048, pp.1

20. JLQCD Collaboration: H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, Chiral interpolation in a finite volume, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.101, pp.1-7
21. Takashi Inoue, for HAL QCD Collaboration, Bound H-dibaryon from Full QCD Simulations on the Lattice, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.124, pp.1-7
22. N. Ishizuka, for PACS-CS Collaboration, ρ meson decay width from 2+1 flavor lattice QCD, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.125, pp.1-7
23. Y. Namekawa, for the PACS-CS collaboration, Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.132, pp.1-7
24. N. Ukita, for the PACS-CS Collaboration, 1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.144, pp.1-7
25. T. Yamazaki, for the PACS-CS Collaboration, Bound state of two-nucleon systems in quenched lattice QCD, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.147, pp.1-7
26. Takumi Doi, for HAL QCD Collaboration, Three-Nucleon Forces explored by Lattice QCD Simulations, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.151, pp.1-7
27. Yoichi Ikeda, for HAL QCD Collaboration, S-wave meson-baryon potentials with strangeness from Lattice QCD, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.159, pp.1-7
28. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, Time-dependent effective Schroedinger equation for lattice nuclear potentials , PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.160, pp.1-7
29. Hidekatsu Nemura, for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon interaction of strangeness $S = -1$ sector, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.167, pp.1-7
30. K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Strangeness $S = -2$ baryon-baryon interactions from lattice QCD, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.173, pp.1-7
31. Guido Cossu, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Hideo Matsufuru, Jun-ichi Noaki, Eigo Shintani, Topological susceptibility and axial symmetry at finite temperature, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.188, pp.1-7
32. WHOT-QCD collaboration: Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, H. Saito, T. Hatsuda, T. Umeda, Histogram method in finite density QCD with phase quenched simulations, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.208, pp.1-7

33. H. Ohno, U.M. Heller, F. Karsch, S. Mukherjee, Eigenvalue distribution of the Dirac operator at finite temperature with (2+1)-flavor dynamical quarks using the HISQ action, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.210, pp.1-7
34. WHOT-QCD collaboration: H. Saito, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, Y. Nakagawa, T. Hatsuda, T. Umeda, Finite density QCD phase transition in the heavy quark region, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.214, pp.1-7
35. JLQCD Collaboration: T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, Kaon semileptonic form factors in QCD with exact chiral symmetry, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.284, pp.1-7
36. Keiko Murano, for the HALQCD Collaboration, Nuclear forces in the parity odd sector and the LS forces, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.319, pp.1-7
37. Yusuke Taniguchi, Renormalization factor of four fermi operators with clover fermion and Iwasaki gauge action, PoS (LATTICE 2011) (2012) ref.331, pp.1-7
38. WHOT-QCD collaboration: S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, T. Umeda, Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method, Cent. Eur. J. Phys. CPOD 2011 (2012) 1-4
39. HAL QCD Collaboration: Takumi Doi, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki, Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD, Prog. Theor. Phys. 127, No.4 (2012) 723-738
40. Takumi Doi for HAL QCD Collaboration, Exploring Three Nucleon Forces in Lattice QCD, AIP Conf. Proc. 1388 (2011) 636-639
41. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, Equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Phys. Rev. D (2012) in printing
42. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久, スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションの最適化, 情報処理学会研究報告 2011-HPC-130(58) (2011) 1-6
43. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久, スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションの自動化, 2012年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2012) 論文集 (2012) 7-14
44. Satoru Ueda and Sinya Aoki, Chiral perturbation theory for twisted mass QCD at small quark mass, arXiv:1109.0073

45. Takashi Inoue, for HAL QCD Collaboration, Bound H-dibaryon in the Flavor SU(3) Limit from a Full QCD Simulation on the Lattice, arXiv:1109.1620, to be published in the proceedings of PANIC 2011
46. Shinji Takeda, Yoshinobu Kuramashi and Akira Ukawa, On the phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential, arXiv:1111.6363
47. Sinya Aoki, Janos Balog and Peter Weisz, Short distance repulsion in 3 nucleon forces from perturbative QCD, arXiv:1112.2053
48. WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya and H. Ohno, Free energy of static quarks and Debye screening mass in 2+1-flavor lattice QCD with Wilson quark action based on fixed-scale approach, arXiv:1112.2756
49. Yusuke Taniguchi, Perturbative renormalization factors of four-quark operators for improved Wilson fermion action and Iwasaki gauge action, JHEP 1204, ref.143 (2012) pp.1-34
50. N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone Gauge String Field Theory and Dimensional Regularization, Prog. Theor. Phys. Suppl. 188 (2011) 9-18
51. K. Murakami and N. Ishibashi, Amplitudes in Noncritical Dimensions and Dimensional Regularization, Prog. Theor. Phys. Suppl. 188 (2011) 19-28
52. Yuji Satoh, Gauge/string duality and thermodynamic Bethe ansatz equations, RIMS Kokyuroku Bessatsu B28 (2011) 171-192
53. Y. Hatsuda, K. Ito, K. Sakai and Y. Satoh, g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling, JHEP 1104 (2011) ref.100, pp.1-45
54. N. Ishibashi and K. Murakami, Spacetime Fermions in Light-cone Gauge Superstring Field Theory and Dimensional Regularization, JHEP 1107 (2011) ref.090, pp.1-24
55. Y. Hatsuda, K. Ito and Y. Satoh, T-functions and multi-gluon scattering amplitudes, JHEP 1202 (2012) ref.003, pp.1-34
56. Yuji Satoh, On supersymmetric interfaces for string theory, JHEP 1203 (2012) ref.072, pp.1-21
57. N. Ishibashi and K. Murakami, Witten's string field theory in noncritical dimensions,, UTHEP-633.
58. A. Nishiyama and A. Ohnishi, Kadanoff-Baym Approach to Entropy Production in $O(N)$ Theory with Next-to-Leading Order Self-Energy, Prog. Theor. Phys. 126, No.2 (2011) 249-267

59. Y. Hatta, Gluon polarization in the nucleon demystified, Phys. Rev. D 84, No.4 (2011) ref.041701 (R), pp.1-4
60. E. Avsar, C. Flensburg, Y. Hatta, J.-Y. Ollitrault, T. Ueda,, Eccentricity and elliptic flow in proton-proton collisions from parton evolution, Phys. Lett. B 702 (2011) 394-397
61. E. Avsar¹, Y. Hatta, C. Flensburg, J.-Y. Ollitrault and T. Ueda, Eccentricity and elliptic flow in pp collisions at the LHC, J. Phys. G 38, No.12 (2011) ref.124053, pp.1-4
62. Y. Hatta and A. Nishiyama, Towards thermalization in heavy-ion collisions: CGC meets the 2PI formalism, Nucl. Phys. A 873 (2012) 47-67
63. Y. Hatta, Notes on the orbital angular momentum of quarks in the nucleon, Phys. Lett. B 708 (2012) 186-190

〈著書・総説等〉

1. 宇川 彰

岩波講座「計算科学 2 計算と宇宙」第1章「はじめに – 宇宙、天文学における計算の役割とは」、第2章「宇宙の構成要素と宇宙の歴史」岩波書店 (2012)

2. 青木 慎也

岩波講座「計算科学 2 計算と宇宙」第3章「時空格子上のクォークとグルオンからハドロンへ」岩波書店 (2012)

3. 青木 慎也

日本物理学会誌 特集 次世代スーパーコンピュータ「京」：動き出した大型プロジェクトの全体像、「戦略分野5：物質と宇宙の起源と構造 – 分野融合研究を目指して –」, vol.66, No.7 (2011)

〈学位論文〉

[修士論文]

1. 趙 栄貴

「格子ゲージ理論におけるオーバーラップ・フェルミオンの局所性について」

2. 山田 真徳

「Lattice QCD による di- Ω state の存在可能性の探求」

3. 齋藤 華

「スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションにおけるパラメータサーチ」
(デュアル ディグリー プログラム：システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻)

〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. S. Aoki 「Nuclear Force from Quarks and Gluons」 (招待講演) ,
“Japan Days” Colloquium (The 150th anniversary of the Friendship Treaty between Japan and Germany) (Univ. Wuppertal, Wuppertal, Germany , May 2, 2011)
2. Akihiro Nishiyama 「Kadanoff-Baym Theory for Thermalization of Gluonic Matter」 ,
International Conference on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions (Quark Matter 2011) (Annecy, France, May 23-28, 2011)
3. Y. Hatta 「Eccentricity and elliptic flow in pp collisions at the LHC」 ,
International Conference on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions (Quark Matter 2011) (Annecy, France, May 23-28, 2011)
4. Y. Hatta 「Relation between e^+e^- annihilation and high energy scattering」 (招待講演) ,
ECT* workshop (Trento, Italy, May 30-June 2, 2011)
5. H. Ohno 「A variational study on charmonia at finite temperature in lattice QCD」 (招待講演) ,
Workshop on ”Quarkonium Production in Elementary and Heavy Ion Collisions” (Brookhaven National Laboratory, NY, USA, June 6-18, 2011)
6. Yuji Satoh 「g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling」 ,
35th Johns Hopkins workshop on AdS/CFT and its applications (Eotvos University, Budapest, Hungary, June 22-24, 2011)
7. H. Ohno 「Eigenvalue distribution of the Dirac operator at finite temperature with (2+1)-flavor dynamical quarks using the HISQ action」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011) (The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
8. H. Saito 「Finite density QCD phase transition in the heavy quark mass region」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011) (The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, July 11-16, 2011)

9. N. Ukita 「1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011)
(The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
10. Y. Namekawa 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011)
(The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
11. N. Ishizuka 「Rho meson decay width from 2+1 flavor lattice QCD」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011)
(The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
12. K. Sasaki (for HAL QCD Collaboration) 「Strangeness S=-2 baryon-bayon interactions from lattice QCD」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011)
(The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
13. Y. Taniguchi 「Renormalization factor of four fermi operators with clover fermion and Iwasaki gauge action」 ,
The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2011)
(The Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, Jul. 11-16, 2011)
14. K. Kanaya 「Phase Structure of QCD from the Lattice」 (招待講演) ,
International Workshop on Extreme QCD 2011 (XQCD 2011) (San Carlos, Mexico, July 18-20, 2011)
15. H. Saito 「Density of state method in heavy quark region at finite chemical potential」 ,
International Workshop on Extreme QCD 2011 (XQCD 2011) (San Carlos, Mexico, July 18-20, 2011)
16. Yuji Satoh 「Thermodynamic Bethe ansatz and analytic expansions of gluon scattering amplitudes at strong coupling」 ,
8th Bologna workshop on CFT and integrable models (Bologna University, Bologna, Italy, Sept. 12-15, 2011)
17. Nobuyuki Ishibashi 「Dimensional regularization of Witten's OSFT」 ,
String Field Theory 2011 (Conference Center Vila Lanna of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic, Sept. 20-24, 2011)
18. T. Yoshie 「Status Report: JLDG」 ,
17thILDG workshop, (TV conference hosted by INFN, Italy, Sept. 23, 2011)
19. Y. Hatta 「Eccentricity and elliptic flow in pp collisions at the LHC」 ,
ISMD 2011 (宮島柱の宿, 広島, Sept. 26-30, 2011)

20. S. Aoki 「Lattice QCD with Wilson quarks and chiral perturbation theory—From introduction to recent topics—」 (招待講演) ,
ECT* Workshop “Chiral dynamics with Wilson fermions” (ECT*, Toronto, Italy, Oct. 24-28, 2011)
21. Y. Hatta 「Jets at strong coupling」 (招待講演) ,
2nd Workshop on Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - Lattice QCD, Holography, Topology, and Physics at RHIC/LHC (慶応義塾大学 (日吉), 神奈川, Nov. 17-18, 2011)
22. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD」 ,
“Hadron Structure and Interactions” (RCNP, Osaka, Japan, Nov. 25-26, 2011)
23. Y. Hatta 「Towards thermalization in heavy-ion collisions」 (招待講演) ,
EMMI rapid reaction task force on Thermalization in non-abelian plasmas (Heidelberg, Germany, Dec. 12-14, 2011)
24. Y. Hatta 「Angular momentum in QCD」 (招待講演) ,
INT workshop “Orbital angular momentum in QCD” (Seattle, USA, Feb.6-17, 2012)
25. S. Aoki 「Future prospect of hadron physics from lattice QCD」 (招待講演) ,
Workshop on 'Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics' (Ibaraki Quantum Beam Research Center, Tokai, Japan, Feb. 9-11, 2012)
26. S. Aoki 「Chiral Symmetry and eigenvalue density at Finite temperature」 (招待講演) ,
YIPQS-HPCI international molecule-type workshop on New-type of Fermions on the Lattice (京都大学基礎物理学研究所, 京都, Feb. 9-24, 2012)
27. H. Ohno 「Dirac Eigenvalue distribution at finite temperature with (2+1)-flavor dynamical quarks using the HISQ action」 ,
XLIII. Arbeitstreffen Kernphysik (Schleching, Germany, Feb. 16-23, 2012)
28. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD」 ,
Workshop on “Elucidation of New Hadrons with a Variety of Flavors” (Osaka University, Osaka, Japan, Feb. 20-21, 2012)

[国内学会、研究会]

1. 佐藤 勇二 「g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling」 (招待講演) ,
第6回 日露ワーキングセミナー (東京工業大学, 東京, May 12, 2011)

2. 吉江 友照 「計算素粒子物理学データグリッド JLDG」,
gfarm セミナー (N T T コミュニケーションズプレゼンテーションルーム, June
20, 2011)
3. 滑川 裕介 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice
QCD」,
新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会 (理化学
研究所計算科学研究機構, 神戸市, June 23-24, 2011)
4. 石塚 成人 「格子上のハドロン散乱」,
新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会 (理化学
研究所計算科学研究機構, 神戸市, June 23-24, 2011)
5. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration) 「チャンネル結合を考慮した格子
QCD によるハイペロン間相互作用」,
新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会 (理化学
研究所計算科学研究機構, 神戸市, June 23-24, 2011)
6. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration) 「格子 QCD による一般化核力の
研究」,
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 (秋
葉原コンベンションホール, July 27-29, 2011)
7. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久 「スクリプト言語 Xcrypt によ
る格子 QCD シミュレーションの最適化」,
2011 年並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2011)
(かごしま県民交流センター, 鹿児島, July 27-29, 2011)
8. 西山 陽大, 八田 佳孝 「Kadanoff-Baym Approach to Thermalization of Gluonic
Matter」,
基研研究会 熱場の量子論とその応用 2 0 1 1 (京都大学基礎物理学研究所, 京
都, Aug. 22-24, 2011)
9. 八田 佳孝 「グルオンプラズマの非平衡発展について」,
基研研究会 熱場の量子論とその応用 2 0 1 1 (京都大学基礎物理学研究所, 京
都, Aug. 22-24, 2011)
10. 金谷 和至 「CP-PACS プロジェクトについて ～計算科学専用計算機開発に
おける物理屋の役割～」(招待講演),
三好甫先生記念計算科学シンポジウム (工学院大学新宿キャンパス, 東京, Sept.
10, 2011)
11. 藏増 嘉伸 「PACS-CS における素粒子物理学研究」(招待講演),
第 2 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム (筑
波大学, つくば市, Sept. 12-13, 2011)

12. 土井 琢身 「Exploring Three Nucleon Forces in Lattice QCD」 ,
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学, 青森, Sept.16-19, 2011)
13. 石塚 成人 for PACS-CS Collaboration 「Rho meson decay from lattice QCD」 ,
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学, 青森, Sept.16-19, 2011)
14. 滑川 裕介 for PACS-CS collaboration 「物理点における 2+1 フレーバー格子
QCD シミュレーションによるチャームクォーク系の研究」 ,
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学, 青森, Sept.16-19, 2011)
15. 齋藤 華 for WHOT-QCD Collaboration 「クォーク質量が大きい領域での有限
密度 QGP 相転移」 ,
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学, 青森, Sept.16-19, 2011)
16. 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration 「Lattice QCD study of baryon-
baryon interaction with strangeness $S=-2$ 」 ,
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学, 青森, Sept.16-19, 2011)
17. 藏増 嘉伸 「基礎科学分野実問題における固有値解析エンジンの高性能利用技
術開発」 ,
並列固有値解析研究会 (伊香保温泉旅館 よろこびの宿 しん喜, 群馬県, Nov.
3-4, 2011)
18. 滑川 裕介 「Charm quark physics from lattice QCD」 ,
素核融合による計算基礎物理学の進展 (合歓の郷, 志摩市, 三重県, Dec. 3-5,
2011)
19. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration) 「Lattice QCD studies of strangeness
 $S=-2$ baryon-bayon interactions」 ,
素核融合による計算基礎物理学の進展 (合歓の郷, 志摩市, 三重県, Dec. 3-5,
2011)
20. 吉江 友照 「HEPnet-J/sc 報告」 ,
HEPnet-J ユーザー会 (近畿大学, Dec. 17-18, 2011)
21. 滑川 裕介 「Charm quark physics from lattice QCD」 ,
HPCI 研究会 「計数的手法による素粒子論研究の広がり」 (高エネルギー加速
器研究機構, つくば, Dec. 19-21, 2011)
22. 谷口 裕介 「Renormalization factor of four fermi operators with clover fermion
and Iwasaki gauge action」 ,
HPCI 研究会 「計数的手法による素粒子論研究の広がり」 (高エネルギー加速
器研究機構, つくば, Dec. 19-21, 2011)
23. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久 「スクリプト言語 Xcrypt に
よる格子 QCD シミュレーションの自動化」 ,

2012年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2012)
(名古屋大学, 名古屋, 愛知, Jan. 24-26, 2012)

24. 藏増 嘉伸 「格子 QCD による原子核の構成」 (招待講演) ,
研究会「大規模計算による原子核研究の展開 -核子多体系を中心に-」 (理
研, 和光市, Jan. 24-25, 2012)
25. 西山 陽大 「Thermalization of Gluonic Matter with the Kadanoff-Baym Ap-
proach」 ,
重イオン衝突と非平衡物理の理論的発展 (理研、和光, Feb. 18, 2012)
26. Yong-Gwi Cho, Shoji Hashimoto 「Locality of overlap fermions with fixed
topology」 ,
mini-workshop on New-type of Fermions on the Lattice (京都大学基礎物理学
研究所, Feb. 17, 2012)
27. 藏増 嘉伸 「大規模格子 QCD シミュレーションで探る 10^{-13}cm 」 (招待講演) ,
第 4 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (シーサイドホテル
舞子ビラ神戸, 神戸市, Mar. 3-5, 2012)
28. 吉江 友照 「格子 QCD データグリッド JLDG」 ,
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 (秋
葉原コンベンションホール, Mar. 7-8, 2012)
29. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration), 「格子 QCD による一般化核力の
研究」 ,
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 (秋
葉原コンベンションホール, Mar. 7-8, 2012)
30. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD」 ,
KEK Flavor Factory Workshop (KEK, Tsukuba, Japan, Mar. 8-10, 2012)
31. 大野 浩史 「2 + 1 フレーバー有限温度格子 QCD によるディラック固有値分布
の研究」 ,
日本物理学会 第 6 7 回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)
32. 齋藤 華 「クォーク質量が大きい領域での有限密度 QCD 相転移と複素位相の
効果」 ,
日本物理学会 第 6 7 回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)
33. 中川 義之 「ヒストグラム法を用いた格子計算による有限密度 QCD の研究」 ,
日本物理学会 第 6 7 回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)
34. 八田 佳孝 「陽子スピンの分解について:グルオン偏極と軌道角運動量」 ,
日本物理学会 第 6 7 回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)

35. 青木 慎也 「格子場計算共通コードシステムの開発と現状」,
日本物理学会 第67回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)
36. 西山 陽大 「Kadanoff-Baym theory for thermalization of gluonic matter II」,
日本物理学会 第67回年次大会 (関西学院大学、西宮, Mar. 24-27, 2012)

〈受賞〉

1. 青木慎也、初田哲男、石井理修：
日本物理学会第17回論文賞 (2012年3月26日)、「Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations」, Prog. Theor. Phys. 123 (2010) 89-128 (arXiv:0909.5585[hep-lat])
2. 岩崎洋一前学長・筑波大学名誉教授：
2011年度素粒子メダル功労賞 (2011年9月)、「計算素粒子物理学の開拓」による。

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 青木慎也 他,
新学術領域「素核宇宙融合」x「新ハドロン」クロスオーバー研究会 -多様な方法でせまるハドロン物理への挑戦- 主催
2011年6月23、24日、理化学研究所 計算科学研究機構、神戸 (参加者約60名)
2. 青木慎也 他,
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」/ H P C I戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」/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-,
2011年8月4日-8日、京都大学 基礎物理学研究所、京都 (参加者約35名)
3. 金谷和至 他,
国際シンポジウム「Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - Lattice QCD, Holography, Topology, and Physics at RHIC/LHC -」
2011年11月17-18日、慶應義塾大学 来往舎 (参加者 38名)
4. 青木慎也 他,
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」/ H P C I戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」主催シンポジウム「素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展 -マイクロとマクロのかけ橋の構築-」
2011年12月3日-5日、合歓の郷、志摩 (参加者約60名)

5. 蔵増嘉伸 他,
新学術領域研究「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」レクチャーシリーズの主催
第三回 2011年6月8-9日、東京大学 理学部, 東京 (参加者約40名)
第四回 2012年1月11-12日 京都大学 基礎物理学研究所, 京都 (参加者約30名)
第五回 2012年2月27-28日 理化学研究所 仁科加速器研究センター、和光 (参加者約20名)
6. 青木慎也 他,
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,
2012年3月7、8日、秋葉原コンベンションホール、東京 (参加者約60名)

〈国内外の共同組織への参加〉

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>

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	倉田 正和, 永井 康一
科研費研究員	三宅 秀樹, 永井 義一
大学院生	18 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は検討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 実験が継続されてきたが, 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。

1996年に前回の物理実験 Run I が終了した後, テバトロン加速器および CDF 検出器は大幅な増強が行われ, 2001年6月より本格的に物理データの収集 Run II を開始した。テバトロン加速器の瞬間ルミノシティは最高値 $\mathcal{L} = 4.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成し設計値 $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を大きく上回った。また, 週毎の積分ルミノシティも最大で 73 pb^{-1} , 全積分ルミノシティは 12 fb^{-1} に達した。CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である。また, テバトロン加速器の重心系エネルギーは 1.8 TeV から 1.96 TeV に増強され, 検出器も改良・増強の結果, 検出効率が向上した。このため, データ量の増大のみならず, 単位積分ルミノシティあたりの有効観測事象数の増加も得られている。

筑波大学グループでは, Run II 用 CDF 検出器に関してシリコン飛跡検出器, 端冠部カロリメータ, 飛行時間検出器, 中央部プリシャワー検出器, およびデータ収集システムの建設・調整・運転を行ってきた。これらの検出器は順調に稼働しており, 物理解析に使用されている。

以下には, Run II 実験でこれまでに得られた物理解析の結果および今後期待される成果について主なものを記す。

(1) 電弱相互作用の物理

電弱相互作用は電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に記述する。弱い相互作用を媒介する W ボソンはおよそ $80 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つが, Run-II 実験で得られた 2.2 fb^{-1} 相当のデータを用いてその精密測定がなされた。図1に電子およびミュー粒子への崩壊様式を用い

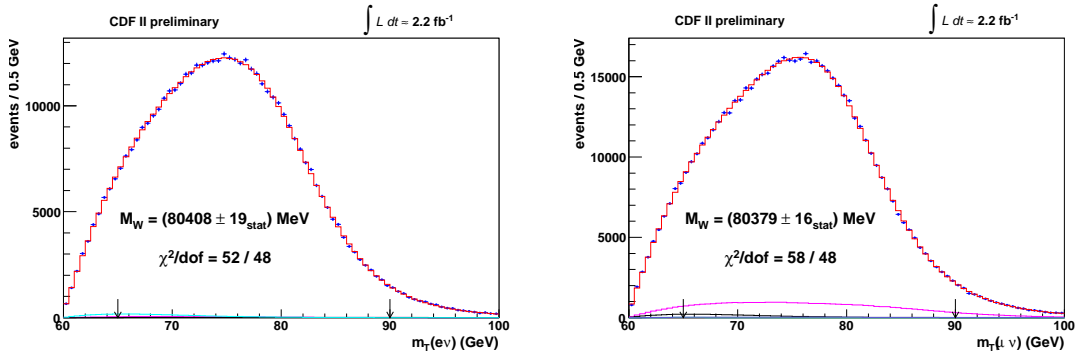


図 1: W ボソンの横質量分布, 電子 (左) およびミュー粒子 (右) への崩壊様式.

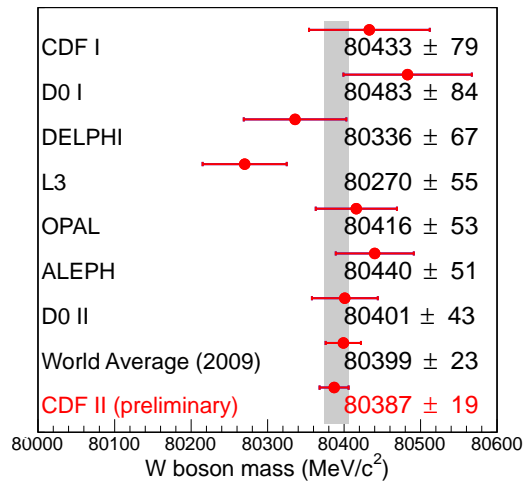


図 2: W ボソンの質量測定の一覧.

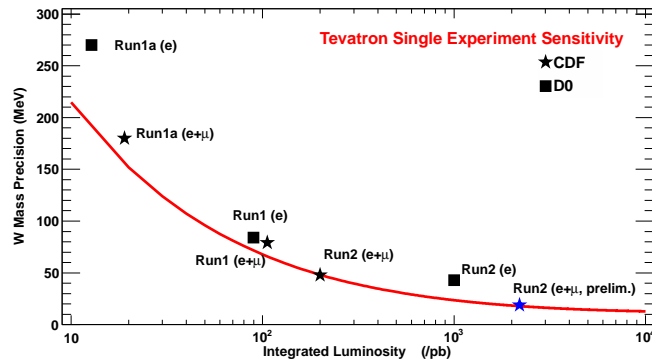


図 3: W ボソンの質量測定の精度の変遷.

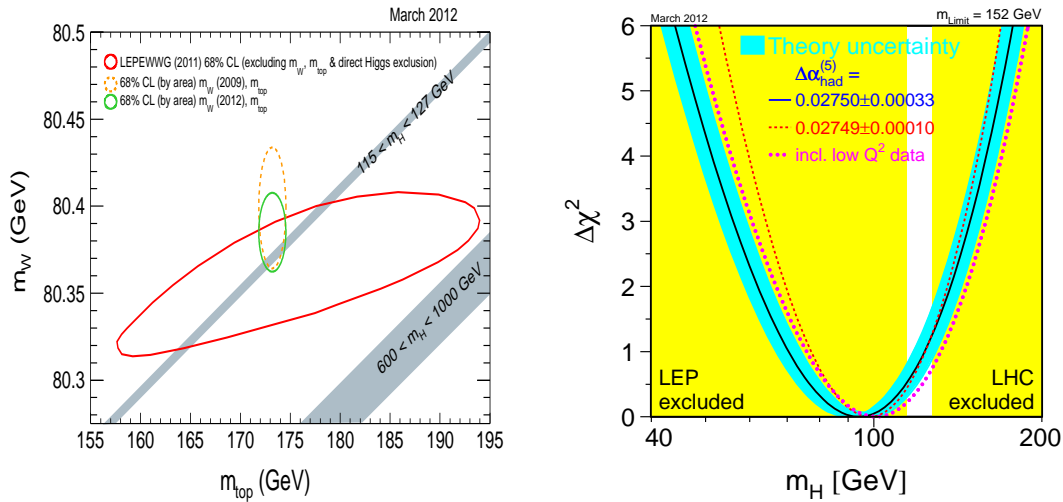


図 4: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

て再構成された W ボソンの横質量分布を示す. 候補事象数はそれぞれ 470 k, 624 k である. 質量は $m_W = 80.387 \pm 0.019 \text{ GeV}/c^2$ と決定された. 図 2 に, 測定の一覧を示す. 今回の測定は, 単独の測定でこれまでの世界平均の精度 ($\pm 23 \text{ MeV}/c^2$) を上回るものである. また, W ボソン質量測定の変遷を図 3 に示す. W ボソンとトップ・クォークの質量の精密測定は, ヒッグス粒子の質量についての制限を与える. これについては後述する.

(2) トップクォークの物理

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見後十年以上が経過し, 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・反クォーク衝突を素過程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 (レプトン+ジェットチャンネル) は, 崩壊分岐比および信号・雑音比がともに高く, 精度の良い測定が可能である. 8.7 fb^{-1} 相当のデータを用いて, $m_{\text{top}} = 172.8 \pm 0.5$ (統計) ± 0.5 (ジェットエネルギー) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 という結果を得た. CDF 実験の平均値は $m_{\text{top}} = 172.7 \pm 0.6$ (統計) ± 0.9 (系統) GeV/c^2 であり, 他実験も含むすべての測定の平均値は $173.2 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ GeV}/c^2$ である. トップクォークの質量と W ボソンの質量をともに測定することにより, ヒッグス粒子の質量に対する制限を得ることができる. 図 4 にこれを示す. 標準理論ヒッグス粒子の質量について $m_{\text{Higgs}} = 94^{+29}_{-24} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $m_{\text{Higgs}} < 152 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た.

また, トップクォーク対生成機構とスピン偏極度相関の研究を継続して行った. 陽子・反陽子衝突におけるトップクォーク対生成は, クォーク・反クォークを始状態とする素過程とグルオン・グルオンを始状態とするものがある. いずれも強い相互作用による反応であり, 強い相互作用はパリティを保存するので, パートの重心系における t クォークの飛翔方向は, 前後対称性を持つと期待される. これは相互作用の最低次の過程を考える限り真であるが, 実際には, 高次の項との干渉により強い相互作用の標準理論の枠内でも 10% 程度の前後非対称度が現れることが予想される. 標準理論を超える物理で軸性ベクトル結合を含

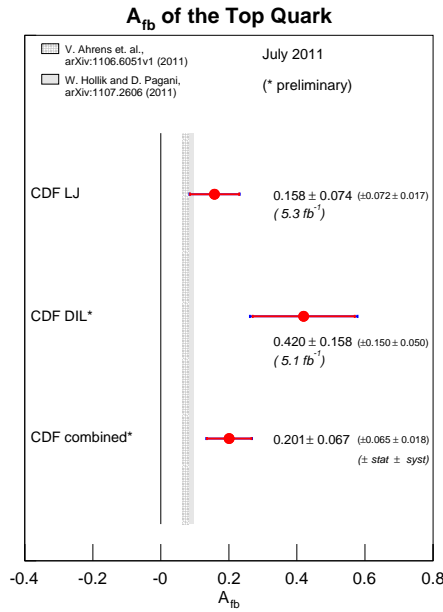


図 5: $t\bar{t}$ 対生成における前後方非対称度の測定.

むような新たな相互作用を考えれば、非対称度は予言と大きく異なる可能性がある。2010 年度には、 5.1 fb^{-1} 相当のデータを解析し、dilepton チャンネルを用いて初めてこの前後方非対称度を測定した。Lepton plus jets チャンネルを用いた測定も同じ傾向を示している。両者を統合すると、 $A_{FB} = +0.201 \pm 0.065 \pm 0.018$ であり、非対称度 0 とは 2.9 標準偏差だけ離れている。図 5 にこれらの結果を示す。新たな物理の兆候を示すものとして興味深い。

また、 5.1 fb^{-1} 相当の dilepton チャンネルのデータを用いて、トップ・反トップ対生成におけるスピン相関を測定し、相関係数 $-0.520 < \kappa < 0.605$ (68% CL) を得た。トップクォークは質量が大きいため、その寿命は 10^{-24} s 程度と予測される。これは、クォークのハドロ化の時間より短く、よって、トップクォークはクォークのまま崩壊すると予測される。その寿命を直接に測定することはきわめて困難あるいは不可能であるが、以上のように対生成におけるスピン相関を観測することにより間接的に検証される。

(3) B 粒子の物理

陽子・反陽子衝突では b クォークの生成率が高いため、その崩壊を効率よく収集することができれば、精度の高い測定が可能となる。CDF Run-II 実験では、Silicon Vertex Trigger (SVT) と呼ばれる装置を導入した結果、 B 粒子やチャーム粒子などの長寿命粒子の崩壊物を選択的に効率よく収集することが可能となった。

クォークの種類を変える中性流による稀崩壊 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ は、Belle 実験が標準理論を超える新物理の兆候を観測するなど、注目を集めている。CDF 実験では 2011 年度に、より多くのデータの解析と、信号再構成のための新たなトリガーと崩壊様式を用いることにより、新たな結果を得た。 b クォークを含むバリオン Λ_b^0 の崩壊 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$ が初めて観測され、また崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ が高統計で再構成された。図 6 に、これらの信号を示す。崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ は、偏極度およびレプトン角分布の前後方非対称度

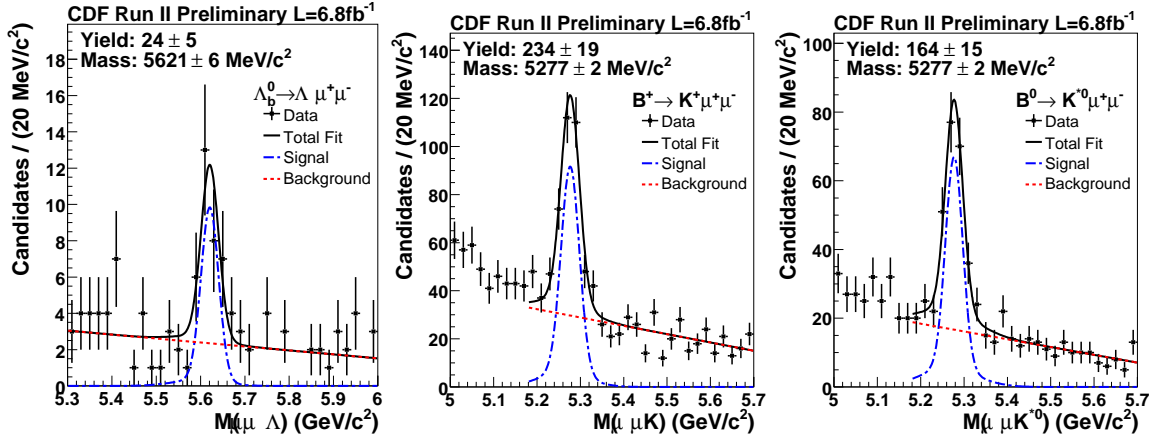


図 6: B ハドロンの稀崩壊 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$, $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ の信号.

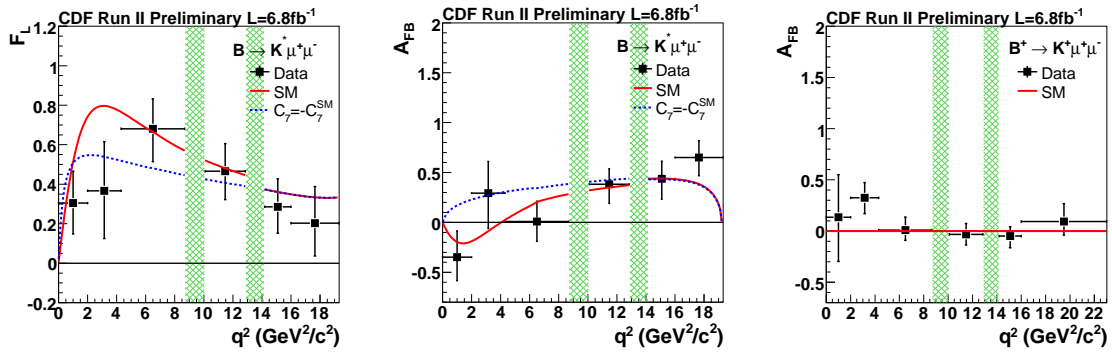


図 7: 左, 中: 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定. 右: 崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ におけるレプトン前後方非対称度の測定. 分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている.

が新物理の探索に感度を持つ. 図 7 にその結果を示す. Belle 実験と同程度の精度が得られており, 結果は標準理論および新物理とともに矛盾しない.

(4) 新粒子の探索

ヒッグス粒子の探索が種々の過程を用いてなされた. テバトロンでのヒッグス粒子は, 素過程 $gg \rightarrow H$ による単一生成と弱ゲージボソン W^\pm, Z^0 との随伴生成が主である. 質量が軽い場合 (およそ $120 \text{ GeV}/c^2$ 以下) は $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊がほとんどであり, 重い場合には弱ゲージボソン対 W^+W^- および Z^0Z^0 への崩壊が主なものとなる.

生成率は, 単一生成が一番高いが, ヒッグス粒子が軽い場合には $p\bar{p} \rightarrow b\bar{b}X$ 過程による背景事象中に信号を見出すのはほぼ不可能である. よって, 弱ゲージボソン W^\pm (あるいは Z^0) との随伴生成 $p\bar{p} \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}l\nu X$ を用いる. 中間質量領域 ($140 \text{ GeV}/c^2$ 程度) では, $H \rightarrow W^+W^{(*)-}$ 崩壊が寄与し始める. W ボソンとの随伴生成では, 終状態に W ボソンが 3 個存在し, そのうちの二つは必ず同電荷を持つ. それらがレプトンに崩壊すれば, 同

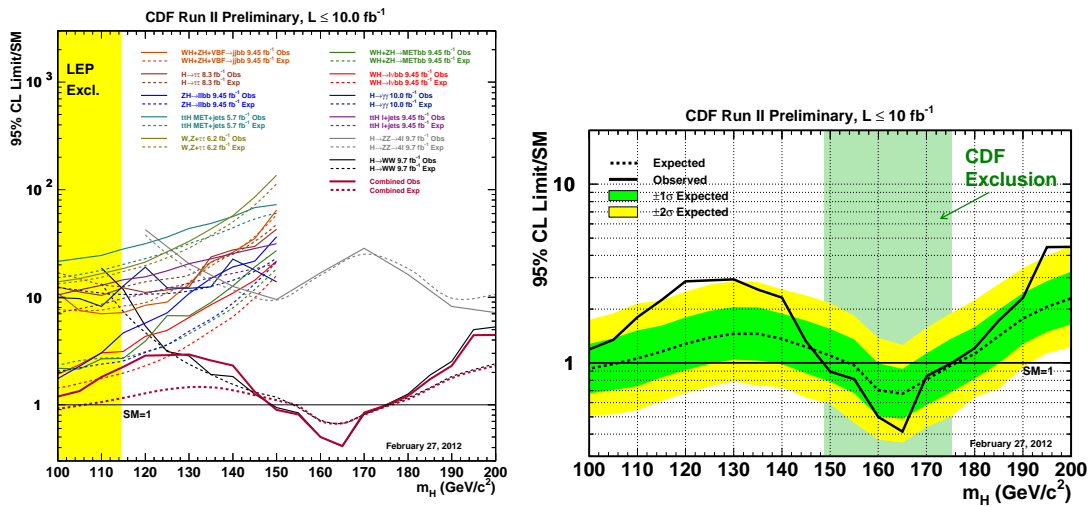


図 8: CDF 実験での標準模型ヒッグス粒子探索の結果. 生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したもの. CDF 実験の個々の探索結果 (左) とすべての結果を総合したもの (右).

符号のレプトン対という特徴的な信号となる. 高質量領域では, W^+W^- への崩壊が主になるが, この終状態はバックグラウンドが少なく, 単一生成 $p\bar{p} \rightarrow HX$ の探索が可能である. 終状態は, 二つの高運動量レプトンと大きな損失運動量となる.

これらの過程を用いてヒッグス粒子を探索し, ヒッグス粒子生成に対する上限を設定した. 図 8 (左) に個々の探索チャンネルにおける生成断面積の上限値と標準理論予言値との比を, 同 (右) にすべてのチャンネルを統合した結果を示す. 質量 160 GeV/c² 付近では, 上限値は予言値を下回り, 質量領域 $148.8 < m_H < 175.2$ GeV/c² の標準理論ヒッグス粒子を棄却した. 一方, 低質量領域では実際に観測された上限値は, ヒッグス粒子がないと仮定した場合に期待される上限値を上回る. これは, 質量 120 GeV/c² 付近に, ヒッグス粒子の信号と矛盾しない事象が, 期待される背景事象を超過して観測されたためである. この超過を信号と仮定した場合の生成断面積を図 9 に示す. 標準理論の予言値と矛盾しない.

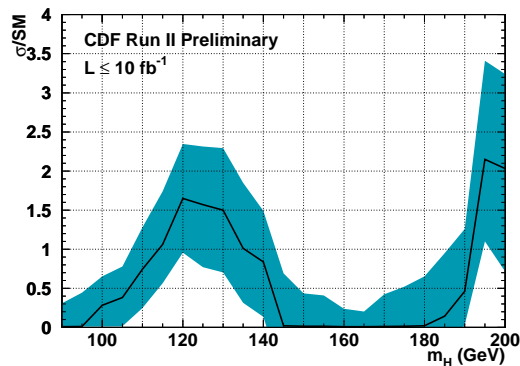


図 9: CDF 実験での標準模型ヒッグス粒子探索の結果. ヒッグスの信号が存在すると仮定してその生成断面積の理論値に対する比を質量の関数として示したもの.

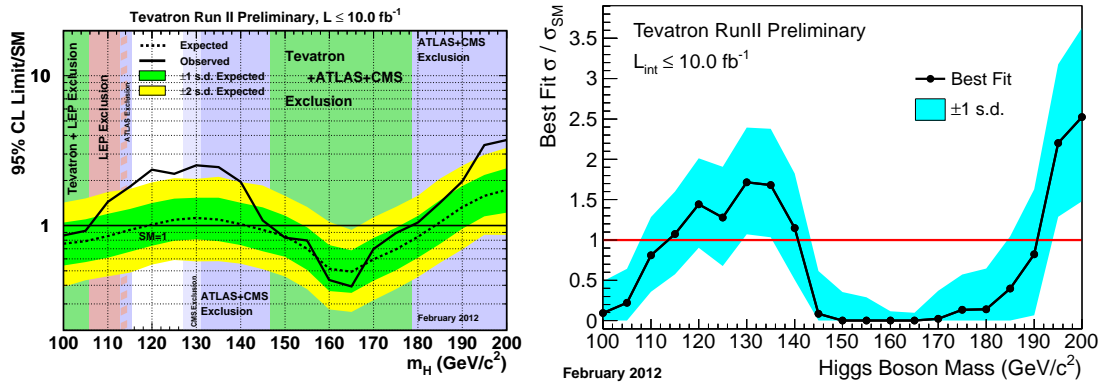


図 10: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果。CDF 実験と D0 実験の結果を統合したもの。生成断面積の上限（左）と信号を仮定した場合の生成断面積の中心値（右）を理論値で規格化して質量の関数として示す。

テバトロンでのもうひとつの実験（D0 実験）の結果と総合した場合の生成断面積の上限値および中心値を図 10 に示す。棄却された質量領域は $147 < M_{\text{Higgs}} < 179 \text{ GeV}/c^2$ である。低質量領域では、ヒッグス粒子の信号と矛盾しない事象が存在する。

以上に CDF 実験において平成 23 年度に得られた主な成果を述べた。同実験は、米国 2011 年度末をもって運転を終了したが、今後も 1～2 年は物理解析を継続し、素粒子物理学の知見を深める多くの結果を生み出すと期待される。

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は、2011 年 3 月より 2010 年に引き続き重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突を継続し、10 月末までに積算輝度 5.25 fb^{-1} を記録し、陽子陽子瞬間衝突輝度としては $3.65 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。11 月には核子あたり 2.76 TeV での鉛-鉛衝突実験を 1ヶ月間行い、 $158 \mu\text{b}^{-1}$ の重イオン衝突の事象を収集した。

2012 年にさらに $15\text{--}20 \text{ fb}^{-1}$ のデータを収集したのち、2 年弱のシャットダウンを経て、設計エネルギー 14 TeV、設計瞬間輝度 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成する予定である。2022 年からは、LHC の設計値を超えた高輝度実験、HL-LHC 加速器に増強することを予定している。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行った。

(1) ヒッグス粒子の探索

ヒッグスは質量の起源とされる粒子で、素粒子の標準模型では唯一未発見であり、ATLAS 実験はその探索を最大の目標としている。

ヒッグス粒子の崩壊分岐比は質量に依存するため、最も感度の高い探索モードも質量によって変る。図 11 に様々のヒッグス粒子探索の結果をまとめた。ヒッグスの存在は、LEP 実験により $114 \text{ GeV}/c^2$ 以下は否定され、今までの様々の測定からは間接的に $185 \text{ GeV}/c^2$ 以上は存在

しないだろうとされている。これらの領域やテバトロン実験からの直接除外領域を含め、広い範囲で存在を否定した。2011年のデータからは、存在が否定できない領域は115-130 GeV/c²に絞られた。特に125 GeV/c²近辺は、信号が無い場合に予想される棄却感度が達成できていない。何らかの超過事象が観測されたため、ヒッグス粒子存在の可能性がある。

図12は、この領域での事象数を背景事象のみで説明できる確率を縦軸にして主要探索モードに分けて示す。最も感度の高いモードは質量再構成分解能に優れた、 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow llll$ であるが、これらで125-126 GeV/c²をピークとして背景事象だけでは説明できない事象が観測された。これら以外の $H \rightarrow bb$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow \tau\tau$ での探索では質量分解能が限定的なためにピークにはならなかったが、すべてを統合した探索結果では2.6 σ に相当する背景事象では説明できない超過がみられる。事象数が限られる探索では、たまたまこのように見られる効果も考えなくてはならないが、それを考慮しても2.4 σ に相当する。

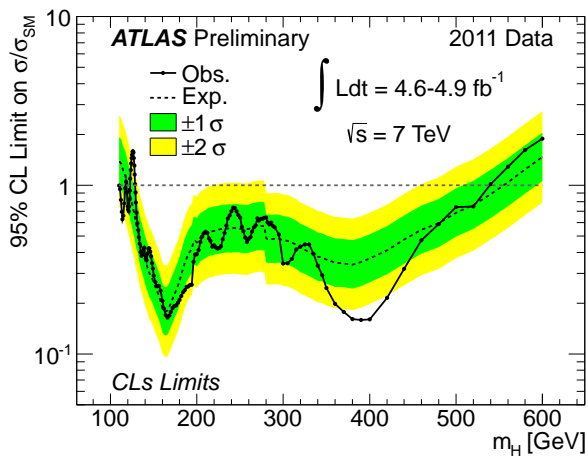


図11: ヒッグス粒子探索の結果。縦軸は標準模型ヒッグスの生成断面積で規格化した95%信頼度での生成断面積の上限を示すもので、1を下回る測定値(実線)の領域では、標準模型ヒッグスの存在は除外される。破線は、実験装置の感度から予測される除外領域の中心値で、帯はその1および2標準不確かかの範囲を示す。

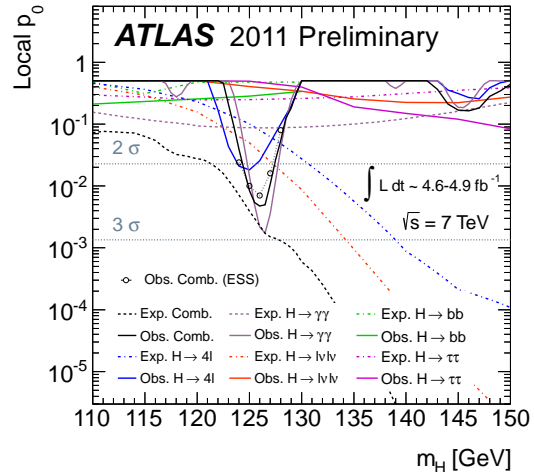


図12: 125 GeV/c²近辺において背景事象のみで説明できる確率。主要5探索モードでの結果を測定値を実線で、(背景事象だけの場合からの)予測値を破線で示す。統合結果は2.6 σ 、もしくはこのようなずれがどこでも起りうる(ESS)場合を考慮すると2.4 σ で説明できない事象超過がある。

新粒子の発見には5 σ 以上の超過が必要とされ2011年の結果はまだ不十分である。統計量を上げ、また他の探索モードでも信号を確認することが不可欠であるが、2012年の測定によりその結論が得られる予定である。ヒッグス粒子の存在は、素粒子物理学の標準模型の完成に不可欠のものであるが、同時に真空の概念を一新し、初期宇宙で重要な役割を果す粒子を捉えることにもなる。

ヒッグス粒子については単に存在の検証に留まらず、その性質の研究が重要となる。特にヒッグス粒子とフェルミ粒子との結合を測定し、結合の強さがフェルミ粒子の質量に比例するか(湯川結合)の検証は標準模型ヒッグスの理解に不可欠である。我々は τ レプトンへの崩壊 $H \rightarrow \tau\tau$ に注目した解析を継続している。

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。

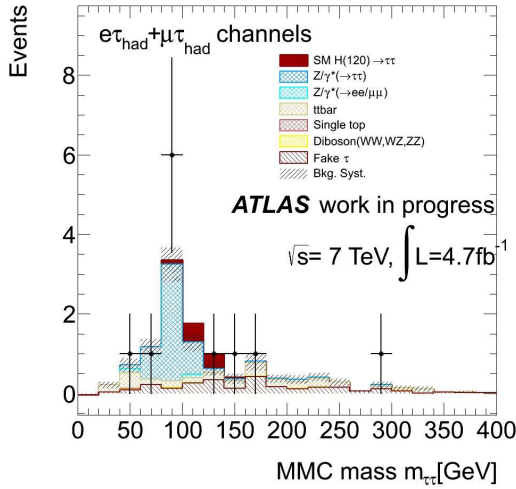


図 13: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布. 120 GeV/c^2 ヒッグスと背景事象の予想分布と 2011 年データとの比較.

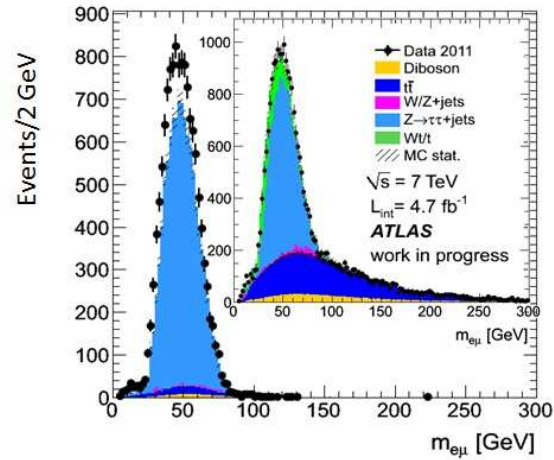


図 14: 電子+ミュー粒子終状態での $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の $e-\mu$ 不変質量の分布. ニューラルネット分別を適用前後 (挿入図は適用前) することで背景事象が大きく抑制でき, ヒッグス粒子に対応する信号を分離しやすくなる.

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るがハドロン終状態では背景事象となるジェットの除去が課題である. 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. 現在 2 種類の探索法を検討している.

最初の方法では, 2 つの τ 粒子に対して, τ_h, τ_ℓ をひとつずつ選別し, 特にヒッグス生成が多くなる $qq \rightarrow qqH$ の生成モードに特化した選択をする. 図 13 はそのような事象選択後の $\tau\tau$ 系の不変質量分布である. 2011 年データからは 12 事象が観測されたが殆どは Z の背景事象であると評価されている. 統計を増すことで Z 質量分布の肩 (図ではヒッグス質量 $120\text{GeV}/c^2$ を仮定) に信号が捉えられることが期待できる.

第 2 は, 両方ともにレプトン終状態を用い, 運動量測定精度の優れた背景事象の少ない電子とミュー粒子のみで組んだ不変質量を測定する方法である. 図 14 は $Z \rightarrow \tau\tau$ を捉えることで解析方法を検証を示すもので, ニューラルネットに基づく信号分別の有無での質量分布を比較し, ニューラルネットにより背景事象を大きく抑制できることを示している.

(2) 標準模型の物理

7 TeV 陽子陽子衝突での標準模型粒子の生成断面積を測定して理論予想と比較した. 図 15 に示すように, トップクォーク対生成, 単独トップクォーク生成やゲージボゾン対生成いずれも不確かさの範囲で理論値と良い一致を示している. トップ対生成については, 新たに τ +jets 終状態と全ジェット終状態の測定を加えた.

トップクォークの質量測定はレプトン+ジェット終状態で測定し 172.8 ± 0.7 (統計+ JES) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 を得た. テバトロン実験の統合結果 173.2 ± 0.6 (統計) ± 0.8 (系統) GeV/c^2 と不確かさの範囲で一致するが系統不確かさが劣る. ジェットのエネルギー絶対値など検出器性能のより一層の理解が系統不確かさを縮小させるために必要である.

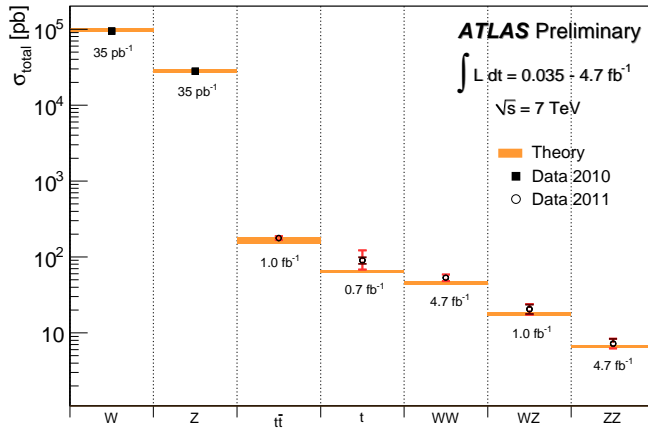


図 15: $\sqrt{s}=7$ TeV でのいくつかの標準模型粒子生成断面積の測定値と理論予想値との比較。

(3) 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の探索は重要である。7 TeV エネルギーでは新たな粒子の徴候は見られず、図 16 および図 17 に 95%信頼度で棄却した存在下限質量をまとめて示す。

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 にはいくつかのモデルがあるが、それらに対してクォークやグルーオンの SUSY 粒子については約 1 TeV/ c^2 までを棄却し、また第 3 世代の SUSY 粒子、安定重粒子の生成などについての探索を行っている。

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 1-4 TeV/ c^2 までの質量を棄却した。新しい相互作用が出現する実効質量は、トップ以外のクォークやレプトンに限ると約 10 TeV/ c^2 、トップと結合する相互作用に限ると 1.7 TeV/ c^2 までを棄却した。重いゲージボソンは 2.2 TeV/ c^2 、レプトクォークは 0.66 TeV/ c^2 、重いクォークは 0.35-0.48 TeV/ c^2 までを棄却した。その他、クォークの励起状態などについても従来の探索範囲を超えて存在を否定した。

重い新粒子の探索能力は衝突エネルギーに強く依存するので、2012 年の 8 TeV、2015 年以降の 14 TeV でも引き続き探索は継続される。

(4) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

2012 年の衝突エネルギーと衝突輝度の達成目標は、8 TeV および $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。設計エネルギー (14 TeV) と設計衝突輝度 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ はともに 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、2022 年からは、LHC の設計値を超えた高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強することを予定している。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を開発している。この開発は 6 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した。陽子線と中性子線を実際に照射し、HL-LHC の高放射線線量 ($1 \times 10^{15} \text{ 1-MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$) を受けて

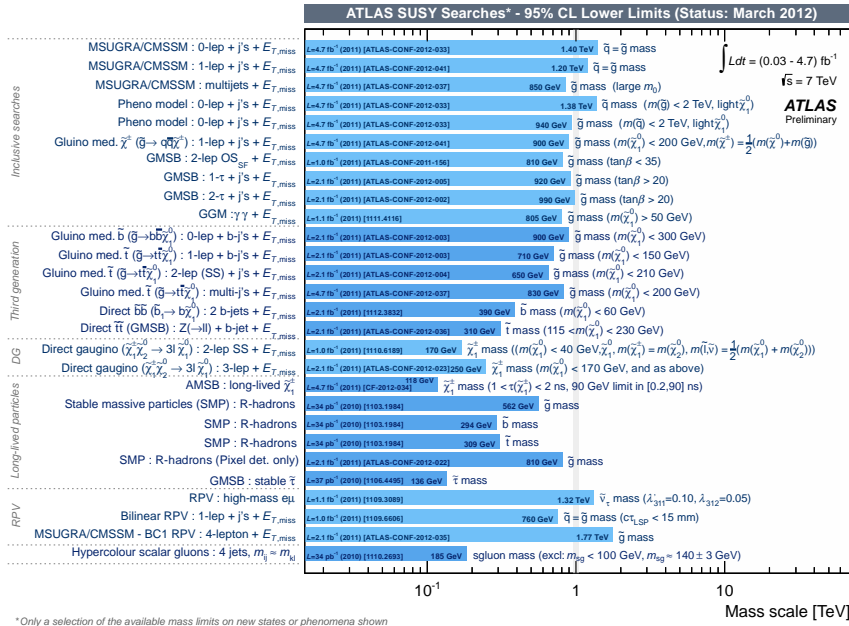


図 16: $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ でのいくつかの超対称性標準粒子に対する 95% 下限質量。

も使用可能な設計を確立した。また、加速器事故で一度に大量の粒子が入射された場合にもセンサーを保護するパンチスルー機能の時間特性を評価している。

2011 年度は、主に $^{60}\text{Co} \gamma$ を HL-LHC の運転時に近い線量率で照射し、センサーの低線量での振る舞いを詳細に調べた。HL-LHC での線量率は最大 20 Gy/h 程度なので、その条件に近い状態で予定する最大バイアス電圧 500 V まで安定して作動するかを評価した。

図 18 は、未照射のセンサーを用いて様々な照射率とバイアス電圧を与えた場合、安定して作動する領域を示す。各条件で電極ピッチの異なる 2 種のセンサー ($Z3=74.5\mu\text{m}$, $Z6=100\mu\text{m}$) について測定した結果、高照射率であるほど、また高バイアス電圧であるほど不安定になり電極間隔が広い Z6 の方が不安定となる領域が狭い。センサーの全空乏化電圧は 180 V なので、200 V を下回るバイアスで不安定になると使用しにくい。図 18 には未照射のセンサーに対する安定性を示したが、一度照射したセンサーは安定性が増すことを系統的な照射実験により示すことができた。安定化する線量は約 100 Gy でこれを超えて照射したセンサーは例えば 50 Gy/h, 700 V の条件でも安定して作動し、再照射の間隔が 3 週間の場合でも同様の結論が得られた。そのため、線量率が徐々に上がる実際の環境下では実用上の問題は無いと結論を得た。

センサーが不安定になるのは、暗電流値が急激に上昇することによるもので、この現象は局所的な高電場に起因するマイクロ放電と呼ばれる現象であるが、マイクロ放電の際には結晶振動に基づく熱が発生する。そのような熱分布を冷却 CCD カメラで赤外光を撮影することでマイクロ放電の場所を特定した。図 19 は不安定となったセンサーに対する撮影結果で、電極のコーナー部であることが分かる。この様なコーナー部には電場が強くまたより多くの電流が集中する。線量率が高いほど、また電極ピッチが広いほど電流集中が大きくなりバイアス電圧が高いほどマイクロ放電での電流増幅が大きくなり、測定結果を定性的に説明できる。この電極は電場を形成する電極とパルス信号を読み出す電極が絶縁膜を隔てて配置されている。一旦放射線を浴びるとこの絶縁膜にホールが蓄積し、対向するシリコン表面には電子が蓄積されることになる。この電子は電場集中を緩和する役割を果たすので、照射とともに安定性が向上する現象も説明できる。

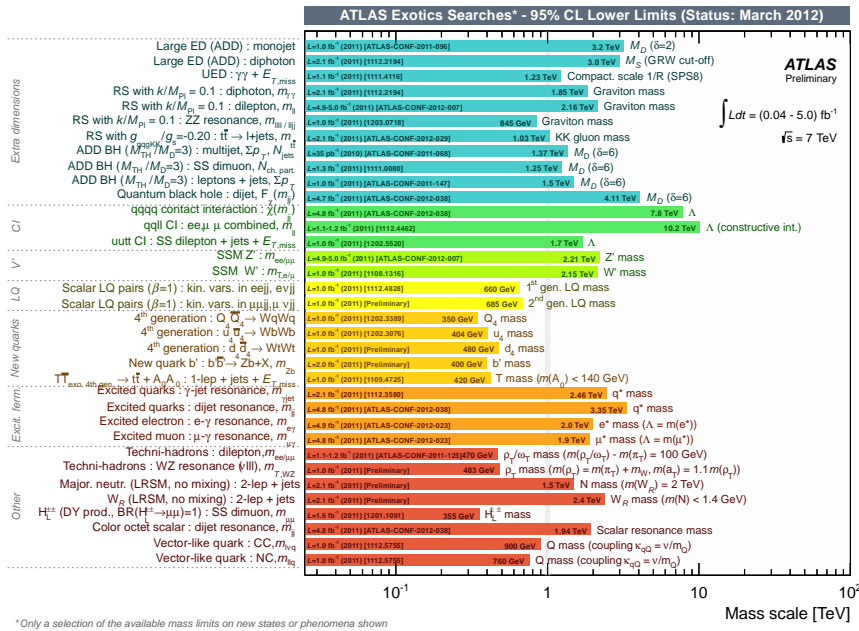


図 17: $\sqrt{s}=7$ TeV でのいくつかの標準模型を超える粒子の 95% 下限質量。

(5) 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し荷電粒子を検出するために、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。

素粒子実験での衝突点近傍に設置されるピクセル検出器には、荷電粒子の多重散乱を抑えるために物質量を減らす要請がある。読み出し回路一体型した SOI デバイスにとって、同時に十分に高い信号ノイズ (S/N) 比とセンサー薄型化が実現できれば、極めて有効な特長となる。また高速に電荷収集できる全空乏化も望ましい。

SOI ウェハはチョクラルスキ (Cz) 法で結晶化したシリコンを用いているが、より高純度のデバイスを実現するために FZ 法での試作も行なった。FZ 法では厚い ($500\mu\text{m}$) デバイスでも全空乏化が可能で、硬 X 線やガンマ線の検出への応用利点が挙げられるが、デバイス設計上では p 型と n 型の両タイプが指定できることがある。これにより放射線耐性設計の可能性が広げられる。

薄型化は前年度に行った 8 インチウェハごと $100\mu\text{m}$ まで薄くすることに加え、チップ単位での $50\mu\text{m}$ までの薄型化を行った。赤外レーザーや赤色レーザーによる実験室での評価とともに CERN でのハドロンビームでの信号読み出し試験を行った。図 20 には $100\mu\text{m}$ 厚のデバイスに対する SN 比の測定結果を示す。飛跡検出器としての要請 S/N20 を達成し、いずれのデバイスも十分な性能を実証できた。

SOI デバイスを荷電粒子測定に適用できたブレイクスルーは埋め込み電極の採用であるが、その設計によりアンプ入力電圧が変わり放射線耐性も依存する。適用する放射線環境に応じた設計をし、また回路処理部もチップ一体化する実用設計が今後の課題である。

		Radiation rate													
		2Gy/h	3Gy/h	4Gy/h	5Gy/h	10Gy/h	20Gy/h	100Gy/h	100Gy/h						
Vb at Irad	200V	✓ 32	✓ 32	---	---	---	---	✓ 15	✓ 15	✓ 100	✓ 100				
	300V	---	---	---	✓ 16	✗ 13	✓ 20	✗ 13	✓ 40	✗ 18	✗ 16	✗ 9	✗ 20	✗ 15	
	400V	✓ 32	✓ 32	✓ 57	✓ 57	✓ 76	✗ 8.5	✓ 12	✗ 6.3	---	---	✗ 8.7	✗ 5.7	✗ 13	✗ 10
	500V	---	---	---	---	---	---	✗ 13	✗ 7.5	---	---	---	---	---	---
	600V	✓ 32	✓ 32	✓ 57	✗ 8.7	✗ 12	✗ 6	✗ 9.6	✗ 5.8	---	---	✗ 7.7	✗ 5.3	✗ 12	✗ 8.3
	800V	✓ 9.2	✗ 6	---	---	---	---	✗ 9.2	✗ 6.6	---	---	✗ 8	✗ 5.7	✗ 10	✗ 6.7

図 18: 未照射センサーに対して照射率とバイアス電圧を変えて測定した安定性の結果。不安定となった照射量 (Gy) を 2 種類のセンサーについて示す。枠内の条件は安定である領域 (数値は安定であると判定した照射量) で、照射率が低いほどまたバイアス電圧が低いほど安定動作する。

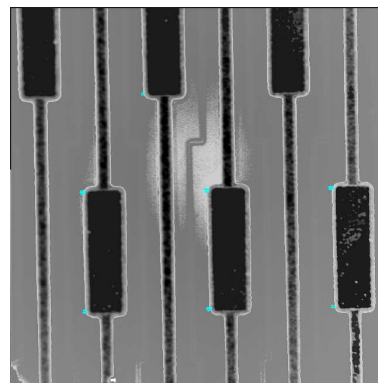


図 19: マイクロ放電で発生する熱を撮影した画像。電極のコーナー部でマイクロ放電が発生し不安定となる。

【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 0.5 TeV 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。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。ILC での実験では、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。

現在筑波大学グループでは、KEK, 神戸大, 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 21)。

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であり、そのために ILC 実験では、ジェットに対するエネギー測定精度をより向上させるため、Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネギー測定方法が提唱されている。この方法では、ジェット中の粒子をカロリメータ中で一つ一つ区別し、中性粒子についてはカロリメータでエネギーを測定し、荷電粒子の運動量については、より優れた分解能を持つ飛跡検出器で測定することにより、ジェットに対するエネギー分解能の向上を図るものである。このような方法を用いるには、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。このような細分割を実現するために、シンチレータを短冊 (ストリップ) 型にし、交差させて交互に積み重ねる方法が考えられているが、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。また、磁場中で使用されることもあり、これまで広く用いられてきた光センサーである光電子増倍管では、なく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、使用が前提となる。

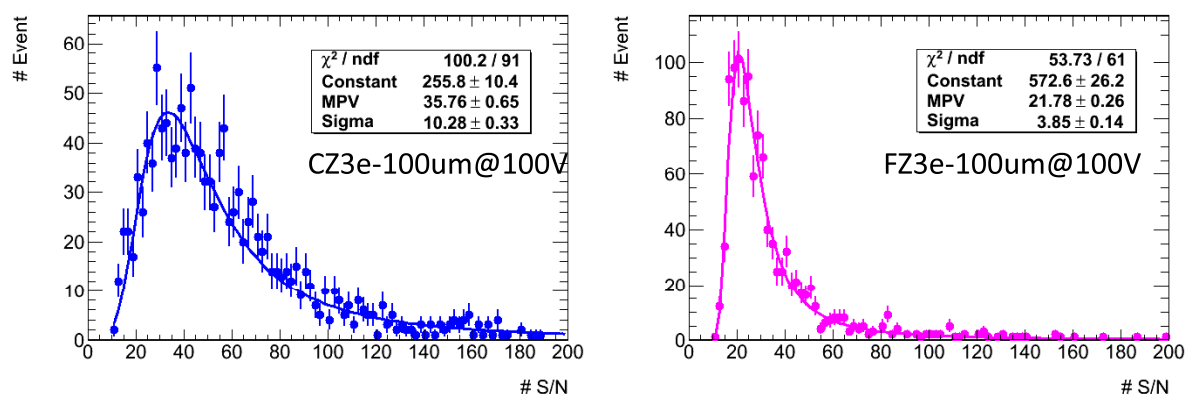


図 20: 100 μm に薄型化したセンサーの高エネルギー荷電粒子への応答。横軸は信号ノイズ比。Cz 法と FZ 法で作製したウェハでの比較。

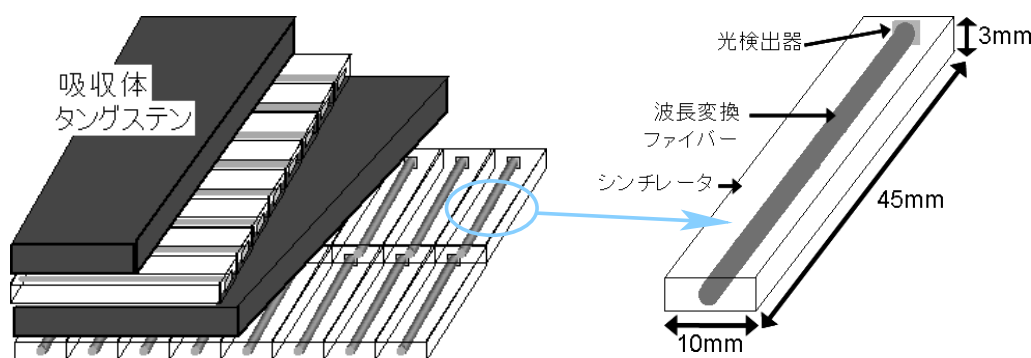


図 21: ILC(ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ。カロリメータは、吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており、シンチレータ層は、ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている。またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ、光検出器によって読み出される。

我々は、これまで、浜松ホトニクス、KEK を中心とした光センサーグループと共に、ILC カロリメータでの使用を前提として 1600 ピクセルの $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ の MPPC のサンプルを用い光検出効率、応答線形性、増幅率、ノイズ頻度、クロストークの測定、放射線耐性、信号頻度依存性、そして温度加速試験による基礎特性の長期安定性の測定を行ってきた。更に、MPPC 単体の試験から更により実機に近づけた形として、シンチレータのストリップ及び波長変換ファイバーと 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。

カロリメータの分解能を決める一つの要因は、センサーの線形応答性である。MPPC は、非常に短い光パルスに対しては、ピクセル数以上の出力を出せないため、ピクセル数に近い光電子数入力に対しては飽和が起こる。このため、MPPC のピクセル数が多ければ多い程光パルス入力に対する応答の線形性は、向上する。

我々は、新たに浜松ホトニクスが開発した 2500 ピクセルの性能を見るため 40ps の短パル

ス光の近紫外光レーザを用い、線形応答性を測定した。図 22 は、2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC のレーザ光に対する出力ピクセル数の入射光量依存性を示したものである。入射光量は、光電子増倍管をリファレンスとし、2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC で入射光子数が同じになるように規格化してある。短パルス光に対しては、2500 ピクセル

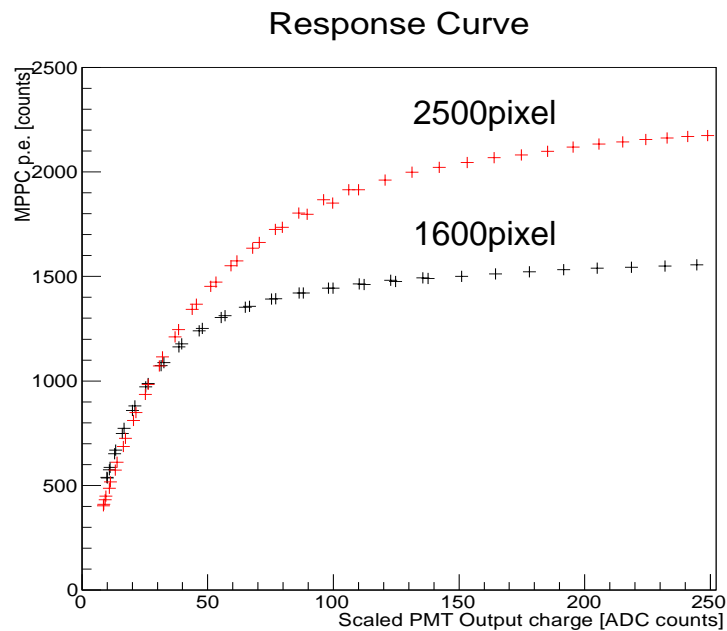


図 22: 2500 ピクセルと 1600 ピクセルの MPPC のレーザ光に対する出力ピクセル数の入射光量依存性。

の方が明らかに線型性が良いことがわかる。

MPPC のピクセルは、4ns という非常に短い回復時間を持っていることがわかっており、入力される光パルスの時間幅がこの回復時間よりも長いときは同じピクセルが何度も出力を出すことによって、MPPC は、ピクセル数以上の出力を出すことができると考えられる。したがって、MPPC の出力飽和が始まるのがどのくらいの光電子数で、完全に出力が飽和するのがどこなのかは、光パルスの時間形状に依存する。

今後は、2500 ピクセルの MPPC を用い、より実機に近い光パルス入力における応答を測定し、1600 ピクセルの場合と比較する必要がある。

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

過去 10 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広く行われてきた。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、従来用いられている Nb を用いた Nb/Al-STJ やさらにエネルギーバンドギャップの小さい Hf (0.051 meV, $T_c = 0.165$ 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。

この検出器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いる。ニュートリノは、標準模型の枠内で重いニュートリノ (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{43} 年で崩壊する。また重たい未知の右巻き weak boson W_R が存在するモデルにおいては、このニュートリノの寿命ははるかに短くなると予想される。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。

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、 $110/\text{cm}^3$ 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 $\sim 30\text{meV}$ 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。この信号の検出に必要な検出器に対する要求は、宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションを行った結果、30 meV の光子に対して 2% のエネルギー分解能を有することであることが分かっている。

そこで、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った。2010 年度には、初めて Hf-STJ の試作機においてジョセフソン電流を確認し、SIS 構造の作成に成功した。ただし、確実に SIS 構造を持つ試料を作成するには至っておらず、またリーク電流が大きいため検出器として動作させるには、更に改善の必要がある。

Hf-STJ の開発とは、別に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 の超伝導ギャップエネルギー (3.1 meV) を考慮すると、我々が目標としている 30 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 のセルをアレイ状に並べ、Nb/Al-STJ は、光子計数のみを行わせることによってエネルギー測定を行う。

Nb/Al-STJ に対する要求は、30 meV (波長 $50 \mu\text{m}$) の一光子を検出することであるが、現在は可視光を大光量パルスを用いた読み出し系のテストを行っている。

図 23 は、可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の応答を示す。

可視光大光量パルス光に対する応答が確認できたので、今後は、これを可視光一光子、近赤外光一光子、遠赤外光一光子に対する応答を見るべく、準備を進めている。

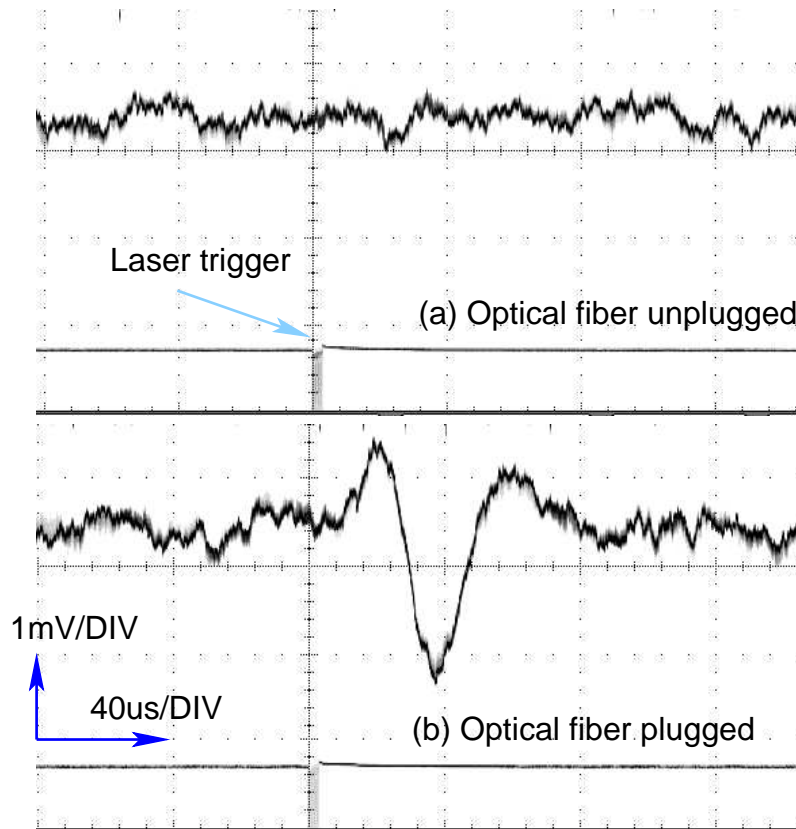


図 23: 図 23は、可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の信号のアンプ出力. レーザ光パルスは、30 パルスを 10MHz で点灯させている. 1パルスあたりの光子数は、 $\sim 10^5$. (a) 光ファイバーを差してないとき. (b) 光ファイバーを差したとき.

【5】 外部資金

1. 日米科学技術協力事業「陽子・反陽子衝突による重い粒子の検出 (CDF)」
共同研究 (日本側参加機関: 筑波大物理, 大阪市大理, 早稲田大理工, 岡山大理, 近畿大理工, 京都教育大理. 日本側研究代表者: 受川 史彦)
物件費: 29,000 千円, 旅費: 8,000 千円
2. 科学研究費補助金「陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理」
共同研究 (研究代表者: 金 信弘) 特定領域研究 14,600 千円 (直接経費 14,600 千円)
3. 科学研究費補助金「ハドロン衝突におけるクォークオニウム生成機構の解明」
受川 史彦: 基盤研究 (C) 1,430 千円 (直接経費 1,100 千円, 間接経費 330 千円)
4. 科学研究費補助金「二体ミュオン粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いた b クォーク電弱希崩壊の精密測定」
三宅 秀樹: 若手研究 (B) 1,820 千円 (直接経費 1,400 千円, 間接経費 420 千円)

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Top-quark mass measurement using events with missing transverse energy and jets at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 232002 (2011).
2. “Measurements of branching fraction ratios and CP-asymmetries in suppressed $B^- \rightarrow D(\rightarrow K^+\pi^-)K^-$ and $B^- \rightarrow D(\rightarrow K^+\pi^-)\pi^-$ decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 091504 (2011).
3. “Search for resonant production of $t\bar{t}$ decaying to jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 072003 (2011).
4. “Measurement of the top-quark mass in the lepton+jets channel using a matrix element technique with the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 071105 (2011).
5. “Search for new physics in high p_T like-sign dilepton events at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 181801 (2011).
6. “A search for resonant production of $t\bar{t}$ pairs in 4.8 fb^{-1} of integrated luminosity of $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 072004 (2011).

7. “Measurement of polarization and search for CP-violation in $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 261802 (2011).
8. “Observation of the Ξ_b^0 baryon,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 102001 (2011).
9. “Search for a heavy top-like quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 261801 (2011).
10. “Observation of the baryonic flavor-changing neutral current decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 201802 (2011).
11. “Search for new T' particles in final states with large jet multiplicities and missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 191803 (2011).
12. “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 191801 (2011); Phys. Rev. Lett. **107**, 239903(E) (2011).
13. “Measurement of the cross section for prompt isolated diphoton production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052006 (2011).
14. “Measurement of the cross section for prompt isolated diphoton production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 102003 (2011).
15. “Evidence for $t\bar{t}\gamma$ production and measurement of $\sigma_{t\bar{t}\gamma}/\sigma_{t\bar{t}}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 031104 (2011).
16. “Measurement of branching ratio and B_s^0 lifetime in the decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052012 (2011).
17. “Measurements of the properties of $\Lambda_c(2595)$, $\Lambda_c(2625)$, $\Sigma_c(2455)$, and $\Sigma_c(2520)$ baryons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 012003 (2011).
18. “Improved determination of the sample composition of dimuon events produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Eur. Phys. J. C **71**, 1720 (2011).
19. “First search for multijet resonances in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 042001 (2011).
20. “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in ppbar collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using events with large missing transverse energy and jets,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 032003 (2011).

21. “Top quark mass measurement using the template method at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 111101 (2011).
22. “Search for a very light CP-odd Higgs boson in top quark decays from $p\bar{p}$ collisions at 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 031801 (2011).
23. “Invariant mass distribution of jet pairs produced in association with a W boson in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 171801 (2011).
24. “Measurements of direct CP violating asymmetries in charmless decays of strange bottom mesons and bottom baryons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 181802 (2011).
25. “First measurement of the angular coefficients of Drell-Yan e^+e^- pairs in the Z mass region from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 241801 (2011).
26. “Measurement of event shapes in proton-antiproton collisions at center-of-mass energy 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112007 (2011).
27. “Measurement of the top pair production cross section in the lepton + jets channel using a jet flavor discriminant,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 031101 (2011).
28. “Search for new dielectron resonances and Randall-Sundrum gravitons at the Collider Detector at Fermilab,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 051801 (2011).
29. “Limits on anomalous trilinear gauge couplings in $Z\gamma$ events from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 051802 (2011).
30. “Measurement of the mass difference between t and \bar{t} quarks,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 152001 (2011).
31. “Search for production of heavy particles decaying to top quarks and invisible particles in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 191801 (2011).
32. “Measurement of the B_s lifetime in fully and partially reconstructed $B_s \rightarrow D_s^-(\phi\pi^-)X$ decays in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **107**, 272001 (2011).
33. “Search for new heavy particles decaying to $Z^0 Z^0 \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \ell\ell jj$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112008 (2011).

34. “Observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 052012 (2011).
35. “Search for the Higgs boson in the all-hadronic final state using the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 052010 (2011).
36. “Search for heavy bottom-like quarks decaying to an electron or muon and jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 141803 (2011).
37. “Measurement of the top quark mass in the lepton+jets channel using the lepton transverse momentum,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Lett. B **698**, 371 (2011).
38. “Search for high mass resonances decaying to muon pairs in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [The CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 121801 (2011).
39. “Measurement of the forward-backward asymmetry in the $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ decay and first observation of the $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ Decay,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 161801 (2011).
40. “Evidence for a mass dependent forward-backward asymmetry in top quark pair production,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 112003 (2011).
41. “Search for a new heavy gauge boson W' with electron + missing E_T event signature in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 031102 (2011).
42. “Measurement of b hadron lifetimes in exclusive decays containing a J/ψ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96\text{TeV}$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **106**, 121804 (2011).
43. “Measurement of $t\bar{t}$ spin correlation in $p\bar{p}$ collisions using the CDF II detector at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 031104 (2011).
44. “Search for Randall-Sundrum gravitons in the diphoton channel at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 011102 (2011).
45. “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section with an in situ calibration of b -jet identification efficiency,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 071102 (2011).
46. “Measurement of the B^- lifetime using a simulation free approach for trigger bias correction,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **83**, 032008 (2011).

47. “Measurement of angular distributions of $\Upsilon(nS) \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.1591 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
48. “Measurement of ZZ production in leptonic final states at \sqrt{s} of 1.96 TeV at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.2978 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
49. “Measurement of the ratio of branching fractions $BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c 3\pi^+)/BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c 1\pi^+)$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.3334 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
50. “Measurement of the top quark mass in the all-hadronic mode at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.4891 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
51. “Observation of exclusive $\gamma\gamma$ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3093 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
52. “Search for SM Higgs boson production in association with a W boson using a matrix element technique,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.4358 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
53. “Measurement of CP violating phase β_s in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.1726 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
54. “Measurement of the masses and widths of the bottom baryons Σ_b^{+-} and Σ_b^{*+-} ,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1112.2808 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
55. “Evidence for the charmless annihilation decay mode $B_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1111.0485 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “Measurements of the angular distributions in the decays $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1108.0695 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “Observation of the $Y(4140)$ Structure in the $J/\psi\phi$ Mass Spectrum in $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.6058 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)

58. “Search for Higgs bosons produced in association with b -quarks,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1106.4782 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
59. “Study of substructure of high transverse momentum jets produced in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1106.5952 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
60. “Hyperon (Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm , and Ω^\pm) production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.2996 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
61. “Search for same-sign top quark production and fourth-generation down-type quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **1204** 069 (2012).
62. “ Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 49 (2012).
63. “Search for the Standard Model Higgs boson in the diphoton decay channel with 4.9 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phy. Rev. Lett. **108** 11803 (2012).
64. “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$ with 4.8 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 383 (2012).
65. “Rapidity Gap Cross Sections measured with the ATLAS Detector in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C72** 1926 (2012).
66. “Search for anomalous production of prompt like-sign muon pairs and constraints on physics beyond the Standard Model with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 85** 032004 (2012).
67. “Observation of a new χ_b state in radiative transitions to $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ at ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** 15201 (2012).

68. “ Search for first generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 158 (2012).
69. “Measurement of D^* meson production in jets from pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 052005 (2012).
70. “ Search for the Higgs boson in the $H\rightarrow WW^{(*)}\rightarrow l\nu l\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **108** 111802 (2012).
71. “Search for Extra Dimensions Using Diphoton Events in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B710** 538 (2012).
72. “Measurement of the WZ Production Cross Section and Limits on Anomalous Triple Gauge Couplings in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 341 (2012).
73. “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy with 1 fb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B710** 519 (2012).
74. “Measurement of the production cross section for Z/γ^* in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 032009 (2012).
75. “ K_s and Λ production in pp interactions at $\sqrt{s}=0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 012001 (2012).
76. “Search for strong gravity signatures in same-sign dimuon final states using the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B709** 322 (2012).
77. “Searches for supersymmetry with the ATLAS detector using final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s}=7$ TeV proton-proton collisions

- ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Phys. Lett. **B709** 137 (2012).
78. “Measuring the material in the ATLAS Inner Detector with secondary hadronic interactions with 7 TeV data ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 JINST **7** P01013 (2012).
79. “Measurement of the ZZ production cross section and limits on anomalous neutral triple gauge couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Phys. Rev. Lett. **108** 041804 (2012).
80. “Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Eur. Phys. J. **C72** 1909 (2012).
81. “Search for massive colored scalars in four-jet final states in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Eur. Phys. J. **C71** 1818 (2011).
82. “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 JHEP **1111** 099 (2011).
83. “Performance of the ATLAS Trigger System in 2010 ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Eur. Phys. J. **C72** 1849 (2011).
84. “Measurement of the inclusive and dijet cross sections of b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Eur. Phys. J. **C71** 1846 (2011).
85. “Search for supersymmetry in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 1 fb^{-1} of ATLAS data ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Phys. Rev. **D 85** 012006 (2011).
86. “Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions ”,
 ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
 Phys. Lett. **B710** 67 (2011).

87. “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 435 (2011).
88. “Measurement of the jet fragmentation function and transverse profile in proton-proton collisions at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1795 (2011).
89. “Search for New Phenomena in $t\bar{t}$ Events With Large Missing Transverse Momentum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 231801 (2011).
90. “Search for a Standard Model Higgs boson in the mass range 200-600 GeV in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ final state with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 221802 (2011).
91. “Search for a heavy neutral particle decaying into an electron and a muon using 1 fb^{-1} of ATLAS data ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1809 (2011).
92. “Search for Displaced Vertices Arising from Decays of New Heavy Particles in 7 TeV pp Collisions at ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 478 (2012).
93. “Measurement of the cross section for the production of a W boson in association with b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 418 (2012).
94. “Measurement of the cross-section for b-jets produced in association with a Z boson at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B706** 295 (2012).
95. “Measurements of the electron and muon inclusive cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B707** 438 (2012).
96. “Search for New Physics in the Dijet Mass Distribution using 1 fb^{-1} of pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV collected by the ATLAS Detector ”,

- ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B708** 37 (2012).
97. “Measurement of the Transverse Momentum Distribution of W Bosons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 85** 012005 (2012).
 98. “Measurement of the centrality dependence of the charged particle pseudorapidity distribution in lead-lead collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B710** 363 (2012).
 99. “Measurement of the pseudorapidity and transverse momentum dependence of the elliptic flow of charged particles in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 330 (2012).
 100. “Search for the Higgs boson in the two photon decay channel with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B705** (2012).
 101. “Performance of Missing Transverse Momentum Reconstruction in Proton-Proton Collisions at 7 TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C72** (2012).
 102. “Search for a heavy Standard Model Higgs boson in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 27 (2012).
 103. “A measurement of the ratio of the W and Z cross sections with exactly one associated jet in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B708** 221 (2012).
 104. “Measurement of the W to $\tau\nu$ Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B706** 276 (2012).
 105. “Measurement of the top quark pair production cross-section in the dilepton channel”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B707** 459 (2011).

106. “Measurement of the Z to $\tau\tau$ cross section with the ATLAS detector”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. D **84** 112006 (2011).
107. “Search for dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 272002 (2011).
108. “Search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in 1 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 28 (2011).
109. “Inclusive search for same-sign dilepton signatures in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1110** 107 (2011).
110. “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using 35 pb^{-1} ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B706** 150 (2011).
111. “Search for neutral MSSM Higgs boson decaying to tau+tau- pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 174 (2011).
112. “Properties of jets measured from tracks in proton-proton collisions at center-of-mass energy 7 TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. D **84** 054001 (2011).
113. “Measurement of the transverse momentum distribution of Z/γ^* bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 415 (2011).
114. “Measurement of multi-jet cross-sections in proton-proton collisions at 7 TeV center-of-mass energy ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1763 (2011).
115. “Measurement of dijet production with a veto on additional central jet activity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1109** 053 (2011).

116. “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy with 36 pb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1744 (2011).
117. “Measurement of isolated di-photon cross-section in pp collision at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 85** 012003 (2011).
118. “ Measurement of the Upsilon(1S) Production Cross-Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 9 (2011).
119. “Search for new phenomena with the monojet and missing transverse momentum signature using the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ proton-proton collisions ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B705** 294 (2011).
120. “Search for Heavy Long-Lived Charged Particles with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B703** 428 (2011).
121. “Limits on the production of the standard model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1728 (2011).
122. “Measurement of the production cross section of $W\gamma$ and $Z\gamma$ at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
JHEP **1109** 072 (2011).
123. “Measurement of the WW production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **107** 041802 (2011).
124. “Search for pair production of first or second generation leptoquarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ using the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 83** 112006 (2011).
125. “Search for Contact Interactions in Dimuon Events from pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector ”,

- ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D 84** 011101 (2011).
126. “Measurement of the differential cross-sections of inclusive, prompt and non-prompt J/ψ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Nucl. Phys. **B 850** 387 (2011).
 127. “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross-Section at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Nature Commun. **2** 463 (2011).
 128. “Search for an excess of events with identical flavour lepton pairs and significant missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C71** 1641 (2011).
 129. “Search for high mass dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B700** 163 (2011).
 130. “Search for supersymmetric particles in events with lepton pairs and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at the ATLAS ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Eur. Phys. J. **C71** 1682 (2011).
 131. “Search for a heavy particle decaying into an electron and a muon with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 251801 (2011).
 132. “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B701** 398 (2011).
 133. “Search for New Physics in Dijet Mass and Angular Distributions in 36 pb⁻¹ of pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Measured with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, New J. Phys. **13** 053044 (2011).
 134. “Measurement of the Muon Charge Asymmetry from W Bosons Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B701** 31 (2011).

135. “Search for Stable Hadronising Squarks and Gluinos at the ATLAS Experiment at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701** 1 (2011).
136. “Measurements of underlying-event properties using neutral and charged particles in pp collisions at 900 GeV and 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1636 (2011).
137. “Search for high-mass states with one lepton plus missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701** 50 (2011).
138. “Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton proton collisions ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Lett. **B701**186 (2011).
139. “Measurement of Dijet Azimuthal Decorrelations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. Lett. **106** 172002 (2011).
140. “Luminosity Determination in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS Detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1630 (2011).
141. “Charged particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
New J. Phys. **13** 053033 (2011).
142. “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D83** 052005 (2011).
143. “Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1577 (2011).
144. “Measurement of underlying event characteristics using charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV and 7 TeV with the ATLAS Detector ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Phys. Rev. **D 83** 112001 (2011).

145. “Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons ”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*,
Eur. Phys. J. **C71** 1503 (2011).
146. ” Punch-through protection of SSDs in beam accidents ”,
H. F.-W. Sadrozinski, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A536 (2011)46.
147. S. Kim *et al.* : Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino using
Cosmic Infrared Background Energy Spectrum,
JPSJ **81**, 024101 (2012)

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 佐藤 構二：“CDF 実験の最新結果,”
素粒子理論サブグループセミナー (2011年6月23日), 首都大学東京.
2. 武内 勇司：“CDF の最新結果,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2011 (2011年7月1日-3日),
三重県三重郡菟野町.
3. 三宅 秀樹：“CDF での B の物理,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2011 (2011年7月1日-3日),
三重県三重郡菟野町.
4. 永井 義一：“CDF における軽い質量のヒッグス粒子の探索,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2011 (2011年7月1日-3日),
三重県三重郡菟野町.
5. 橋本 就吾：“CDF 実験 PMT 長期安定性,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2011 (2011年7月1日-3日),
三重県三重郡菟野町.
6. 武内 勇司：“テバトロンのトップクォーク物理と BSM 探索” (シンポジウム講演),
日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011年9月16日-19日), 弘前大学.
7. 永井 義一：“Tevatron での Higgs 探索” (シンポジウム講演),
日本物理学会 2011 年秋季大会 (2011年9月16日-19日), 弘前大学.
8. 武内 勇司：“陽子・反陽子衝突実験におけるトップクォーク対生成前後方非対称度の
測定 (II),”
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012年3月24日-27日), 関西学院大学.
9. 倉田 正和：“CDF 実験における Dynamical Likelihood Method を用いた標準模型ヒッ
クス粒子の探索,”
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012年3月24日-27日), 関西学院大学.
10. 金 信弘：“CDF 実験の 30 年,” (招待講演)
日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012年3月24日-27日), 関西学院大学.

11. 高橋優： γ 線照射による SLHC 実験に用いる高放射線耐性 P 型シリコンマイクロストリップセンサーの開発
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
12. 小池憲一郎：ATLAS 検出器における μ 粒子の横方向運動量再構成精度
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
13. 埴慶太：LHC-ATLAS 実験における Higgs 探索のための τ 同定の研究
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
14. 望月一也：LHC-ATLAS 実験におけるレプトン崩壊モードを用いた τ 粒子検出の評価
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学.
15. 林隆康：LHC-ATLAS 実験における W+jets 事象の生成断面積測定
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学
16. 新庄康平: CZ 及び FZ 型 SOI ウェハを用いた一体型ピクセル検出器の放射線耐性の評価
日本物理学会 2011 年秋季大会（2011 年 9 月 16 日-19 日），弘前大学
17. 新庄康平: 高エネルギー荷電粒子検出用 SOI ピクセル検出器の開発
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
18. 埴慶太: LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow lh$ を用いたヒッグス粒子の探索
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
19. 望月一也：LHC-ATLAS 実験における多変量解析による Z 粒子 τ レプトン対崩壊の研究
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
20. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ崩壊光子の赤外観測の可能性，
「背景放射で拓く宇宙創成の物理-インフレーションからダークエイジまで-」シンポジウム 2011，(2011 年 7 月 12 日)，宇宙航空研究開発機構相模原キャンパス
21. 永田和樹：ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の研究開発，
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学
22. 金井伸也：赤外線分光検出器開発のための Nb/Al STJ での可視光応答性の評価，
日本物理学会 第 67 回年次大会（2012 年 3 月 24 日-27 日），関西学院大学

(3) 非常勤講師・集中講義

1. 受川史彦：「陽子・（反）陽子衝突における素粒子物理」，大阪市立大学，2011 年 12 月 12, 13, 19 日.

(4) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Hideki Miyake, “Improved Measurements of Decays Mediated by the $b \rightarrow s\mu\mu$ Transition at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
2. Yuji Sudo, “Search for a Standard Model Higgs Boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ Final States at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
3. Masakazu Kurata, “Search for a Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a W Boson Using a DLM and Discriminant Analysis at CDF,”
APS April Meeting, April 30 – May 3, 2011, Anaheim, CA, USA.
4. Hideki Miyake, “Observation of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$ Decay and Updated Search for non-SM Physics in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
International Europhysics Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2011), July 21 – 27, 2011, Grenoble, Rhone-Alpes, France.
5. Hideki Miyake, “Observation of the Baryonic FCNC Decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$ and the Angular Analysis in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
Joint Experimental-Theoretical Physics Seminar, Fermilab, August 19, 2011, Batavia, IL, USA.
6. Yuji Takeuchi, “Top Quark Properties”, XXV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, August 22 – 27, 2011, Mumbai, India.
7. Hideki Miyake, “Updated Search for non-SM Physics in $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decays at CDF,”
19th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY11), August 28 – September 2, 2011, Fermilab, Batavia, IL, USA.
8. Koji Sato, “CDF (1),”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2012), February 27 – March 1, 2012, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
9. Yuji Takeuchi, “ $t\bar{t}$ Forward-Backward Asymmetry at CDF,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2012), February 27 – March 1, 2012, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
10. Y. Takahashi, K. Hara, S. Kim, “Performance of p-bulk microstrip detector under ^{60}Co irradiated at rates expected at HL-LHC”, 8th International Symposium on Semiconductor Tracking Devices, Taipei, Taiwan, Dec 8, 2011.
11. K. Hara, “CDF Silicon Tracking Detectors, 1988-2011”, Invited talk given at 8th International Symposium on Semiconductor Tracking Devices, Taipei, Taiwan, Dec 7, 2011.

12. K. Hara, “Recent progress in SOI pixel development”, Belle Workshop, KEK, Japan, Nov. 11, 2011.
13. K. Hara, K. Sinsho, “Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection”, IEEE Nuclear Science Symposium, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.
14. K. Hara, “Punch through protection of microstrip detector against beam loss”, 2nd International Symposium on Technology and Instrumentation in Particle Physics, Chicago, USA, June 9, 2011.
15. S. Kim : Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector using Hafnium,
The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), – June 1, 2011, Chicago/USA

(5) 会議・研究会報告書

1. K. Shinsho, K. Hara, *et al.*, “Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection”, IEEE Nuclear Science Symposium CR N21-1, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.

(6) 学位論文

博士論文

1. 須藤 裕司 : Search for the Standard Model Higgs Boson in $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ Channel in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (1.96TeV 陽子反陽子衝突における $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ 崩壊過程を用いた標準模型ヒッグス粒子の探索)
数理物質科学研究科物理学専攻, 2012 年 2 月.
2. 武政 健一 : Measurement of the Spin Correlation in the Top Quark Pair Production Using the Dilepton Events in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions (1.96 TeV 陽子反陽子衝突におけるダイレプトン事象を用いたトップクォーク対生成事象のスピンの極度相関の測定),
数理物質科学研究科物理学専攻, 2012 年 2 月.

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, 2012 年 2 月.

1. 小池憲一郎 : $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象を用いた LHC-ATLAS 内部飛跡検出器における横方向運動量測定精度の研究
2. 新庄康平 : 高エネルギー荷電粒子検出用 SOI ピクセル検出器の開発研究

3. 高橋優 : Performance of p-Bulk Silicon Microstrip Sensors in HL-LHC Radiation Environment
4. 望月一也 : Study of $Z \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\ell$ for the Higgs Boson Search with the ATLAS Experiment at the LHC

(7) 研究会の主催

1. CDF 実験日本グループ研究会
筑波大学, 2011 年 12 月 23 - 24 日.

III. 宇宙物理理論グループ

教授	梅村 雅之
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
准教授	岡本 崇 (HPCI 戦略プログラム)
助教	川勝 望 (理数学生応援プロジェクト)
研究員	谷川 衝 (科研費基盤 S)
	行方 大輔 (科研費基盤 S)
	川口 俊宏 (科研費基盤 A)
	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)
	Alexander Wagner (センター)
大学院生	9名
4年生	7名

【1】 概要

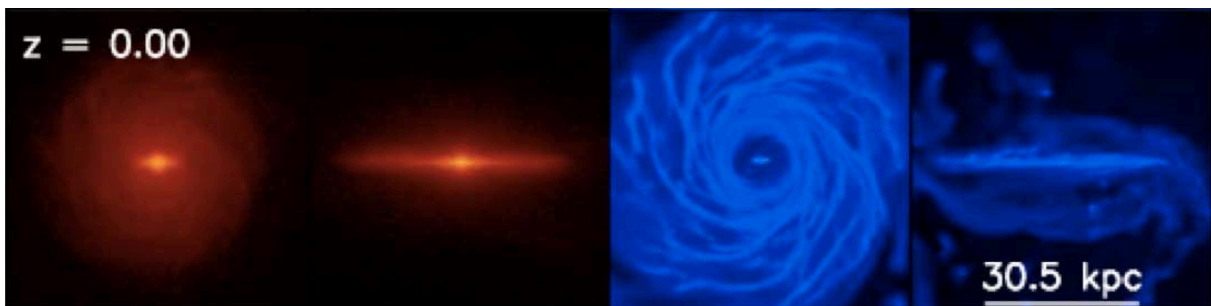
本年度、当グループスタッフは、FIRST プロジェクトを押し進めると共に、FIRST、T2K-Tsukuba を用いて、宇宙論的銀河形成シミュレーション、粒子法輻射流体による宇宙再電離シミュレーション、メッシュ流体用高速輻射輸送計算、大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長、ダークマターハローの内部構造：コアカスプ問題、アンドロメダの涙とさざめき、銀河系中心領域の特異な物理環境が分子雲形成に与える影響、6次元 Vlasov 方程式による自己重力系数値シミュレーションの研究を行った。さらに、AVX 命令版 Phantom-GRAPE の開発、HA-PACS に向けたアプリケーションの開発、「京」を用いた銀河形成シミュレーションを行った。また、宇宙・生命・物性・原子核分野連携で星間空間における光誘起 L 型アミノ酸過剰の理論的研究を行った。

また、プレ戦略イニシアティブ「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」（代表者森正夫）の継続が採択され、輻射流体力学実現のための演算加速器を搭載した並列計算機システム構築を開始し、プロトタイプ制作を行った。

【2】 研究成果

(1) 宇宙論的銀河形成シミュレーション

ガスの冷却や星形成、超新星爆発等の物理過程を取り入れた宇宙論的銀河形成シミュレーションを用いて以下のような研究を行った (i) 遠方宇宙の星形成銀河であるライマンアルファエミッターやサブミリ波で明るく輝くサブミリ銀河の物理的性質を明らかにした (Shimizu et al. 2012ab)。 (ii) 銀河系サイズの銀河を高分解能な宇宙論的シミュレーションで形成し、衛星銀河の性質を調べた。その結果、光度関数を再現すると、シミュレーションで得られた力学的質量が実際のそれよりも大きくなることが明らかになった。これは CDM モデルそのものに問題があるか、現在のシミュレーションではバリオンがダークハローの構造に与える影響を適切に評価できていないことを示唆する (Parry et al. 2012)。 (iii) 同様のシミュレーションを用いて銀河系バルジの形成について調べ、擬バルジと呼ばれる構造が今まで考えられていたような円盤の永年進化ではなく高赤方偏移の爆発的星形成で形成されるという新しい描像を提案した (Okamoto 2012)。 また、様々なグループ間での銀河形成モデルを比較するプロジェクトにも参加した (Scannapieco et al. 2012)。



(2) 粒子法輻射流体による宇宙再電離シミュレーション

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したと考えられている。クエーサー吸収線系を利用した観測(e.g., Fan et al. 2006)では、 $z=6$ 程度ではすでに宇宙は高度に電離されている事が示されているが、この宇宙再電離過程がいつ始まり、どのように進んだかは未だ明らかではない。

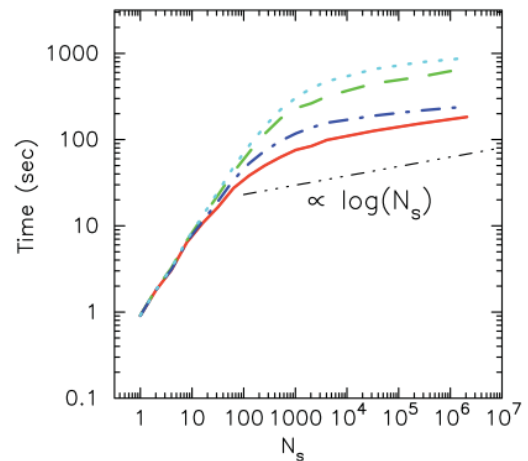
宇宙再電離史を解き明かすには、銀河間空間への電離光子供給源である天体の形成史とそれに伴う電離領域の進化過程を同時に計算する必要があるが、この天体形成史自体に輻射性フィードバックが影響を及ぼす為、輻射流体計算が必要となる。このような計算では、多くの放射源を取り扱う必要がある為、非常に膨大な計算コストが要求される。そこで、我々は独自に開発したツリー構造を用いて高速に輻射輸送計算を行えるスキーム START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer) (Hasegawa & Umemura 2010)を宇宙論的輻射流体計算に対応できるように拡張し、これを用いて宇宙再電離シミュレーションを行った(Hasegawa & Semelin in prep.)。

シミュレーションの結果、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が分かった。この星形成の阻害は、低質量ハロー内のみならず $\sim 10^{10}$ 太陽質量の大質量ハロー内で

さえも顕著に起こる。得られた結果は、 $z=6-7$ での中性水素割合を特異な仮定をする事なく再現するが、一方でトムソン散乱に対する光学的厚みは WMAP 衛星の観測結果よりも小さな値を示した。この結果は、今回のシミュレーションでは分解できていない第一世代天体からの紫外線やブラックホールからの X 線などの輻射が宇宙初期での再電離史に強く寄与した事を示唆する。

(3) メッシュ流体用高速輻射輸送計算

メッシュ法を用いた輻射流体シミュレーションを高速に行うために、メッシュ上で効率良く輻射輸送を解くコード ARGOT (Okamoto et al. 2012) を開発した。粒子法用に開発された START と同様に Tree 構造を用いて遠方の光源を見込み角によってまとめることにより、光源数 N_s を $\log(N_s)$ に減らすことにより輻射輸送計算を高速化する。また問題によっては輻射輸送を解くメッシュも粗視化することによりさらなる並列化を行う。現在、京のような大規模並列計算機で効率良く動作するように並列化アルゴリズムの見直しを行なっている。



(4) 大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長

銀河中心には 10^6 から 10^9 太陽質量の巨大ブラックホールが存在するが、その起源は明らかにされていない。冷たいダークマターモデルに基づく階層的銀河形成シナリオでは、銀河はより小さな銀河の合体によって形成されるため、合体後の銀河には複数の巨大ブラックホールが存在することになるが、これは銀河中心に巨大ブラックホールが一つ存在するという観測事実と合致しない。我々は1つの銀河の中に取り込まれた複数の巨大ブラックホールがどのように進化するかを、宇宙シミュレータ FIRST を用いた高精度N体計算によってシミュレートした。その結果、銀河に取り込まれた巨大ブラックホールは星との力学的摩擦によって銀河中心に落ちて行き、ブラックホール3体相互作用の効率が増し、結果としてブラックホールの連続的合体成長によって中心に一つの巨大ブラックホールが形成されることを明らかにした。これは、FIRST を1年近く占有して得られた成果である。

(5) ダークマタ - 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)構造を预言する (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。

(6) 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。アンドロメダ銀河においては、SDSS 等の観測によって、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展してきており、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議論した。

(7) 銀河系中心領域の特異な物理環境が分子雲形成に与える影響

銀河系中心領域(ここでは、銀河系中心から半径で 600 光年以内とする)は、太陽系が存在する銀河系円盤部とはかなり異なった物理環境(星間磁場や星間輻射場の大きさ、宇宙線強度やシア率等)にあることが観測的に知られている。物理環境の違いが星形成サイトである分子雲の形成過程に与える影響を調べるため、本研究では特に磁場の役割に注目して、銀河系中心領域の分子雲形成の 3 次元磁気流体シミュレーションを行った。その結果、磁場によって超新星爆発によるガスの鉛直持ち上げ効果が抑制され、星形成率が磁場なしの場合に比べ大きくなるような磁場強度範囲があることがわかった。

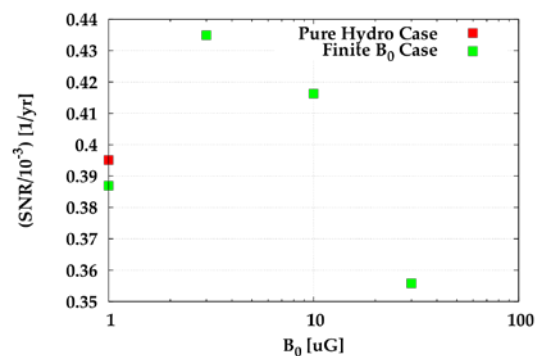


図: 超新星爆発率(星形成率の指標)の初期磁場強度への依存性。

(8) 6次元 Vlasov 方程式による自己重力数値シミュレーション

6 次元位相空間上での無衝突ボルツマン(Vlasov)方程式を直接数値的に解くことによって無衝突自己重力系の数値シミュレーションを行うことに世界で初めて成功した。また、この手法を宇

宙論的な共動座標系に拡張することによって宇宙の大規模構造形成のシミュレーションにも適用することが可能になった。位相空間をモンテカルロ的にサンプリングする N 体計算による数値シミュレーションと異なり、位相空間上の物質分布を連続体として計算するため、(i)人工的な二体緩和の影響を受けない、(ii)物理量がショットノイズで汚染されない、などのメリットがある。特に、無衝突減衰などの従来の N 体シミュレーションが苦手としてきた速度空間の物質分布に強く依存する物理過程を正確に解くことができるため、宇宙大規模構造形成におけるニュートリノダンピングなどの計算に応用できると期待される。

(9) AVX 命令版 Phantom-GRAPE

2011 年にリリースされた Intel の新型プロセッサ Sandy-Bridge で新たに実装された SIMD (Single-Instruction-Multi-Data)命令である Advanced Vector eXtension (AVX)命令セットを用いた、重力多体数値計算ライブラリ Phantom-GRAPE を開発し、これまでの SIMD 命令である Streaming SIMD Extension (SSE)命令セットを用いたものよりもより高速な演算を実現した。Phantom-GRAPE は、4 次エルミート積分を軌道計算に用いる高精度な衝突系重力多体用と、銀河や銀河団などの無衝突系用の 2 種類を開発し、Google Code で公開してある。

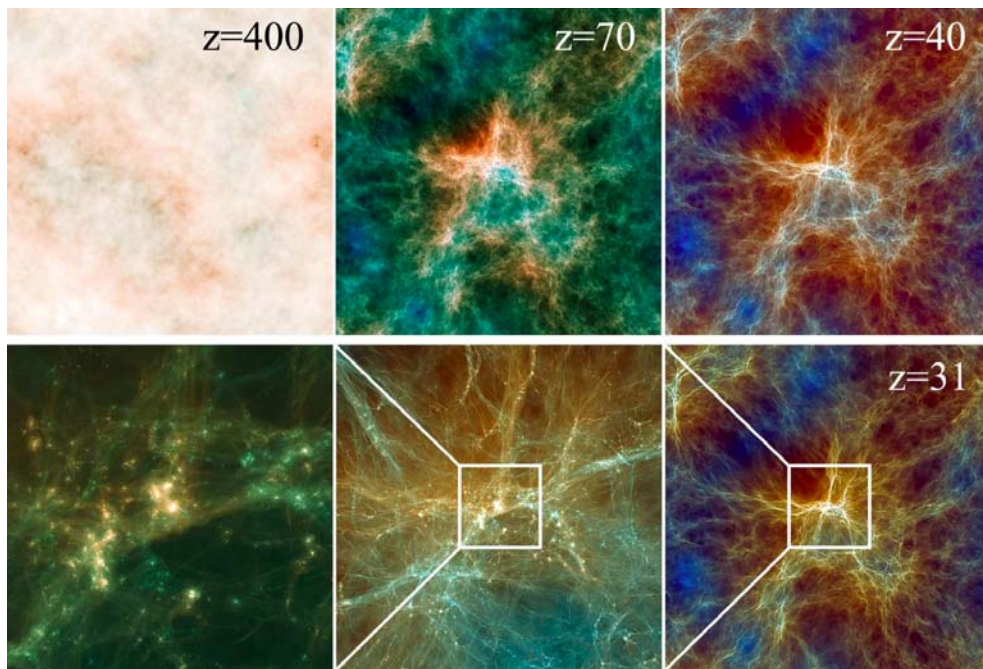
(10) HA-PACS に向けたアプリケーション開発

2012 年から運用を開始した筑波大学計算科学研究センターの新型スーパーコンピュータ HA-PACS での実行を念頭に置いた宇宙物理分野での数値シミュレーションのアプリケーション開発を行った。HA-PACS は 8 コアの Sandy Bridge を 2 ソケットと 4 基の GPU (M2090) を一つの計算ノードに搭載しており、このようなシステムで高い性能を発揮できるアプリケーションとして、衝突系自己重力多体計算と輻射流体計算を選定した。前者については以前の GRAPE システムの役割を GPU に担わせることで、これまでの数値シミュレーションの延長線上でさらに粒子数を増やすことでより現実的な星団の数値シミュレーションを実行することが可能である。後者については、主に計算コストの大きな輻射輸送部分の計算を GPU で実行することで、輻射輸送計算と流体力学計算をカップルさせて計算することが可能になると期待される。これらのアプリケーションについて HA-PACS の試験運用期間を利用して、コード開発及び性能評価を行った。

(11) 「京」を用いた銀河形成シミュレーション

ダークマターの密度ゆらぎが重力崩壊してできるハローと呼ばれる構造は、合体を繰り返しより大きなハローを形成し、その中で初代星や銀河などの天体を形成する。本研究の目的は大規模シミュレーションにより、このプロセスを最小のハローを正しく解いた上で追跡することで、その後の天体形成に多大な影響を及ぼす、ハローの構造形成メカニズムを理解することである。また太陽近傍のダークマターの微細構造を解明し、ダークマターの検出可能性について議論する。これは 2012 年度半ばに本運用が開始される「京」のグランドチャレンジの一つである。そのため 2011 年度は、まずシミュレーションコードの「京」上でのチューニングを進め、数万ノード

上で 40~50%の実行効率を達成した。そして 2012 年度に行う予定の本ランに向けて粒子数 2560^3 のテストシミュレーションを行った。



(12) 星間空間における光誘起 L 型アミノ酸過剰の理論的研究 (宇宙・生命・物性・原子核分野連携)

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。しかし、地球上の生命のアミノ酸を調べるとほとんど L 型しか使われていない。これを、鏡像異性体過剰という。鏡像異性体過剰は、19 世紀のパスツール以来 100 年以上にわたって謎になっている。地球上の生命体はなぜ L 型アミノ酸しか使わないのか、宇宙生物学ではその起源が宇宙空間にあると考えている。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のである。2010 年には、超高温の隕石からアミノ酸が発見され、隕石のアミノ酸は地球に大気圏通過の際に変成することなく落下することが分かった。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)で円偏光波が発見された。よって、原始太陽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。現在のところ宇宙空間ではアミノ酸前駆体しか観測されていないが、将来アミノ酸そのものが観測される期待もある。

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、まず光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 帯が重要であることを明らかにした。さらに、D型アミノ酸が光分解を起こす励起状態を突き止め、その解離ポテンシャルと解離反応経路を同定した。

【計算科学研究センター内異分野間連携】

星間空間円偏光波によるL型アミノ酸過剰の研究において、宇宙・生命・物性・原子核分野連携を行い、2012年日本天文学会春季年会にて成果発表を行った。(地球惑星科学連合大会(2012年5月)においても発表予定)

【社会貢献】

1. 日本天文学会公開講演会／全国同時七夕講演会開催
「宇宙探求への道」
2011年7月3日(日) 14:00-17:00 (つくば国際会議場エポカル)
2. 日本天文学会 2011年春季年会 記者会見
2011年6月13日(月) 14-16時 (国立天文台) 梅村雅之, 谷川衝
「合体で巨大化するブラックホール
—高精度シミュレーションが解き明かす巨大ブラックホールの謎—」
3. 第12回 林忠四郎記念講演会開催
2012年1月17日(火) 15:30-18:00 (筑波大学 大学会館 国際会議室)
4. SSH 生徒研究発表会 2011 (神戸国際展示場, 神戸市)
2011年8月10日～12日 川勝望
SSH 指定校の高校生に対して、理数学生応援プロジェクトの広報を行った。
5. 春の進学説明会・模擬授業 2012 (筑波大学 東京キャンパス文京校舎, 文京区)
2012年3月28日～30日 川勝望
理数学生応援プロジェクト参加学生による研究発表のポスター展示とプログラムの説明を行った。

【競争的資金獲得状況】

<代表者>

- ・基盤研究 (S) : 梅村 雅之 (代表者) (継続)
「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」 (1,240万円)
- ・基盤研究 (A) : 森 正夫 (代表者) (継続)
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」 (560万円)
- ・挑戦的萌芽研究 : 吉川 耕司 (代表者) (継続)

「6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション」(90万円)

- ・ プレ戦略イニシアティブ：森 正夫 (代表者) (新規)

「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」(500万円)

- ・ 研究活動スタート支援：川勝 望 (代表者) (新規)

「多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明」 (133万円)

<分担者>

- ・ 基盤研究 (A) : 梅村雅之 (分担者) (代表者：大内正巳) (新規)

「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」 (2.5万円)

- ・ 基盤研究 (A) : 森 正夫 (分担者) (代表者：大内正巳) (新規)

「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」 (2.5万円)

- ・ 基盤研究 (C) : 川口 俊宏 (分担者) (代表者：峰崎 岳夫) (継続)

「活動銀河核多波長モニターデータベースと活動銀河核変光・放射機構の研究」(10万円)

- ・ 挑戦的萌芽研究:川勝 望 (分担者) (代表者：長尾透) (新規)

「宇宙の「生きた化石」：現在の宇宙に潜む進化最初期の銀河と巨大ブラックホールの探査」
(15万円)

【学位論文】

<修士論文>

1. 遠藤 圭介

銀河中心ブラックホールからの輻射力による星間ダストガス雲の力学進化

2. 田中 賢

GPUを用いた輻射輸送方程式数値シミュレーション

<学士論文>

1. 大塚 拓也

星の種族合成モデルを用いたブルーコンパクト矮小銀河の星形成史の解析

2. 大山 裕介

無衝突ボルツマン方程式を用いた球対称ダークマターハローの数値計算

3. 桐原 崇亘

Numerical simulations of the Andromeda stellar stream

4. 鈴木 裕行

原始銀河形成の流体シミュレーション

5. 柳本 万智子

シュバルツシルト時空中の力学

6. 山井 勇樹

原始銀河ガス雲におけるブラックホールの力学進化

7. 我妻 徹

アンドロメダ銀河の質量に関する研究

【論文】

Refereed Papers

1. Akahori, T., Yoshikawa, K., 2011, Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Bullet Cluster 1E0657-56, Populations, Publ. Astron. Soc. Japan, in press
2. Doi, A., Nagira, H., Kawakatu, N., Kino, M., Nagai, H., Asada, K., Radio Galaxies in narrow-line Seyfert 1 galaxies, *Astrophysical Journal*, submitted
3. Godet, O., Plazolles, B., Kawaguchi, T., Lasota, J.-P., Barret, D., Farrell, S., Braito, V., Servillat, M., Webb, N., Gehrels, N. Investigating slim disk solutions for HLX-1 in ESO 243-49, *Astrophysical Journal*, in press (arXiv:1204.3461)
4. Hartquist, T. W., Wagner, A. Y., Falle, S. A. E. G., Pittard, J. M., & Van Loo, S. 2011, Cosmic rays and radiative instabilities, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 82, 836-841
5. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2011, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, *Astrophysical Journal*, 270, 120-131
6. Kawaguchi, T., Mori, M. 2011, Near-Infrared Reverberation by Dusty Clumpy Tori in Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, 737, 105-119
7. Kawakatu, N., Ohsuga, K. 2011, New Method for Exploring Super-Eddington AGNs by Near-infrared Observations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417, 2562-2570
8. Kino, M., Kawakatu, N., Takahara, F., 2012, Calorimetry of AGN jets: Testing Plasma Composition in Cygnus A, *Astrophysical Journal*, in press
9. Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Kousai, K., Nakamura, E., Horie, M., Fujii, T., Umemura, M., Mori, M., 2011, The Subaru Ly α blob survey: a sample of 100-kpc Ly α blobs at $z=3$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 410, L13-L17
10. Matsui, H., Saitoh, T. R., Makino, J., Wada, K., Tomisaka, K., Kokubo, E., Daisaka, H., Okamoto, T., and Yoshida, N., 2012, Origin of Multiple Nuclei in Ultraluminous Infrared

11. Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Saito, Y., Rich, M. 2012, Hunting a Wandering Black Hole in M31 Halo: Hermitage of Black Hole, *Astrophysical Journal Letters*, submitted
12. Miki, Y., Takahashi, D., Mori, M., 2012, A Fast Implementation and Performance Analysis of Collisionless N-body Code Based on GPGPU, *International Conference on Computational Science, ICCS 2012*, in press
13. Namekata, D., Habe, A., 2011, Evolution of a Nuclear Gas Disk and Gas Supply to the Galactic Center. I. Migration of Massive Gas Clumps, *Astrophysical Journal*, 731, 57-74
14. Ogiya, G., and Mori, M., 2011, The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback: Effects of Mass Loss, *Astrophysical Journal Letters*, 736, L2(5pp)
15. Okamoto, T., Yoshikawa, K., and Umemura, M., 2012, ARGOT: accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 2855-2866
16. Okamoto, T., 2012, The origin of pseudobulges in cosmological simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted (arXiv:1203.5372)
17. Parry, O. H., Eke, V. R., Frenk, C. S., and Okamoto, T., 2012, The baryons in the Milky Way satellites, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 3304-3318
18. Prokhorov, D. A., Dubois, Y., Nagataki, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., 2011, Unveiling the 3D temperature structure of galaxy clusters by means of the thermal Sunyaev-Zel'dovich effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 2505-2512
19. Prokhorov, D. A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Nagataki, S., Seon, K.-I., 2011, Can electron distribution functions be derived through the Sunyaev-Zel'dovich effect?, *Astronomy & Astrophysics*, 529, A39
20. Prokhorov, D. A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Million, E. T., Nagataki, S., Yoshikawa, K., 2011, A high-frequency study of the Sunyaev-Zel'dovich effect morphology in galaxy clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416, 302-310
21. Scannapieco, C., Wadepuhl, M., Parry, O. H., Navarro, J. F., Jenkins, A., Springel, V., Teyssier, R., Carlson, E., Couchman, H. M. P., Crain, R. A., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., Kobayashi, C., Monaco, P., Murante, G., Okamoto, T., Quinn, T., Schaye, J., Stinson, G. S., Theuns, T., Wadsley, J., White, S. D. M., and Woods, R., 2011, The Aquila comparison Project: The Effects of Feedback and Numerical Methods on Simulations of Galaxy Formation", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted (arXiv:1112.0315)
22. Scannapieco, C., Wadepuhl, M., Parry, O. H., Navarro, J. F., Jenkins, A., Springel, V.,

- Teyssier, R., Carlson, E., Couchman, H. M. P., Crain, R. A., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., Kobayashi, C., Monaco, P., Murante, G., Okamoto, T., Quinn, T., Schaye, J., Stinson, G. S., Theuns, T., Wadsley, J., White, S. D. M., and Woods, R., 2011, The Aquila comparison Project: The Effects of Feedback and Numerical Methods on Simulations of Galaxy Formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press (arXiv:1112.0315)
23. Shimizu, I., Yoshida, N., and Okamoto, T., 2011, Sub-millimetre galaxies in cosmological hydrodynamic simulations: Source number counts and the spatial clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted
 24. Shimizu, I., Yoshida, N., and Okamoto, T., 2011, Lyman α emitters in cosmological simulations - I. Lyman α escape fraction and statistical properties at $z=3.1$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418, 2273-2282
 25. Tanikawa, A., Yoshikawa, K., Okamoto, T., Nitadori, K., 2012, N-body simulation for self-gravitating collisional systems with a new SIMD instruction set extension to the x86 architecture, *Advanced Vector eXtensions, New Astronomy*, 17, 82-92
 26. Tanikawa, A., Hut, P., Makino, J. 2012, Unexpected Formation Modes of the First Hard Binary in Core Collapse, *New Astronomy*, 17, 272-280
 27. Tanikawa, A., Umemura, M., 2011, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *Astrophysical Journal* 728, L31-L36
 28. Tsuchiya, M., Mori, M., Nitta, S., 2012, Transonic solutions of isothermal galactic winds in a cold dark matter halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted
 29. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., 2012, Sub-millimetre brightness of early star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press
 30. Yamada, T., Nakamura, Y., Matsuda, Y., Hayashino, T., Yamauchi, R., Morimoto, N., Kousai, K., Umemura, M., 2012, Panoramic Survey of Lyman α Emitters at $z=3.1$, *The Astrophysical Journal*, in press
 31. Yamaoka, K., Allured, R., Kaaret, P., Kennea, J.A., Kawaguchi, T., Ghandi, P., Shaposhnikov, N., Ueda, Y., Nakahira, S., Kotani, T., Negoro, H., Takahashi, I., Yoshida, A., Kawai, N., 2012, RXTE Follow-up Observations of the Black Hole Candidate MAXI J1659-152 Discovered by MAXI and Swift, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 64, 32 [15 pages]

Non-Refereed Papers

1. Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Rich, M.R., 2012, Interaction between M31 and the Progenitor Dwarf Galaxy of the Andromeda Stellar Stream, *Astronomical Society of the Pacific (ASP) Conference Series*, in press

2. Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., and Yoshida, N., 2011, "Shock-induced star cluster formation in colliding galaxies", Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium 270, eds. Joao Alves, Bruce G. Elmegreen, Josep M. Girart, Virginia Trimble, 270, 483-486
3. Ogiya, G., and Mori, M., 2012, The Core-Cusp problem in CDM halos and supernova feedback, Astronomical Society of the Pacific (ASP) Conference Series, in press

【著書】

1. 梅村雅之（共著），岩波講座 計算科学 第2巻「計算と宇宙」

【解説記事】

1. 岡本崇，主役はどちら？ 銀河と共に育つ超巨大ブラックホール，科学（岩波書店），2011，Vol. 81 No. 4, 330-340

【集中講義】

1. 梅村 雅之：北海道大学
輻射輸送・輻射流体サマースクール 2011（2011年8月18日～20日，北海道大学，札幌市）
2. 梅村 雅之：千葉大学
輻射輸送・輻射流体力学（2011年10月31日，千葉大学，千葉市）

【研究会開催】

1. 初代星形成・初代銀河研究会
2011年12月20日～22日，九州大学，福岡市
2. ワークショップ 「巨大ブラックホールの起源」
2012年2月24日～25日，筑波大学，つくば市
3. ミニワークショップ 「Astrophysical GPU Mini-workshop in University of Aizu」
2012年2月17日 会津大学

【座長】

1. 川勝望
日本天文学会"活動銀河核"日本天文学会春季年会，龍谷大学，2012年3月19日～22日

【国際会議発表・海外講演】

1. Okamoto T., 2011, Cosmological Disk Galaxy Formation, Galaxies in the Dark, (July 31 - August 4, 2011, Cafayate Salta, Argentina) (Invited)
2. Tanikawa, A., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, Single and Double Black Holes in Galaxies, Aug 22-25, 2011, Michigan, USA)
3. Kawakatu, N., Wada, K., Growth of supermassive BHs and mass supply processes from galaxies, Starburst-AGN Connection under the Multiwavelength Limelight (Sep.14-16, 2011, Madrid, Spain)
4. Kawaguchi, T. and Mori, M., Near-Infrared Emission from Dusty Clumpy Tori in AGNs, Through the Infrared Looking Glass (October 3-5, 2011, Pasadena, USA)
5. Kawaguchi, T., Near-Infrared Emission from Dusty Clumpy Tori in AGNs, Seminar talk at UCSB (October 7, 2011, Santa Barbara, USA)
6. Ogiya, G., and Mori, M., The Core-Cusp problem in CDM halos and supernova feedback, The 3rd Subaru International Conference, The 1st NAOJ Symposium "Galactic Archaeology - Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way" (Nov 1-4, 2011, Shuzenji, Japan)
7. Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Rich, R. M., Interaction between M31 and the Progenitor Dwarf Galaxy of the Andromeda Stellar Stream, The 3rd Subaru International Conference, The 1st NAOJ Symposium "Galactic Archaeology - Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way" (Nov 1-4, 2011, Shuzenji, Japan)
8. Kawakatu, N., AGN Outflow/Inflow with SKA, Workshop on East-Asian Collaboration for SKA (Nov.30-Dec.2, 2011, Daejeon, Korea) (Invited)
9. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Emission from Shells Associated with Dying Radio Sources, Workshop on East-Asian Collaboration for SKA (Nov.30-Dec.2, 2011, Daejeon, Korea)
10. Tanikawa, A., Unexpected Formation Modes of the First Hard Binary in Core Collapse, MODEST-11 (Dec 12-16, 2011, Leiden, Netherland)
11. Kawaguchi, T. and Mori, M., Near-Infrared Emission from Dusty Clumpy Tori in AGNs, Growing black holes in COSMOS (February 13-14, 2012, IPMU (Tokyo U), Kashiwa, Japan)
12. Kawakatu, N., Coevolution Model of SMBHs and Nuclear Starbursts, Colloquium of Astronomy Program at SNU (March 8, 2012, Seoul, Korea)
13. Miki, Y., Mori, M., and Kawaguchi, T., Suppression of Black Hole Activity due to Galactic Merger, The 5th Korea-Japan Young Astronomers, Meeting (February 22-24, 2012, Seoul, Korea)

【国内講演】

<招待講演>

1. 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス」, 談話会 (2011年6月10日, 名古屋大学, 名古屋市)
2. 岡本崇, 「銀河形成シミュレーション」, 滞在型研究会「全天体形成」(2011年8月1~31日, 北海道大学, 札幌市)
3. 吉川耕司, 「無衝突ボルツマン方程式の直接数値計算による無衝突自己重力系の数値シミュレーション」, 滞在型研究会「全天体形成」(2011年8月1~31日, 北海道大学, 札幌市)
4. 石山智明, 「大規模N体シミュレーションの未来」, 滞在型研究会: 全天体形成(2011年8月1~31日, 北海道大学, 札幌市)
5. 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス」, 滞在型研究会「全天体形成」コンパクト天体・活動銀河セッション, (2011年8月4日, 北海道大学, 札幌市)
6. 川勝 望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり, 「筑波大学「理数学生応援プロジェクト」と大学での科学教育」, 日本科学教育学会(2011年8月23日~25日, 東京工業大学, 横浜)
7. 川口俊宏, 「TMTの高空間分解能で探る活動銀河核のfeeding, feedback, coevolution」, 「TMTサイエンス検討報告会: 日本独自のサイエンス提案とその実現のために」会議(2011年9月5日, 京都大学, 京都市)
8. 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス」, 談話会 (2011年10月18日, 東北大学, 仙台市)
9. 岡本崇, CDM 宇宙での pseudo-bulge の形成, JASMINEサイエンスワークショップ(2011年11月10日~12日, 北海道支笏湖)
10. 梅村雅之, 「AGNサーベイによるサイエンスの展望」, HSC活動銀河核探査によるサイエンス(2011年11月16日~18日, 京都大学, 京都市)
11. 川口俊宏, 「Luminosity and mass functions through HSC data」, HSC活動銀河核探査によるサイエンス(2011年11月16日~18日, 京都大学, 京都市)
12. 石山智明, 「準解析的モデルで用いるN体シミュレーションの詳細」, HSC活動銀河核探査によるサイエンス(2011年11月16日~18日, 京都大学, 京都市)
13. 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス」, 談話会 (2012年1月23日, 広島大学, 東広島市)
14. 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス」, 談話会 (2012年2月9日, 信州大学, 松本市)
15. 石山智明, 「スーパーコンピュータ"京"による, 天文シミュレーション」, 第10回HSSワークショップ「スーパーコンピュータ "京" でせまる最先端の科学・技術」(2012年2月17日, 北海道大学, 札幌市)
16. 森正夫, 「アンドロメダの涙」, 国立天文台談話会(2011年12月16日, 国立天文台, 三鷹市)

<一般講演>

17. 谷川衝, 「Unexpected Formation Modes of the First Hard Binary in Core Collapse」, MODEST-10c: Algorithms and Applications of gravitational N-body simulation, (20

- 11年8月1日～9月17日，神戸大学，神戸市)
18. 梅村雅之，「初代星形成の輻射流体力学」，輻射輸送・輻射流体サマースクール2011 (2011年8月18日～20日，北海道大学，札幌市)
 19. 森正夫，「アンドロメダの涙とさざめき」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 20. 吉川耕司，谷川衝，似鳥啓吾，岡本崇，「新しい SIMD 拡張命令セット Advanced Vector eXtensions を用いた高性能無衝突系 N 体計算ライブラリの開発」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 21. 川口俊宏，森正夫，「活動銀河核の光と影：ダストトーラスの自己掩蔽」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 22. 三木洋平，森正夫，川口俊宏，「銀河衝突の活動銀河中心核への影響：活動抑制が起こる条件の導出」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 23. 扇谷豪，森正夫，「ダークマターハローの周期的バリオン重力場変動への力学応答」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 24. 土屋聖海，森正夫，新田伸也，「球対称定常銀河風の遷音速解：銀河の質量密度分布との関係」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 25. 桐原崇亙，三木洋平，森正夫，「アンドロメダストリームとダークマターハローの外縁構造の解析」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 26. 濟藤祐理子，三木洋平，川口俊宏，森正夫，「Detectability of the Wandering Black hole in M31 Halo」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 27. 谷川衝，吉川耕司，岡本崇，似鳥啓吾，「新しい SIMD 拡張命令セット：Advanced Vector eXtensions を用いた衝突系 N 体シミュレーションコードの開発」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 28. 石山智明，牧野 淳一郎，Simon Portegies Zwart, Cosmogrid Project team, 「The Cosmogrid Simulation II: 異機種混合宇宙論的N体シミュレーション」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 29. 長谷川賢二，Benoit Semelin，「輻射流体計算で探る宇宙再電離」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 30. 行方大輔，「磁場とFUV加熱率がCentral Molecular Zoneの構造と星間ガスの統計的性質に与える影響」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 31. 安部牧人，久保田明夏，梅村雅之，米徳大輔，「Swift GRB光度曲線の性質について：(1) フーリエ&自己相関解析」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
 32. 久保田明夏，安倍牧人，梅村雅之，米徳大輔，「Swift GRB 光度曲線の性質について：(2)赤方偏移データを用いた統計解析」，日本天文学会秋季年会 (2011年9月19

- 日～22日，鹿児島大学，鹿児島市)
33. 川勝 望，紀 基樹，「LOFAR/SKAで探る活動銀河核ジェットからの熱的シンクロトロン放射」，日本天文学会秋季年会（2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市）
 34. 紀 基樹，伊藤 裕貴，川勝 望，M. Orienti，「電波ダークなミニAGNシェル：新しいTeVガンマ線源の可能性」，日本天文学会秋季年会（2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市）
 35. 伊藤 裕貴，紀 基樹，川勝 望，「死んだ電波ローブを取り囲むシェルからの非熱的放射」，日本天文学会秋季年会（2011年9月19日～22日，鹿児島大学，鹿児島市）
 36. 岡本崇，「円盤銀河のバルジの形成過程」，第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 37. 川口俊宏，「活動銀河核ダストトーラスの近赤外線放射モデル」，第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 38. 長谷川賢二，Benoit Semelin，「Self-regulated Reionization by Radiation-Hydrodynamic Simulations」，第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 39. 谷川衝，「新しいSIMD拡張命令セット：Advanced Vector eXtensions を用いた衝突系N体シミュレーションコードの開発」，第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 40. 行方大輔，「磁場と星間輻射場がCentral Molecular Zoneにおける星形成率に与える影響」第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 41. Wagner Alexander，「Hydrodynamic simulations of relativistic AGN jet feedback」，第24回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」（2011年11月5～7日，国立天文台，三鷹市）
 42. 谷川衝，「巨大ブラックホール多体系でのブラックホール合体成長に伴う銀河中心構造の進化」，JASMINEサイエンスワークショップ（2011年11月10日～12日，北海道支笏湖）
 43. 梅村雅之，「小型JASMINEによるサイエンス（まとめ）」，JASMINEサイエンスワークショップ（2011年11月10日～12日，北海道支笏湖）
 44. 川勝 望，「超巨大ブラックホール進化モデルの現状と今後の課題」，HSC活動銀河核探査によるサイエンス（2011年11月16日～18日，京都大学，京都市）
 45. 峰崎岳夫，坂田悠，諸隈智貴，小久保，越田進太郎，鮫島寛明，川口俊宏，「活動銀河核変光の紫外線可視放射の多波長相関」，HSC活動銀河核探査によるサイエンス（2011年11月16日～18日，京都大学，京都市）
 46. 川口俊宏，「活動銀河核ダストトーラスの構造」，第4回クエーサー吸収線研究会（2011年12月11日，信州大学，松本市）
 47. 長谷川賢二，Benoit Semelin，「三次元輻射流体計算で探る再電離期の宇宙」，初代星形成・初代銀河研究会（2011年12月20日～22日，九州大学，福岡市）

48. Wagner Alexander, 「AGN jet - ISM interactions in high redshift radio galaxies」, 初代星形成・初代銀河研究会 (2011年12月20日～22日, 九州大学, 福岡市)
49. 安部牧人, 久保田明夏, 梅村雅之, 米徳大輔, 「Swift GRB光度曲線に基づくGRBのzの決定およびGRB光度曲線の性質について」, 初代星形成・初代銀河研究会 (2011年12月20日～22日, 九州大学, 福岡市)
50. 梅村雅之, 「研究会サマリ」, 初代星形成・初代銀河研究会 (2011年12月20日～22日, 九州大学, 福岡市)
51. 石山智明, 「ダークマターハローの中のサブハロー分布」, 2011年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト・ユーザーズミーティング (2012年1月17日～18日, 国立天文台, 三鷹市)
52. 佐藤皓允, 庄司光男, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二, 「星間空間におけるアミノ酸キラリティ生成機構の理論的研究」, ALMAワークショップ (宇宙と生命) (2012年1月21日, 国立天文台, 三鷹市)
53. 三木洋平, 「GPGPUによる無衝突系N体計算の高速化」, Astrophysical GPU Mini-workshop in University of Aizu (2012年2月17日, 会津大学, 会津市)
54. 梅村雅之, 「銀河スケールからの巨大BH形成理論の構築に向けて」, ワークショップ「巨大ブラックホールの起源」 (2012年2月24日～25日, 筑波大学, つくば市)
55. 川口俊宏, 三木洋平, 森正夫, 「銀河衝突に伴う巨大ブラックホールの進化」, ワークショップ「巨大ブラックホールの起源」 (2012年2月24日～25日, 筑波大学, つくば市)
56. 川勝望, 和田桂一「超巨大BHと銀河の共進化モデル構築へ向けて」, ワークショップ「巨大ブラックホールの起源」 (2012年2月24日～25日, 筑波大学, つくば市)
57. 尾崎忍夫, 宮崎聡, 山下卓也, 田中陽子, 服部堯, 岡田則夫, 三ツ井健司, 福嶋美津広, 川口俊宏, 松田有一, 斎藤智樹「Development of FOCAS IFU」, すばるユーザーズミーティング (2012年2月28～3月1日, 国立天文台, 三鷹市)
58. 川口俊宏, 森正夫, 「ダストトーラスと降着円盤の軸不一致が引き起こす放射特性」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日～22日, 龍谷大学, 京都市)
59. 森正夫, 桐原崇亘, 三木洋平, 川口俊宏, 濟藤祐理子, Rich, M.R., 「アンドロメダのリングと涙」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日～22日, 龍谷大学, 京都市)
60. 濟藤祐理子, 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 川勝望, 川口俊宏, 長尾透, 松岡健太, 今西昌俊, 美濃和陽典, 大井渚, 今瀬佳介, 「Cosmological Evolution of SMBH mass-Bulge mass Relation investigated by SDSS QSOs at $z \sim 3$ 」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日～22日, 龍谷大学, 京都市)
61. 小田寛, 川口俊宏, 「光学的に薄い磁気圧優勢二温度降着円盤モデルの明るいHard-to-Soft遷移への適用」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日～22日, 龍谷大学, 京都市伏)
62. 佐藤皓允, 庄司光男, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二, 「星間空間における光誘起L型アミノ酸過剰の理論的研究」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日～22日, 龍谷大学,

京都市)

63. 桐原崇亘, 森正夫, 「アンドロメダストリームの非対称構造」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日~22日, 龍谷大学, 京都市)
64. 岡本崇, 「宇宙論的 pseudobulge 形成」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日~22日, 龍谷大学, 京都市)
65. 川勝望, 和田桂一, 「銀河からのガス供給過程の多様性と超巨大ブラックホール成長との関係」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日~22日, 龍谷大学, 京都市)
66. 土居明広, 柳楽央至, 川勝望, 紀基樹, 永井洋, 浅田桂一「狭輝線セイファート1型銀河の電波銀河の発見」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日~22日, 龍谷大学, 京都市)
67. 田中賢, 吉川耕司, 岡本崇, 梅村 雅之, 「GPUを用いた輻射輸送シミュレーションの高速化」, 日本天文学会春季年会 (2012年3月19日~22日, 龍谷大学, 京都市)

I V. 宇宙観測グループ

教 授	中井 直正
講 師	瀬田 益道
準研究員	宮本 祐介
大学院生	14名（数理解物質科学研究科後期課程5名、前期課程9名）
卒 研 生	6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継続するとともに、オリオン分子雲や銀河面のアンモニア掃天観測など大規模な観測を継続している。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1.2mサブミリテラヘルツ望遠鏡の開発を開始した。共同利用の望遠鏡を用いて銀河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

20GHz帯観測システムの右円偏波中間周波数部において0-1GHzに周波数変換を行う第2局部発振器を位相誤差の少ない高精度発振器に交換してVLBI左右円偏波同時観測を可能とした。また右円偏波用に広帯域デジタル分光計を追加してアンモニア(J,K)=(6,6)まで左右円偏波で同時観測可能とした。

無停電電源装置（ノイズカットUPS）と過大電流遮断器（ノイズカットトランス）を設置して落雷対策を行った。

受信機出力のゲイン変動の原因を調査し、同軸ケーブルの温度変化に起因することを明らかにした。そこで当該ケーブルを断熱材でおおうことにより温度変化を減らし、ゲイン変動を大幅に減らして観測効率を向上させた。

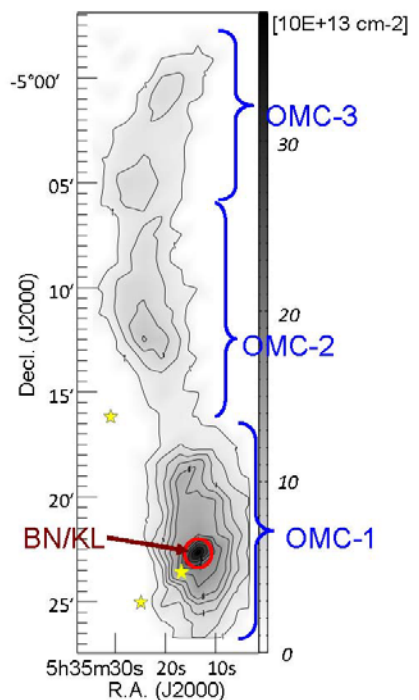
アンテナを目的天体の方向に正確に向けるため、アンテナの指向誤差を計算によって自動的に求めるシステムを製作し指向誤差測定の精度向上と効率化を図った。

10月頃からアンテナの利得が大幅に低下していることが明らかになり、観測が不可能となった。国土地理院やメーカーとその原因を追究したところ、副鏡を支えている支持構造（足）4本のうち1本に非常に大きな亀裂と対角側の1本に小さな亀裂が入っていることがわかり、アンテナを傾けるに従って支持構造が変形して副鏡の位置が適性な位置から大きくずれるためであるとわかった。そこで3月に支持機構に補修を行って副鏡を正常に位置に固定したところ利得はほぼ元に戻った。

(2) 観測

オリオン分子雲のアンモニアのNH₃ (J,K)=(1,1)-(6,6)輝線の掃天観測が終了した。これらの輝線強度比から星形成の母体である分子雲の励起温度、

図1. オリオン分子雲のパラアンモニアの柱密度



柱密度、オルソ・パラ比、アンモニア分子が生成されたときの過去の温度などの分布を初めて求めることができた(図1)。その結果、励起温度(現在の温度)は分子雲の外縁で高く、外にある高質量高温星からの輻射で温められていることが非常にきれいな結果として得られた。一方、オルソ・パラ比から導出されたアンモニア分子が生成されたときの過去の温度の分布は反対で、分子雲の内部の方が高く、また全体にわたって励起温度(現在の温度)よりも低いことが世界で初めて明らかになった。この結果は、オリオン分子雲で現在存在している星はこの領域で初めて形成された星であり、それ以前には星形成はおきていなかったという星形成史を初めて示した。この結果は画期的であり、大学院後期課程の院生の博士論文として非常に高く評価され、研究科長賞を得ることとなった。現在、査読論文として投稿しつつある。

天の川の銀河面のアンモニアの NH_3 (J,K)=(1,1)-(6,6)輝線の掃天観測は引き続き継続中である。

【2】南極天文学の推進

(1) 南極望遠鏡の開発

南極大陸内陸部の高原地帯ドームふじ基地でのサブミリ・テラヘルツ波観測を目指して、30cm 望遠鏡及び1.2m 望遠鏡の開発を行っている。プロトタイプとなる30cm 可搬型望遠鏡は、天の川を一酸化炭素 CO (J=4-3)及び中性炭素原子 CI 輝線を用いて掃天観測を行う望遠鏡である。これまでの試験観測で問題となっていた定在波や発電機システムの不具合を解消した後、チリ北部の砂漠地帯のパリナコッタ村でオリオン分子雲の観測を実施した。悪天候やポインティングシステムで問題が生じ、実観測時間は十分には得られなかったが、オリオン分子雲の広域観測に成功した。また、南極での低温下での運用に向けたケーブルや電子機器の低温試験を実験室で行い、ヒータの増強、断熱材配置の最適化、硬化の小さいケーブルへの交換により、南極夏期のマイナス 40°C での運用の目処が立った。さらに、国立天文台の協力を受け、大型干渉計ALMAで開発された、超伝導ミキサの供給を受け、受信機の更新を行った。伝送光学系の鏡の枚数の削減やミキサー性能の向上により、ポインティング性能や望遠鏡観測感度の向上が期待できる。

1.2m 望遠鏡は、天の川及び近傍銀河の CO (4-3)、 CI 及び連続波のダスト放射を用いての観測を目指した望遠鏡である(図2)。30cm 望遠鏡に続き、10m 級望遠鏡設置を視野に入れて、南極での実運用の経験を蓄積することも目的に開発している。主鏡鏡面精度、駆動モータの低温下での運用、伝送光学系、強度校正装置、昼間のポインティングシステム等に関して、基礎実験と設計を実施した。



図2. 1.2-m 望遠鏡

(2) 超伝導電波カメラの開発

南極ドームふじ基地に建設を計画しているサブミリ波望遠鏡へ搭載する超伝導ミリ波サブミリ波カメラの開発を行っている。ミリ波サブミリ波カメラは、平面アンテナと高純度多結晶シリコンレンズを1素子1レンズで結合する光学系を採用している。検出器にはアルミニウムを用いたMKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)を使用する。超伝導転移温度である1 K以下での実験が必要となるため、 ^3He 吸着型冷凍機を使用した冷却システムを整備し、ビームパターン(カメラの感度分布)測定のための入射窓を開けた状態で最低到達温度 300 mK 、持続時間約8時間を達成した。

国立天文台先端技術センターのMEショップにて製作した高純度多結晶シリコンレンズアレイと平面アンテナを結合したMKIDアレイを組み合わせて 220 GHz 帯9素子カメラを開発し、 220 GHz 帯のビームパターン測定を行った。結果、3 dBビーム幅は約 20° であり、実験とシミュレーションがよく一致することを確かめた。また、100素子へ拡張するため100素子シリコンレンズアレイ

を開発し、440GHz帯100素子カメラの検出器評価も行った。

【3】銀河の観測的研究

野辺山 45m 電波望遠鏡および IRAM30m 電波望遠鏡を用いて赤方偏移 $z=0.405\sim 1.802$ にある電波銀河の CO および HCO⁺の吸収線の上限值を得た (査読論文 1)。

野辺山 45m 電波望遠鏡で観測した棒渦巻銀河 Maffei 2 の一酸化炭素 CO(J=1-0)のマッピング観測のデータを解析して棒状構造における分子ガスと星形成の関係を明らかにした (査読論文 2)。棒状部分では CO 強度が強いにもかかわらず星形成があまり起きていないことが前から問題になっておりその原因がはっきりしていなかった。本研究で、棒状部分にある分子ガスは速度分散が大きく分子雲が重力的に収縮状態にないことと CO 強度から H₂分子の量への換算係数がこの領域では小さいこと (分子ガスの量を過大に見積もっていたこと) が原因であることがわかった。

2型セイファート/LINER である棒渦巻銀河 IC2560 の水メーザーのシステム速度成分の速度を野辺山 45m 電波望遠鏡でモニターしたところ $\langle a \rangle = +2.57 \pm 0.04$ km/s/yr の変化 (加速度) が観測された。またこの水メーザーの空間分布を米国 VLBA で測定し、水メーザー円盤がケプラー回転していると仮定し、上記 45m 電波望遠鏡の結果と組み合わせて解析したところ、この銀河の中心にある水メーザー円盤の半径が $r=0.087\text{-}0.335$ pc、厚みが $2H<0.025$ pc であり、中心に太陽の 350 万倍の質量の巨大質量ブラックホールがあることがわかった (図 3)。またこの銀河までの距離が $31+12\text{-}14$ Mpc と求めた (査読論文 3)。

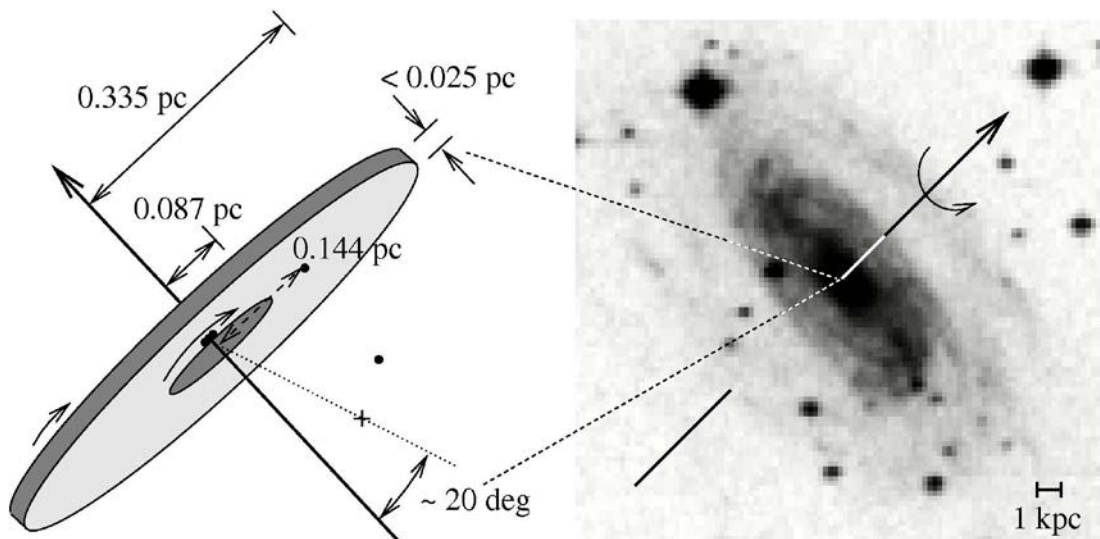


図 3. (左) 棒渦巻銀河 IC2560 の中心核に見つかった水メーザー円盤。(右) IC2560 全体の光学写真。

< 論 文 >

(査読論文)

1. Curran, S.J., Whiting, M.T., Combes, F., Kuno, N., Francis, P., Nakai, N., Webb, J.K., Murphy, M.T., Wiklind, T. “On the absence of molecular absorption in high redshift millimetre-band searches”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 416, 2143-2153 (2011).
2. Sorai, K., Kuno, K., Nishiyama, K., Watanabe, Y., Matsui, H., Habe, A., Hirota, A., Ishihara,

- Y., Nakai, N., “Properties of Molecular Gas in the Bar of Maffei 2”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, No.3, in press.
3. Yamauchi, Y., Nakai, N., Ishihara, Y., Diamond, P., Sato, N., “Water-Vapor Maser Disk at the Nucleus of the Seyfert 2 Galaxy IC 2560 and its Distance”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, accepted.

(国際研究集会集録等)

1. Davies, R.L., Gallagher, J.S., Combes, F., Courteau, S.J., Dekel, A., Franx, M.J., Jog, C.J., Jogee, S., Nakai, N., Rubio, M., Tacconi, L.J., Terlevich, E., “Commission 28: Galaxies”, Transaction IAU, Vol. 7, Issue T28, p. 255-259.

<学会発表>

1. 瀬田益道、宮本祐介、中井直正、萩原健三郎、善甫啓一、堀江雅明、秋山大樹、高柳星佳、榎原崇雄、Dragan SALAK、32m 鏡運用チーム
「つくば 32m 鏡による近傍銀河のアンモニア分子輝線観測」
日本天文学会 (2012 年 3 月 22 日、龍谷大学)
2. Dragan SALAK、中井直正、宮本祐介、山内彩、鶴剛
「The large-scale features of the molecular gas in M82」
日本天文学会 (2012 年 3 月 22 日、龍谷大学)
3. 大倉裕樹、瀬田益道、宮本祐介、石井峻、中井直正、荒井均、扇野光俊、長崎岳人、Dragan SALAK、二本松佳樹、他宇宙観測グループ
「南極サブミリ波望遠鏡の低温対策」
日本天文学会 (2012 年 3 月 20 日、龍谷大学)
4. 扇野光俊、中井直正、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ
「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡によるオリオン分子雲の観測」
日本天文学会 (2011 年 9 月 22 日、鹿児島大学)
5. Dragan SALAK、中井直正、宮本祐介、山内彩、鶴剛
「Large-field CO (J=1-0) observations of the starburst galaxy M82」
日本天文学会 (2011 年 9 月 20 日、鹿児島大学)
6. 今田大皓、宮田隆志、酒向重行、中村友彦、浅野健太郎、内山瑞穂、左近樹、尾中敬、和田武彦、中川貴雄
「シリコンの 30 μm 帯における反射防止用モスアイの開発」
日本天文学会 (2011 年 9 月 20 日、鹿児島大学)
7. 二本松佳樹、増田浩和、宮本祐介、瀬田益道、中井直正、石井峻、荒井均、扇野光俊、寺部佑基、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ
「同軸ケーブル伝送特性と 20GHz 帯受信機の安定性」
日本天文学会 (2011 年 9 月 20 日、鹿児島大学)
8. 長崎岳人、石井峻、瀬田益道、中井直正、宮本祐介、荒井均、扇野光俊、大倉裕樹、二本松佳樹、Dragan SALAK、関本裕太郎、永井誠、前澤裕之
「南極 30cm 望遠鏡用新小型 500GHz 帯受信機系の開発」
日本天文学会 (2011 年 9 月 20 日、鹿児島大学)
9. 新田冬夢、成瀬雅人、関本裕太郎、松尾宏、野口卓、鶴澤佳徳、岡田則夫、三ツ井健司、唐津謙一、関根正和、瀬田益道、中井直正

「超伝導共振器を用いたミリ波帯アレイ型検出器の評価」

日本天文学会 (2011年9月20日、鹿児島大学)

10. 寺部佑基、森正夫

「惑星状星雲の衝撃波模型」

日本天文学会 (2011年9月20日、鹿児島大学)

11. 指田朝郎、岡朋治、田中邦彦、松村真司、西川綾乃、瀬田益道、永井誠

「 HCO^+ J=1-0, CO J=3-2 輝線による W44 超新星残骸の膨張運動の解析」

日本天文学会 (2011年9月22日、鹿児島大学)

12. 市川隆、中井直正、高遠徳尚、沖田博文、本山秀明、南極天文コンソーシアム

「南極天文台の進捗状況」

日本天文学会 (2011年9月22日、鹿児島大学)

13. 高遠徳尚、沖田博文、市川隆、第53・52次南極観測隊ドームふじチーム、他南極天文コンソーシアム

「南極大陸での可降水量調査」

日本天文学会 (2011年9月22日、鹿児島大学)

14. 唐津謙一、成瀬雅人、新田冬夢、関根正和、関本裕太郎、野口卓、鵜澤佳徳、松尾宏、木内等

「宇宙背景放射偏光観測のための多素子超伝導共振器カメラの開発と実験室での実証試験」

日本物理学会 (2012年3月25日、関西学院大学)

15. 成瀬雅人、関本裕太郎、宮地晃平、鵜澤佳徳、新田冬夢、唐津謙一、関根正和、野口卓

「高品質 Al 膜を用いたミリ波超伝導共振器カメラの開発」

応用物理学会 (2012年3月17日、早稲田大学)

16. 関本裕太郎、成瀬雅人、新田冬夢、唐津謙一、日比康詞、関根正和、松尾宏、野口卓、鵜澤佳徳

「MKID-ミリ波サブミリ波検出器で拓く宇宙観測」

応用物理学会 (2011年8月29日、山形大学)

17. 成瀬雅人、関本裕太郎、宮地晃平、鵜澤佳徳、新田冬夢、野口卓

「エピタキシャル Al 膜を用いた Kinetic Inductance Detectors の作成と雑音特性評価」

応用物理学会 (2011年8月31日、山形大学)

<学位論文>

(博士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 扇野光俊

「Study of Interstellar Ammonia and Star Formation in the Orion Molecular Clouds」

(オリオン分子雲のアンモニアと星形成に関する研究)

(修士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 大倉裕樹

「南極テラヘルツ望遠鏡駆動部の低温対策」

2. 寺部佑基

「つくば 32m 電波望遠鏡におけるポインティングシステムの開発」

3. 二瓶亮太

- 「2 重量子井戸構造を用いた遠赤外線検出器の開発」
4. 二本松佳樹
「つくば 32m 電波望遠鏡受信機の安定化と大質量星形成領域 W51 のアンモニア輝線観測」

(卒業論文)

理工学群・物理学類

1. 鈴木康右
「南極電波望遠鏡用の傾斜計の性能評価」
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法の開発」
3. 北川和
「大質量形成領域 M17 における電離ガスの解析」
4. 菅谷元典
「南極 1.2m 電波望遠鏡受信機中間周波数部の開発」
5. 菅原寿元
「南極 1.2m 電波望遠鏡における強度校正装置の設計」
6. 藤田真司
「つくば 32m 電波望遠鏡による銀河系中心部のアンモニア輝線の解析」

<外部資金>

1. 科学研究費補助金（基盤研究 A）：中井直正（研究代表者）、瀬田益道
「天の川のアンモニア掃天観測」
（交付額 410 万円）（4/5 年）
2. 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 1550 万円）（2/4 年）
3. 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 34 万 9 千円）
4. 日本学術振興会「頭脳循環を活性化する若手研究者海外派遣プログラム」：中井直正（主担当研究者）、瀬田益道
「世界最高望遠鏡群を用いた宇宙観測」
（交付額 1446 万 2 千円）（2/3 年）
5. 国立極地研究所平成 22 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 270 万円）（2/6 年）
6. 国立極地研究所南極観測事業費（一般研究観測）：中井直正（研究代表者）、市川隆、瀬田益道、高遠徳尚、他
「南極からの赤外線・テラヘルツ天文学の開発」
（交付額 719 万円）（2/3 年）
7. 自然科学研究機構国立天文台：中井直正（研究代表者）
「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明」

- (交付額 598 万 4 千円)
8. 三菱財団助成：中井直正
「南極サブミリテラヘルツ望遠鏡の開発」
(交付額 210 万円) (2/2 年)

<共同研究・受託研究>

1. 「大学間連携 V L B I 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 (2011 年 4 月 1 日～2012 年 3 月 31 日)

<受賞>

1. 日本天文学会欧文研究報告論文賞 (2012 年 3 月 20 日)
Kuno, Nario; Sato, Naoko; Nakanishi, Hiroyuki; Hirota, Akihiko; Tosaki, Tomoka;
Shioya, Yasuhiro; Sorai, Kazuo; Nakai, Naomasa; Nishiyama, Kota; Vila-Vilaro, Baltasar,
“Nobeyama CO Atlas of Nearby Spiral Galaxies: Distribution of Molecular Gas in
Barred and Nonbarred Spiral Galaxies”, PASJ, Vol. 59, pp.117-166 (2007)
2. 筑波大学大学院数理物質科学研究科 2011 年度優秀論文賞 (後期課程) (2012 年 3 月 23 日)
扇野光俊、「Study of Interstellar Ammonia and Star Formation in the Orion Molecular
Clouds」(オリオン分子雲のアンモニアと星形成に関する研究)

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
大学院生 10 名

【1】時間依存密度汎関数理論による物質中の電子ダイナミクス計算

(1) 高強度パルス光と物質の相互作用を記述する第一原理マルチスケール・シミュレータの開発(矢花、杉山、篠原、乙部(原研)、G.F. Bertsch(Univ. Washington))

光とバルク物質の相互作用は、通常は巨視的マクスウェル方程式で記述され、物質の性質は誘電率などの線形感受率を通して反映される。ところが近年発展の著しい高強度超短パルス光と物質の相互作用では、強い光電場が引き起こす非線形電子ダイナミクスのために、もはや巨視的電磁場のダイナミクスと電子のダイナミクスを分離することができず、マクスウェル方程式と時間依存シュレディンガー方程式を結合して解くことが必要とされる状況にある。また、可視光領域の光の波長が μm 程度であるのに対し光電場が誘起する電子ダイナミクスの空間スケールは原子サイズと同程度の nm 以下であることから、これはマルチスケールの問題である。

本年度我々は、電子ダイナミクスに対して時間依存密度汎関数理論を用い、電子の運動を記述する時間依存コーン・シャム方程式と巨視的光電磁場の運動を記述するマクスウェル方程式を結合して同時に解き進める、マルチスケール・シミュレーションに取り組み、その定式化に成功し、最も単純な、バルク物質(Si 結晶)に直線偏光パルスが垂直に入射する場合について計算を行った(K. Yabana et.al, Phys. Rev. B85, 045134 (2012))。この枠組みは、弱い光電場の場合には電子ダイナミクスに摂動論を用いることで通常の誘電関数を用いた巨視的マクスウェル方程式に帰着するため、通常物質中の電磁気学を包含するものとなっている。

本枠組みは、巨視的電磁場を記述する各巨視的格子点において微視的電子ダイナミクスを計算するというマルチスケール計算であることから、極めて大規模な超並列計算が必要となる。本年行った1次元的な光伝播では 1,000 コアを用いて 10 時間程度の計算であるが、例えばカー効果による光の自己収束やファイラメンテーションなどの興味深い非線形光学現象を記述するには2-3次元の電磁波ダイナミクスを計算する必要がある。これには 10 万コア以上を用いた超大規模計算の遂行が必要となるため、現在京コンピュータを用いた高効率な大規模計算に取り組んでいる。巨視的格子点に関する隣接コア間の通信量は、ベクトルポテンシャルとカレントのみ(合わせて高々 48 バイト)であるため、本計算コードは極めて高効率な並列化が可能となる。実際これまで行った 30,000 コア程度の計算においても通信コストは僅かであり、実効効率も 20%程度の比較的良好な数値となることが確認されている。また、HA-PACS を用いたマルチ GPU 計算も予定しており、微視的電子ダイナミクスに対する GPU コードは作成済みであり、1CPU コアと比較して 15 倍程度の加速を確認している。今後、巨視的格子点に関しマルチ GPU 並列化を行った計算を予定している。

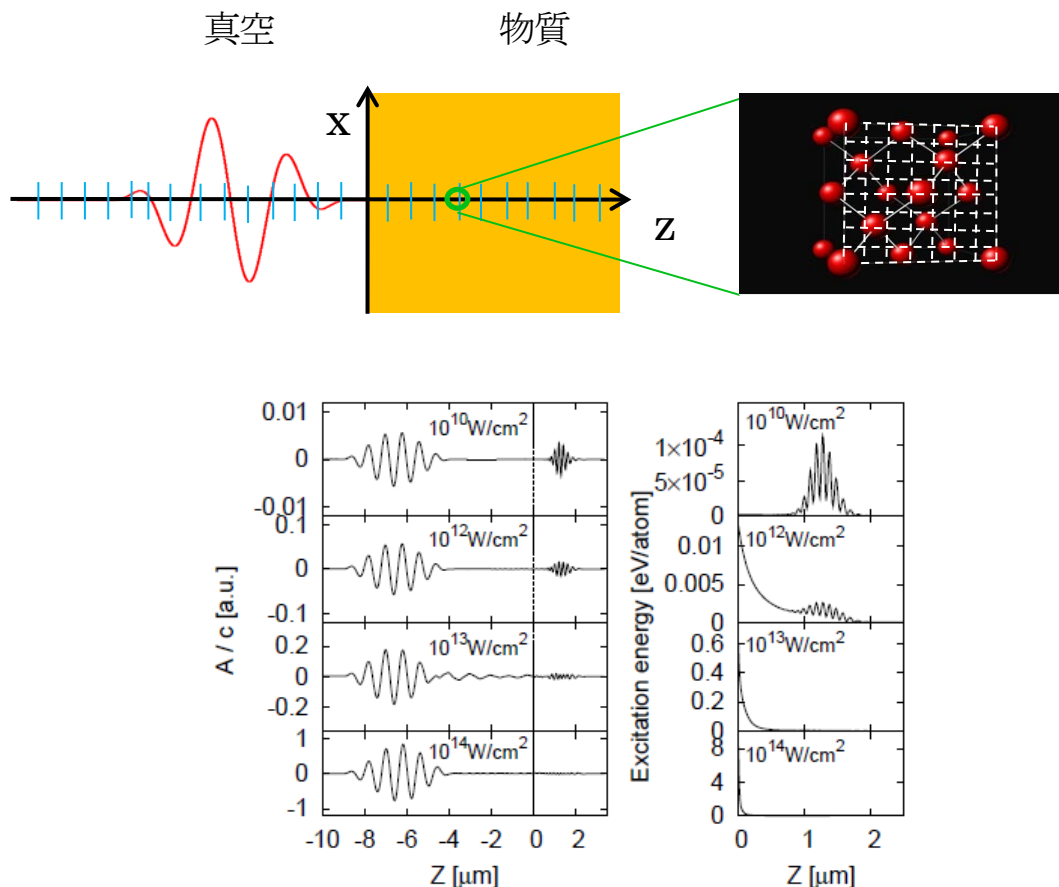


図1: (上) マルチスケール計算の模式図。巨視的電磁場を記述する物質中の各巨視的格子点毎に、結晶の単位胞を考え、微視的格子点を用いて電子ダイナミクスの計算を行う。(下) バルク Si にパルス光が入射した場合の光電場の様子と、物質内での電子励起エネルギーの分布。

(2) コヒーレントフォノンの生成機構に対する時間依存密度汎関数理論による研究(篠原、矢花、乙部(原研)、G.F. Bertsch(Univ. Washington))

固体中の光学フォノンの振動数に比べてパルス長の短い超短パルスレーザーを照射した際に起こる現象の一つにコヒーレントフォノンがある。我々は、時間依存密度汎関数理論に基づき、第一原理からコヒーレントフォノンの生成起源を解明することを試みた。これまで Si に対する解析を進め、パルス光の中心振動数と直接バンドギャップとの大小により、瞬間的誘導ラマン機構、及び共鳴ラマン機構・核平衡位置の変化による変位機構が定量的に記述されることを明らかにしてきた。

コヒーレントフォノンの実験的測定は、Sb/Bi 等の半金属物質に対して数多く行われており、本年は Sb に対する計算を進めた。実験的には、2つの光学フォノンモード(A_{1g} と E_g モード)に対して、異なる機構(瞬間誘導ラマン型と実励起型)が混在することが報告されているが、これまでの予備的解析では両方のモードに対して実励起型という結果となっている。

(3) PAW 法を用いたアト秒電子ダイナミクスの記述(佐藤、杉山、篠原、矢花)

パルス光による超高速測定の前線は、アト秒 X 線パルスを用いたアト秒(10^{-18} s)スケールの実時

間計測に広がっている。この時間スケールは、古典原子模型での水素原子の電子軌道周期である1原子単位に相当しており、電子波束ダイナミクスの実時間計測を目指した実験研究が進展している。これらの実験研究では内殻電子の励起が観測の対象となっており、内殻電子の実時間ダイナミクスを記述することができる理論計算の枠組みが必要とされている。

従来我々が発展させてきた実時間・実空間計算法では擬ポテンシャルを用いているため、そのままでは内殻電子のダイナミクスを記述することができない。実空間格子表現を用いて内殻電子の波動関数を記述することができる理論として、PAW法(Projector Augmented Wave method)が知られており、本年度この方法を我々の計算コードに導入した。試験的な計算として、簡単な分子の内殻励起(X線吸収)スペクトルに対する実時間線形応答計算を行い、従来行われていた連分数展開によるスペクトルの計算結果と一致することを確認した。現在、原子に対するフェムト秒パルスとアト秒パルスのポンプ・プローブ実験に対応する計算の検討を進めている。

【2】原子核の励起に対する時間依存平均場理論

(1) Gogny力を用いた時間依存平均場計算(橋本)

時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (TDHFB) は Skyrme 型有効核力を利用して計算が実行される場合が多い。われわれは、Gogny型相互作用を利用したTDHFB計算を進めてきた。ここでは、Gogny型有効相互作用を用いた場合には基底空間のカットオフが自然に導入される点を利用している。数値計算のコードは調和振動子基底を用いている。現在は、線形応答計算と非線形緩和現象についての計算を進めている。

線形応答計算では、酸素からチタンなどの比較的小さな核の領域を対象にアイソベクトル型双極子振動とアイソスカラー型四重極振動の強度関数を蓄積している。これは、対相関を含めたより実際的な励起スペクトルの系統的な計算につながるものである。より重い核の領域での系統的な計算に向けて、矢花・寺崎両氏の協力を得て数値計算コードの改良を進めている。

非線形領域では、時間に依存した対相関の効果が平均場の軌道の占有確率を変化させて複雑な振動運動が生じる。この計算は、調和振動子基底の範囲で、準位交差を含む大振幅振動運動の小規模なシミュレーションに相当する。 ^{44}Ti と ^{52}Ti についての計算からは、大振幅の振動運動は、大きく2種類に分類できると思われる。ひとつは巨大共鳴に相当する小振幅振動を載せた長周期大振幅振動であり、この場合は核子軌道のエネルギー準位の交差点において軌道の占有確率が断熱的(adiabatic)に変化する。他方は、典型的な振動周期よりもはるかに長い時定数を持つ緩和を伴う振動であり、そこでも対相関による軌道の占有確率の揺らぎが緩和を引き起こしている。これらのTDHFB計算は、TFHF計算(TDHF+固定占有確率)とは異なるものである。

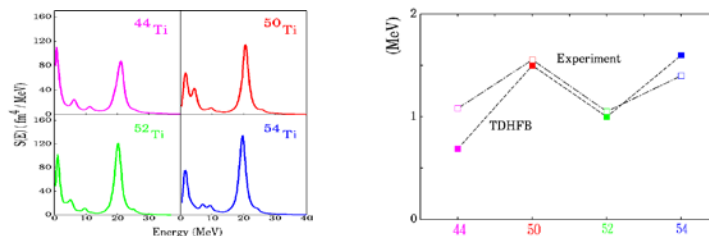
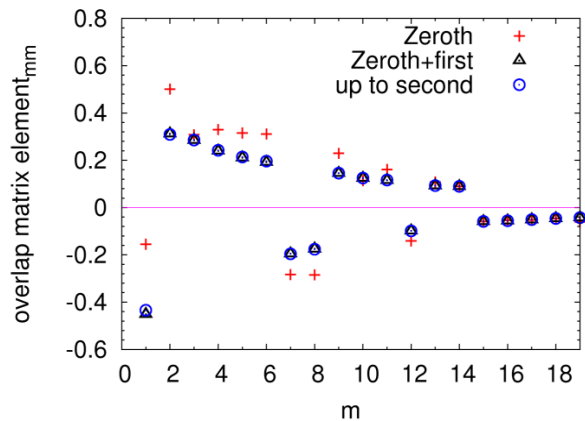


図2: チタン同位体($^{44,50,52,54}\text{Ti}$)のTDHFBによる強度関数(左図)と 2^+ 低励起エネルギー(右図)の値。

(2) 二重ベータ崩壊行列要素の QRPA 計算(寺崎)

寺崎は、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を準粒子乱雑位相近似(QRPA)を用いて計算することを目指しており、この課題は平成23年度ならびに平成24年度の科研費研究活動スタート支援に採択されている。今年度は、この計算に必要なふたつのQRPA励起状態の重複を、今まで他の人々に用いられてきた方法よりもずっと精密に計算する方法を開発した。寺崎は上記計算において、近似的に必要な励起は0+だけでよいこと、用いる2準粒子励起の切断が有効であること、QRPA基底状態の生成子に関する展開が有効であることを見出した。QRPA状態の式は複雑でそれをあらわに用いることは極力避けるのがQRPA計算の常套的考えであったが、上記近似の有効性と数学的性質ならびに強力な並列計算機を用いれば、その考え方にこだわって計算精度を落とす必要はないということを示した点で、この研究は画期的である。用いた近似法の一つが厳密といって差し支えないくらい精度のよい結果を与えることが図に示されている。

図3: ^{26}Si と ^{26}Mg のQRPA励起状態の重複の対角行列要素を絶対値の大きい順に並べたもの。用いられている近似はQRPA生成子に関するexponential関数の展開で、1次までで十分であることがわかる。



【3】原子核の反応

(1) 光捕獲反応率の新しい計算法(矢花、赤堀、船木(理研))

星の中で進む原子核合成は、光放出を伴う融合反応を伴う。電荷を持つ原子核どうしの反応ではクーロン障壁のために対応する断面積は指数関数的に小さく、直接的な測定は困難であるため、しばしば理論計算が重要な役割を果たす。なかでも 3α 反応による ^{12}C 核の合成は、重元素合成の起点となる重要な反応である。最近緒方(阪大 RCNP)らは、低温領域で重要となる共鳴状態を経ない直接融合反応の断面積を微視的な3体反応理論であるCDCC法を用いて計算し、従来用いられていたものと比べ20桁もの違いがあることを報告し、注目を集めている。

3α 融合反応は実験測定が不可能であるため理論による評価が極めて重要であるが、その理論計算は2つの点で困難を伴う。一つは、3つの電荷を持つ粒子の反応に関して、漸近領域における波動関数の解析形が知られておらず、従って散乱振幅(および断面積)に対する正確な定義が知られていないことである。もう一つは、クーロン障壁の存在のために、考慮する温度領域により光捕獲反応率は 10^{80} にも及ぶ変化を示すことである。このため、計算精度に対する極めて慎重な扱いが必要とされる。

我々は上述の困難を克服する枠組みとして、散乱問題を解くことなく直接温度の関数としての光捕獲反応率を計算することが可能な新たな理論である虚時間計算法を提案した。この方法では、光捕獲後の終状態(3α 反応では 2^+ 励起状態)から出発し、温度の逆数 $\beta=1/kT$ に対する虚時間発展方程式を解くことで反応率を得ることが可能である。

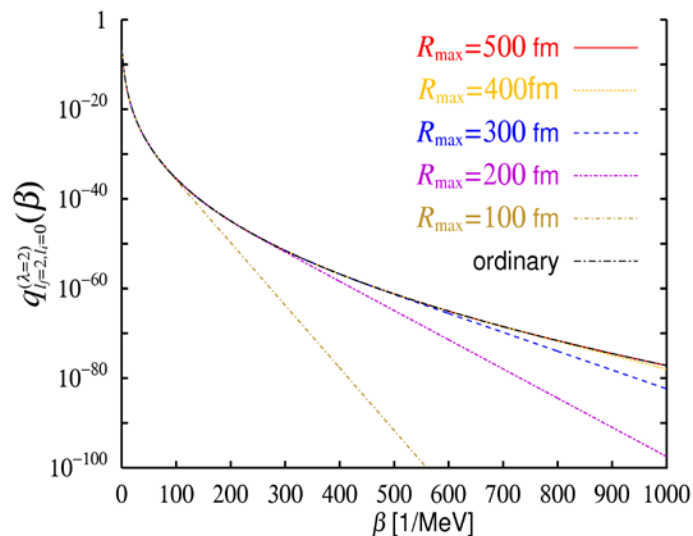
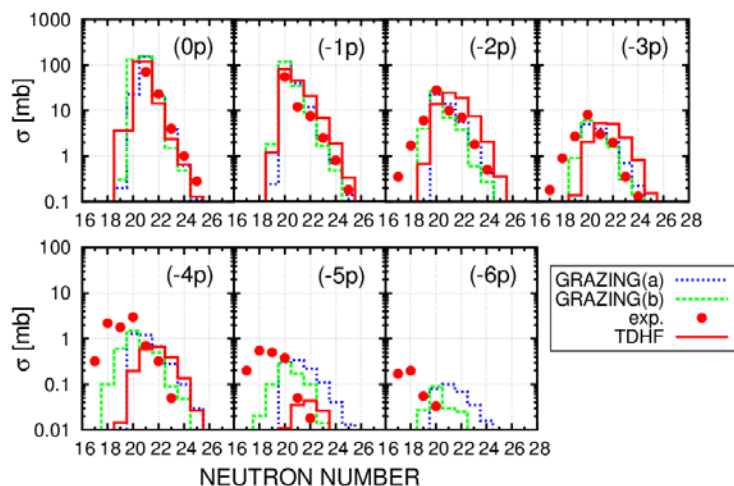


図4: α - ^{16}O 光捕獲反応率に対する計算。通常の計算法(ordinary)と、様々な空間領域で得られた虚時間計算法との結果を比較している。この系では、500fm の空間で解くことにより、 1000MeV^{-1} (10^7K 程度)の温度領域まで収束した結果が得られている。

(2)多核子移行反応の TDHF 計算(関沢、矢花)

重イオン衝突反応で起こる多核子移行反応に対し、時間依存 Hartree-Fock (TDHF) 理論に基づく記述を試みた。最近、C. Simenel により提案された粒子数射影の方法を用い、入射エネルギー・入射パラメータ毎に、衝突後の TDHF 波動関数から核子移行確率を計算し、実験的測定がなされているいくつかの系と核子移行断面積の比較を行った。比較的少数の核子が移行する過程に対しては、TDHF は実験結果を一定の精度で再現するが、移行核子数が多い場合には断面積を過小評価するという結果が得られた。今後、励起状態にある TDHF 終状態波動関数からの核子放出(evaporation 効果)の検討を行う。また、KEK グループにより、多核子移行反応を用いた r 過程原子核の生成実験が検討されており、中性子過剰な不安定核を生成するにはどのような原子核対、入射エネルギーで反応を行うのが適当であるかについて、検討を行う予定である。

図5: ^{40}Ca - ^{124}Sn の衝突で起こる多核子移行反応に対する TDHF 計算の結果(赤線)と実験結果(赤丸)の比較。直接反応理論に基づく結果(青・緑線、GRAZING コード)も示している。



<学位>

1. 理学修士:

- 杉山 健 「Maxwell+TDDFT マルチスケールシミュレーションによる高強度パルス光伝搬の記述」
- 関澤一之 「Time-Dependent Mean Field Theory for Multi-Nucleon Transfer Reaction (時間依存平均場理論による多核子移行反応の研究)」

<発表論文>

1. Emergence of pygmy dipole resonances: Magic Numbers and neutron skins
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Phys. Rev. C84, 021302 (2011).
2. Magnetic circular dichroism in real-time time-dependent density functional theory
K.-L. Lee, K. Yabana, G.F. Bertsch
J. Chem. Phys. 134, 144106 (2011).
3. Time-dependent density functional theory for strong electromagnetic fields in crystalline solids
K. Yabana, T. Sugiyama, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch
Phys. Rev. B85, 045134 (2012).
4. 光イオン化過程の時間依存密度汎関数理論による第一原理計算
矢花一浩
Journal of the Vacuum Society of Japan 54, 522 (2011).
5. Imaginary-time method for radiative capture reaction rate
K. Yabana, Y. Funaki
Phys. Rev. C, submitted, arXiv:1202.3309
6. Three dimensional structure of low-density nuclear matter
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
submitted to Phys. Lett. B
7. Toward a Microscopic Reaction Description Based on Energy-Density-Functional Structure Models,
G. P. A. Nobre, F. S. Dietrich, J. E. Escher, I. J. Thompson, M. Dupuis, J. Terasaki, and J. Engel,
Phys. Rev. C 84 (2011) 064609
8. Testing Skyrme Energy-Density Functionals with the QRPA in Low-Lying Vibrational States of Rare-Earth Nuclei
J. Terasaki and J. Engel,
Phys. Rev. C 84 (2011) 014332
9. Testing Skyrme Energy-Density Functionals with the QRPA in Low-lying Vibrational States of Rare-Earth Nuclei
J. Terasaki
submitted to Progress of Theoretical Physics, Supplement.
10. Overlap of QRPA states for nuclear matrix elements of the neutrino-less double beta decay
J. Terasaki

submitted to Phys. Rev. Lett.

11. Linear responses in time-dependent Hartree-Fock Bogoliubov Method with Gogny interaction
Y. Hashimoto,
submitted to Eur. Phys. Jour. A

<国際会議発表>

1. Time-dependent approaches for reactions at barrier energy
K. Yabana
INT program INT-11-2d, Interface between Structure and Reactions for Rare Isotopes and Nuclear
Astrophysics, INT, Univ. Washington, USA, Aug. 8- Sept. 2, 2011.
2. Real-time and real-space density functional calculation for electron dynamics in
crystalline solids
K. Yabana
Int. Conf. on Computational Science, Nanyang Technological University, Singapore, Jun.
1-3, 2011.
3. Real-time TDDFT Simulation for Ultrafast Electron Dynamics in Dielectrics
K. Yabana
14th International Conference Density Functional Theory in Chemistry, Physics and Biology,
Athens,
Greece, 2011 Aug. 29-Sep. 2
4. Real-time TDDFT Calculation in Molecules and Solids
K. Yabana
ISTCP-VII (International Symposium on Theoretical Chemistry and Physics), Waseda Univ.
Sept. 2-8, 2011.
5. Real-Time TDDFT for Molecules and Solids
K. Yabana
Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei, YITP Kyoto Univ., Sept. 23, 2011.
6. Time-Dependent Hartree-Fock Calculation for Multi-Nucleon Transfer Reactions
K. Yabana
YIPQS Long-term Workshop Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011) One-day
Workshop4, Oct. 24, 2011.
7. Time-dependent density functional theory for femtosecond electron dynamics in dielectrics
K. Yabana
The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Univ. Tokyo,
Oct. 31-Nov. 2, 2011.
8. Time-Dependent Density Functional Theory for Intense Laser Pulse Propagation in Solids
K. Yabana
3rd Int. CQSE Workshop on Atomic, Molecular and Ultrafast Science and Technology, National
Taiwan Univ., Jan. 7-8, 2012.
9. Computational Approach for Dynamics of Many-Fermion Systems - from Nuclear Physics to
Optical Science -
K. Yabana
Kyoto Univ. GCOE Symposium "Links among Hierarchies", Feb. 13-15, 2012.
10. Tests of Skyrme Energy Density Functionals in Low-Energy Vibrational States of Rare-Earth

- Nuclei using QRPA
 J. Terasaki,
 RIBF, ULIC and CNS Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy, June 30 - July 2,
 2011, RIKEN, Wako, Japan
11. Testing Skyrme Energy-Density Functionals with the QRPA in Low-lying Vibrational States of Rare-Earth Nuclei
 J. Terasaki
 YKIS2011 Symposium Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei, Oct. 11-15, 2011, Kyoto Univ., Kyoto, Japan
 12. Testing Skyrme energy-density functionals with the QRPA in low-lying vibrational states of rare-earth nuclei
 J. Terasaki
 1st Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, Advances in Nuclear Structure with arrays including new scintillator detectors, Feb. 22-25, 2012, Bormio, Italy
 13. Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
 J. Terasaki
 International Molecule "Nuclear forces and neutron-rich matter", March 1-31, 2012, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University.
 14. Large-scale calculations of excited states of heavy nuclei
 J. Terasaki
 LBNL and CCS-Tsukuba Joint Workshop 2012, March 19-20, 2012, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba
 15. Gogny-TDHFB calculation of nonlinear vibrations in $44,52\text{Ti}$,
 Y. Hashimoto,
 YIPQS Long-term workshop Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 20th September - 28th October, 2011.
 16. Anharmonic oscillations in $44,52\text{Ti}$ with Gogny-TDHFB (poster) ,
 Y. Hashimoto,
 YKIS2011 Symposium Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 11th - 15th October, 2011.
 17. Nonlinear vibration and relaxation in Gogny-TDHFB calculation,
 Y. Hashimoto,
 Nuclear forces and neutron-rich matter, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2012. 3. 1 - 2012. 3. 31.
 18. Description of excited states in light nuclei with Skyrme interaction employing multiple Slater determinants
 Yuta Fukuoka, Yasuro Funaki, Kazuhiro Yabana, Takashi Nakatsukasa
 YIPQS Long-term workshop, Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 20th September - 28th October, 2011
 19. Time-dependent Hartree-Fock Theory for Multi-nucleon transfer Reactions
 K. Sekizawa and K. Yabana,
 10th CNS International Summer School, 26th Sep. - 1st Oct., 2011.
 20. Time-Dependent Hartree-Fock Theory for Multi-Nucleon Transfer Reactions
 K. Sekizawa and K. Yabana,
 YIPQS Long-term workshop Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011), 20th Sep.

- 28th Oct., 2011

21. Time-Dependent Hartree-Fock Theory for Multi-Nucleon Transfer Reaction,
K. Sekizawa, K. Yabana
International Molecule “Nuclear forces and neutron-rich matter”,
Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, (March 2012),
22. Three-Dimensional Calculation of Inhomogeneous Structure in Low-Density Nuclear Matter
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
XV. th Research workshop Nucleation Theory and Applications, Bogoliubov laboratory of
Theoretical Physics, Dubna, Russia, Apr. 16-24, 2011.
23. Three-dimensional calculation of inhomogeneous nuclear matter
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics, J-PARC,
Tokai, Ibaraki, Feb. 2-11, 2012.
24. Three-dimensional calculation of pasta structure in High and Low-density nuclear matter
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
The first International School for Strangeness Nuclear Physics, J-PARC and Tohoku Univ.,
Feb. 12-17, 2012.

<国内研究会・学会等>

1. 光捕獲熱核反応率の虚時間計算
矢花一浩
京都大学基礎物理学研究所研究会「微視的核反応理論による物理」、2011年8月1-3日
2. 電子ダイナミクスの第一原理計算—光と物質の相互作用のミクロな記述—
矢花一浩
新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」「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」若手道場、大阪大学、2011年9月27日
3. 物質中の光伝播を記述する Maxwell-TDDFT マルチスケール・シミュレータの開発
矢花一浩
筑波大学計算科学研究センター学際共同利用 H22 成果報告・H23 中間報告会、2011年9月13日
4. パルス光の伝播を記述する Maxwell-TDDFT マルチスケール・シミュレータの開発
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」研究会、東京大学、2011年10月7-8日
5. A New Computational Approach for Radiative Capture Reaction Rate
矢花一浩
新学術科研費「素核宇融合による計算基礎科学物理学の進展研究会」、賢島、
2011年12月3-5日
6. 時間依存密度汎関数法によるパルス光伝播の第一原理計算
矢花一浩
東京大学物性研究所共同利用スーパーコンピュータ成果報告会「計算科学の課題と展望」
東大物性研、2012年2月20-21日
7. 高強度パルス光伝播の第一原理計算
矢花一浩、杉山健、篠原康、乙部智仁、G.F. Bertsch
第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012年3月15-18日

8. 時間依存密度汎関数理論によるコヒーレントフォノンの記述
矢花一浩
日本物理学会第67回年次大会シンポジウム「凝縮系における超高速現象とコヒーレント物質制御への展開：光化学反応から光誘起相転移まで」、関西学院大学、2012年3月24-27日
9. 密度汎関数法を用いた原子核の大規模励起状態計算
寺崎 順
計算科学コロキウム、筑波大学計算科学研究センター、2011年5月24日
10. QRPA calculation for use on passively paralleled computers
寺崎 順
第2回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム-PACS-CSによる計算科学の発展と次世代コンピューティングへの展開-、筑波大学計算科学研究センター、2011年9月12、13日
11. 原子核応答の大規模計算
寺崎 順
日本物理学会2011年秋季大会、弘前、招待講演
12. 戦略プログラム分野5、ユーザー支援
寺崎 順
日本物理学会2011年秋季大会核理論懇談会、弘前（2011年9月16日-19日）
13. ユーザー支援報告
寺崎 順
戦略プログラム分野5主催の研究会「大規模計算による原子核研究の展開-核子多体系を中心に-」理化学研究所、和光、2012年1月25日
14. Calculation of Transition Strength of Nuclei
寺崎 順
研究会「素核宇融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」, 合歓の郷、志摩、2011年12月3-5日
15. Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
寺崎 順
原子核理論研究室セミナー、筑波大学数理物質系、2012年1月20日
16. Nuclear transition matrix elements of neutrino-less double-beta decay for determining the neutrino mass
寺崎 順
計算科学研究センター年次報告会、筑波大学計算科学研究センター、2012年2月20日
17. 原子核の密度汎関数理論の基底状態および二重ベータ崩壊行列要素への応用
寺崎 順
平成24年度 筑波大学計算科学研究センター学際共同利用ヒアリング、筑波大学計算科学研究センター、2012年3月2日
18. ユーザー支援活動報告
寺崎 順
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、秋葉原コンベンションホール、東京、2012年3月7、8日
19. Skyrme 力を用いた多スレーター行列式による軽い核の励起構造計算
福岡 佑太、船木 靖郎、矢花 一浩、中務 孝
大規模計算による原子核研究の展開 -核子多体系を中心に-、理化学研究所 RIBF 棟2階大会

議室、2012年1月24日-25日

20. Skyrme 力を用いた多スレーター行列式による軽い核の励起構造計算
福岡 佑太、船木 靖郎、矢花 一浩、中務 孝
RCNP 研究会「クラスターガス状態探索のための研究戦略会議」、大阪大学核物理研究センター、
2011年9月7日-8日
21. 多スレーター行列式の重ね合わせによる軽い核における励起状態の記述
福岡 佑太
2011年度 原子核三者若手 夏の学校（白浜荘(滋賀県高島市) 8月16日～8月21日)
22. Description of Nucleon Transfer Reaction by TDHF Method
関澤一之、矢花一浩
基研研究会「微視的核反応理論による物理」、2011年8月1日-3日
23. TDHF 計算による核子移行反応の記述
関澤一之、矢花一浩
2011年度原子核三者若手夏の学校、滋賀県高島市白浜荘、2011年8月16日～21日
24. 多核子移行反応断面積の TDHF 計算
関澤一之、矢花一浩
日本物理学会 第67回年次大会、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス、
2012年3月24日～27日
25. 3アルファ融合反応の新たな計算手法
赤堀孝彦、矢花一浩、船木靖郎
研究会「大規模計算による原子核研究の展開—核子多体系を中心に—」、理化学研究所 RIBF 棟
二階大会議室、2012年1月24、25
26. 低密度核物質の非一様構造による3次元結晶
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
2011年度原子核三者若手夏の学校（白浜荘（高島市、滋賀県）、2011年8月16日～21日）
27. 低密度核物質の非一様構造への系統的計算
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
日本物理学会秋季大会（弘前大学（弘前市、青森県）、2011年9月16日～19日）
28. 構造を仮定しない計算による低密度核物質の非一様構造
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展研究会、合歓の郷（三重県）、
2011年12月3日～5日
29. 低密度原子核物質の非一様構造と中性子星のクラスト
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
日本物理学会第67回年次大会（関西学院大学（西宮市、兵庫県）、2012年3月24日～27日）
30. クリロフ部分空間法を用いた TDDFT の線形応答計算
篠原康、二村保徳、矢花一浩、櫻井鉄也
日本物理学会 67回年次大会（関西学院大学、2012年3月24日-27日）
31. 第一原理計算による半金属コヒーレントフォノン生成の記述
篠原康、矢花一浩、岩田潤一、乙部智仁、G. F. Bertsch
第59回応用物理学関係連合講演会、（早稲田大学、早稲田中・高等学校 2012年3月15日-3月
18日）

32. 時間依存密度汎関数理論による半金属コヒーレントフォノン生成の記述
篠原康、矢花一浩、乙部智仁、岩田潤一、G. F. Bertsch
日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学 2011 年 9 月 21 日～24 日)
33. Krylov 部分空間法に基づくシフト線形方程式による TDDFT の線形応答計算
篠原康、二村保徳、矢花一浩、櫻井鉄也
『文部科学省科学研究費新学術領域 「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 24 年度研究会』、東京大学 (2012 年 3 月 16 日-17 日)
34. パルス光伝搬の Maxwell+TDDFT マルチスケールシミュレーション
杉山健、篠原康、乙部智仁、矢花一浩、G. F. Bertsch
日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学 2011 年 9 月 21 日～24 日)

<ポスター発表>

1. ARTED: Ab-initio Real-Time Electron Dynamics simulation code
矢花一浩、篠原康
第 2 回次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会、学士会館 (東京)、2012 年 1 月 26 日
2. 高強度パルス光伝播を記述する Maxwell-TDDFT マルチスケール・シミュレーション
矢花一浩、杉山健、篠原康、乙部智仁、G. F. Bertsch
次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発公開シンポジウム、ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター、2012 年 3 月 5-6 日
3. Description of clustering states in light nuclei with Skyrme interaction superposing multiple Slater determinants (poster)
Yuta Fukuoka, Yasuro Funaki, Kazuhiro Yabana, Takashi Nakatsukasa
YKIS2011 Symposium, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS20
(Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 11th - 15th October, 2011)
4. Time-Dependent Hartree-Fock Theory for Multi-Nucleon Transfer Reaction
K. Sekizawa and K. Yabana
International Molecule "Nuclear forces and neutron-rich matter", 1st March - 31st March, 2012
5. Three-dimensional calculation of inhomogeneous nuclear matter
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies
(理化学研究所 (和光市、埼玉県)、2011 年 11 月 14 日～17 日)
6. Real-Time TDDFT Simulation for Coherent Phonon Generation
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Jun-ichi Iwata, Tomohito Otobe, George F. Bertsch
XVIth International Workshop on Quantum Systems in Chemistry and Physics, Kanazawa, Japan, 2011 Sep. 11-17
7. Coherent Phonon Generation in Real-Time TDDFT
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Jun-ichi Iwata, Tomohito Otobe, George F. Bertsch
14th International Conference Density Functional Theory in Chemistry, Physics and Biology, Athens, Greece, Aug. 29-Sep. 2, 2011.
8. Maxwell+TDDFT Multi-Scale Simulator Describing Propagation of High Intensity Laser Pulse
T. Sugiyama, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana, G. F. Bertsch
14th International Density Functional Theory Conference (DFT2011)
Athens, Greece, Aug. 29-Sep. 2, 2011.

9. Development of First-Principles Maxwell + TDDFT Multi-Scale Simulator for Propagation of High-Intensity Laser Pulse
T. Sugiyama, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana, G. F. Bertsch
The XVIth International Workshop on Quantum Systems in Chemistry and Physics (QSCP-XVI)
(Ishikawa Prefecture Museum of Art, September 11-17, 2011)
10. Development of First-Principles Maxwell + TDDFT Multi-Scale Simulator for Propagation of High-Intensity Laser Pulse
T. Sugiyama, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana, G. F. Bertsch
The 14th Asian Workshop on First-Principles Electric Structure Calculations (The University of Tokyo, October 31-November 2, 2011)

<集中講義>

1. 集中講義：フェルミ多粒子系ダイナミクスの計算科学
矢花一浩
京都大学理学研究科、2011年6月8-10日

その他

<招待セミナー>

1. セミナー：時間依存密度汎関数理論—原子核物理からレーザー科学へ—
矢花一浩
京都大学物理第二教室談話会、2011年6月10日
2. セミナー：First-Principles Description for Quantum Electron Dynamics Induced by Intense and Ultrashort Laser Pulses
K. Yabana
Seminar at Advanced Photonics Research Institute, Gwangyu, Korea, Feb. 23, 2012.

VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎、小沢 顕
准教授	新井一郎、江角晋一、笹 公和
講師	小松原哲郎、中條達也、Peter Henry Schury
助教	長江大輔
技術職員	加藤純雄
大学院生	山口香菜子 (D3)、森口哲朗 (D3)、渡邊健悟 (D3)、坂田洞察 (D3)、 佐野正人 (D3)、伊藤由太 (D2)、轟木貴人 (D2)、新井田貴文 (D2)、 石橋陽子 (D1)、Jihyun Bhom (D1)、阿部康志 (M2)、奥村公威 (M2)、 中村聡佑 (M2)、福岡翔太 (M2)、近藤祐樹 (M2)、仲里 仁 (M2)、 窪田晋太郎 (M2)、水野三四郎 (M2)、船戸龍 (M2)、郡司薫 (M1) 堀内聖志 (M1)、中込宇宙 (M1)、渡邊大介 (M1)、中島朋 (M1)、 錦織良 (M1)、丹羽崇博 (M1)、三田浩希 (M1)、湯浅暁玲 (M1)、 岡田俊祐 (B4)、斎藤佑多 (B4)、向井もも (B4)、大西貴博 (B4)、 木原宏一 (B4)、小林大洋 (B4)、田中直斗 (B4)

【1】低エネルギー原子核実験グループ (小沢 顕、新井一郎、笹 公和、小松原哲郎、Peter Schury、長江大輔)

(1) 稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成16年4月以来、理化学研究所のRIビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして稀少 RI リングの R&D を行っている。平成23年度は、等時性磁場発生のためのセクター磁石の改造の検討、セクター磁石の磁場測定、およびキッカー磁石の高速化とその電源回路の高速充電化の開発などを行った。

稀少 RI リングの蓄積リングは、6セクターであり、各セクターは旧 TARNII のセクター磁石4台で構成する。等時性磁場を作るために各セクターの最初と最後の磁石には、動径方向に静磁場に傾きをつける (一次の補正) とともにトリムコイル (二次の補正) を設置する予定であった。平成23年度の初めは、一次の補正のために、セクター磁石の磁極面に階段状の鉄板を貼ること、およびセクター磁石のヨーク全体を斜めに傾けることなどを検討した。しかしながら、前者の場合、階段状の鉄板を磁極面に固定する良い方法が無く、また、後者の場合、ヨーク全体を傾けることは可能だが、傾けるためのジグの精度が十分でないことがわかったために、以上二つの方法は断念した。現在は、24台のセクター磁石にトリムコイルを設置し、一次の等時性も含めてトリムコイルで調整することを検討している。平成23年度はまた、セクター磁石の磁場測定を行った。磁場測定は、0.62T、1.24T、1.73T の3点で、セクター磁石2台について行った。測定した磁場分布は、TOSCA の計算結果とほぼ一致していたが、1.73T の場合、2台の磁石で0.4% のずれがあることがわかった。しかしながら、このずれは補正コイルで吸収できる範囲である。

平成23年度は、キッカー磁石の開発も行った。遅延時間短縮のために、トリガー回路の改造 (光リンク部分の除去など) を行った。この改造により、約50ns の遅延時間の短縮が期待できる。また、入射と出射を一つのキッカー磁石で行うために高速充電 (~0.7ms) が可能な電源回路の開発も行った。これらの改造、開発は終了しており、平成24年度に実際に使用する充電電圧でテストを行う予定で

ある。

平成24年度から、稀少 RI リングの製作が始まる。蓄積リングのステージ、水、電気などを準備した後、セクター磁石の設置、真空排気系の設置などを行う。平行して、必要な電源、セプタム磁石、キッカー磁石、などの製作を行い、平成24年度末までに蓄積リングの設置を終了する予定である。

(2) 飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでの質量測定は RI ビームの飛行時間を測定することにより行う予定である。その為の飛行時間検出器に求められるのは 100 ps 以下の時間分解能、RI ビームの電荷が検出器通過前後で変化しないこと、大きなビーム径で飛行する RI ビームを全て検出することである。その為、この検出器は可能な限り薄くかつ大面積を有しなくてはならない。そこで炭素薄膜に RI ビームを通過させ、その際に炭素薄膜から放出される電子を電磁場中で制御し、検出器に導く方式 [4] の飛行時間検出器の開発を進めている。昨年度は原理実証機を製作し、HIMAC において 200 A MeV の Kr ビームを用いて時間分解能 $\sigma \sim 160$ ps を得た。

今年度は時間分解能の向上を目的として電磁場強度を大きくし、昨年度と同様の測定を HIMAC で行った。電場強度を大きくし、電子の加速電圧を大きくすることによって電子が放出時に持っている速度分布を相対的に小さくできる。電場強度を大きくしたことに伴い、磁場強度も大きくし電子の MCP 入射位置を以前と同じにした。得られた時間分解能は $\sigma \sim 130$ ps であり、電磁場強度増大の効果があつたことを示している。また電子飛行時間のビーム入射位置依存性を α 線源を用いて測定した。電磁場の一様性が電子飛行時間に影響を与えていることを示唆する結果が得られた。

今後はさらなる電磁場強度増大によって時間分解能の向上を目指すとともに電子飛行時間のビーム入射位置依存性が小さくなるよう、電磁場の一様性を向上させるよう改良を加えていく。

(3) ^{11}Li の反応断面積測定

反応断面積のデータだけから中性子スキンを導出することを目的に ^{11}Li の反応断面積測定を理化学研究所の RI ビームファクトリーの RIPS で行った。標的は固体水素 [1] および炭素標的で行った。エネルギーは、31 A MeV と 45 A MeV であった。今回の測定結果を含む炭素標的と水素標的の反応断面積のエネルギー依存性を図 1 の挿絵に示した。測定された反応断面積から光学近似のグラウバー模型により陽子、中性子密度分布を導出した (図 1 参照)。陽子密度分布はガウス分布を、中性子密度分布はガウス分布 + 湯川テールを仮定している。密度分布は、水素標的および炭素標的の反応断面積のエネルギー依存性を再現するように決められた。得られた密度分布から、 ^{11}Li の陽子核半径、中性子核半径、質量核半径を導出した。導出された陽子核半径は、オプティカルアイソトープシフトの測定から導出された陽子核半径 (2.36 ± 0.04 fm [2]) と誤差の範囲で一致した。これにより、水素および炭素標的を使った反応断面積の測定のみから中性子スキンの導出が可能であることが示された。さらに、今回得られた核半径を Tensor Optimized Shell Model (TOSM) [3] の理論計算と比較した。実験結果は、TOSM の計算で ^9Li コアの励起を考えた場合と良く一致した。 ^{11}Li では、 $N=8$ のシェルギャップが消失していることがわかっているが、TOSM の計算では、テンソル力と対相互作用によりこの消失が起こるとされている。今回、実験値と TOSM の理論値が一致したことにより、 ^{11}Li におけるシェルギャップの消失はテンソル力と対相互作用によることが示唆される。

(4) 核モーメントの符号決定手法の開発

磁気双極子モーメントの符号を実験的に決定できる β -NMR 法の開発に着手した。NMR に寄与す

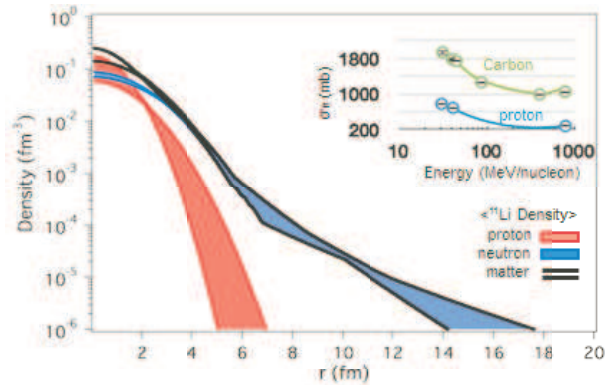


図 1: 水素標的と炭素標的の反応断面積のエネルギー依存性を再現するように決められた核子密度分布。赤が陽子密度分布、青が中性子密度分布。挿絵は、反応断面積の結果（丸印）と密度分布から計算されたエネルギー依存性（実線）。

るのは回転磁場であるが、従来の β -NMR 法では右回転、左回転の磁場を足し合わせた振動磁場を印加しており、どちらの回転磁場が NMR に寄与したか判別出来ない。その為、得られる磁気双極子モーメントは符号を決定することが出来ず、その絶対値のみとなる。符号を決定するためには、回転磁場が生成できればよい。右回り、あるいは左回りの回転磁場を導入し、どちらの回転磁場で NMR が起こるかを観測できれば、静磁場の方向から磁気双極子モーメントの符号を決定できる。

今年度は回転磁場生成システムの構築と、回転磁場の検出を行った。回転磁場の生成には位相の 90 度ずれた二つの高周波電流と直行させて配置した二つのコイルを用いた。位相のずれた二つの高周波電流は一つの高周波電流発信器より発信させた高周波電流を二つに分配し、一方の位相を 90 度遅らせることにより生成した。遅らせる高周波電流を変えることにより、右まわり、左まわりの回転磁場を生成できる。この二つの高周波電流を用いると二つの直行したコイルからは位相の 90 度ずれた振動磁場が発生し、二つのコイルが交差する中心では振動磁場の足し合わせにより回転磁場が発生する。回転磁場の検出にはピックアップコイルを用いた。検出した回転磁場のシグナルからは円偏向成分に加えて直線偏向成分が含まれていることが示唆される。

今後は高偏向な回転磁場の生成と陽子を用いた回転磁場の偏向度測定を行い、磁気双極子モーメントの値およびその符号が既知の原子核を用いた原理実証実験へと進む予定である。

(5) 福島第一原子力発電所事故により放出された放射性核種の分布（筑波大学 AMS グループ）

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により福島第一原子力発電所事故が発生し、環境中に揮発性の高い放射性セシウムや放射性ヨウ素などの核分裂生成核種が大量に降下・沈着した。広域にわたる放射性核種の分布を明らかにするために、3 月下旬から 5 月上旬にかけて福島県及び東関東の 108 箇所において表面土壌を採取し、ガンマ線測定を行った。測定された放射性核種は ^{129m}Te 、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{136}Cs 、 ^{137}Cs であり、放射能比の違いも明らかになった。2011 年 3 月 29 日に放射能を補正した放射性核種の分布を図 2 に示す。 ^{131}I と ^{137}Cs が共に福島県飯館村や浪江町、中通りで降下量が多い。一方、関東地方東部では ^{131}I と ^{137}Cs に異なる分布が見られ、地形の影響を受けていると考えられる。また、福島県と関東地方東部の汚染は、空気塊が漂っていたところに降雨があったことにより説明できた。本調査結果は、2011 年 11 月に米国科学アカデミー紀要 (PNAS) において発表された。[5]

(6) 筑波大学イオン加速器システムの概要設計

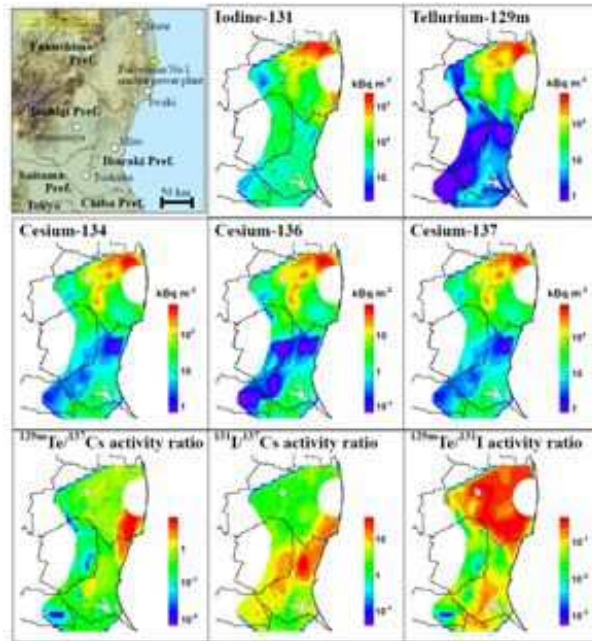


図 2: 福島第一原子力発電所事故による放射性核種の降下量分布と放射能比 (2011 年 3 月 29 日に放射能を補正した)

震災復興予算により更新される筑波大学イオン加速器システムの設計概要について、以下に報告する。加速器本体は、耐震性を考慮して横置き of 6 MV ペレット型タンデム加速器とした [6]。加速器施設 1 階には、 $14.6 \times 23.6 \text{ m}^2$ の測定室が 2 室あり、このうち第 2 測定室側の既存ビームラインを撤去して、3 台のイオン源と加速器本体、5 本のビームラインを新設する (ビームラインは最大 7 コースまで)。第 1 測定室は既存実験装置の継続利用を図る。また、施設 9 階の損壊した偏極イオン源は、1 階の既存施設の外側に実験ブースを新設して移設する。図 3 に筑波大学イオン加速器システムの概略図を示す。6 MV タンデム加速器は、高安定加速電圧で陽子・重陽子では $3 \mu\text{A}$ 、重イオンでは $50 \mu\text{A}$ までの直流ビームが加速可能である。原子核実験では、低エネルギー天体核反応実験や偏極陽子・重陽子による核反応実験に利用される。また、国内最大の最新鋭 AMS システムとして、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{129}I 等の核種測定が可能となる。筑波大学イオン加速器システムは、2014 年からの運用開始を予定している。

(7) $^7\text{Li}(^3\text{He,p})^9\text{Be}$ 反応における 3MeV での astrophysical S-factor の測定

金属欠乏星における観測は Big Bang における ^7Li の生成量を示すが、WMAP による理論計算との食い違いがあり、理論計算の値は観測量より 3 倍多い。Big Bang 元素合成における ^7Li の生成量はネットワーク計算に含まれる様々な反応により決定されるため、個々の反応の定量的な評価が必要である。 $^7\text{Li}(^3\text{He,p})^9\text{Be}$ 反応における astrophysical S-factor の測定を目的として、筑波大学の 1MV タンデム加速器において、3MeV の ^3He ビームの加速テスト実験を行った。タンデムでは初めて ^3He ビームを加速したが、デュオプラズマトロンからのビームは安定で、ビーム電流はおよそ 9.5nA であった。また、加速された ^3He ビームをリチウムターゲットに照射し $^7\text{Li}(^3\text{He,p})^9\text{Be}$ のテスト実験を行った。ターゲットは、炭素バッキング ($20 \mu\text{mg}/\text{cm}^2$) に Li_2CO_3 (^7Li の厚みは推定 $6 \mu\text{mg}/\text{cm}^2$) を

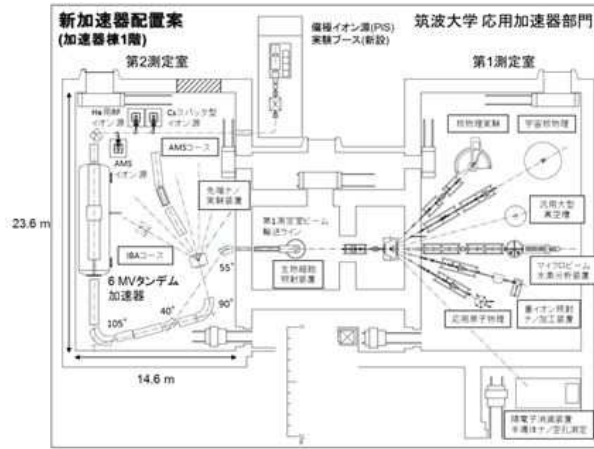


図 3: 筑波大学イオン加速器システムの復興計画案

蒸着したものを使用した。実験で得られたスペクトルを図 4 の右側に示す。また、左側の図は、炭素バッキングのみを使用して得られたスペクトルである。このスペクトルから、 ${}^7\text{Li}$ および ${}^6\text{Li}$ との反応によって生成された陽子、さらに重水素が観測された。今後は ${}^7\text{Li}$ 濃縮同位体を用いたターゲットの作成や低エネルギーにおける astrophysical S-factor の測定等を予定している。

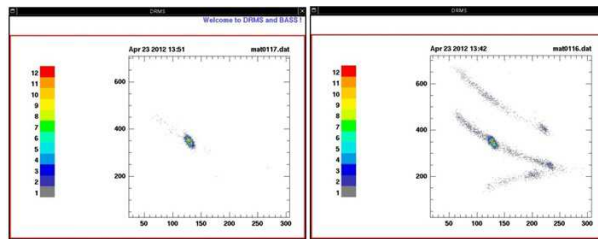


図 4: 右側 : Li_2CO_3 +炭素ターゲットに 3MeV の ${}^3\text{He}$ ビームを照射して得られたスペクトル。左側 : 炭素ターゲットのみのスペクトル

(8) スカンジウム 45+陽子反応における宇宙元素合成の研究

宇宙に存在する元素のうち鉄より軽い元素は、主に、恒星内の元素合成で生成される。我々は、そのうちのケイ素燃焼に興味を持ち、ボトルネックとして知られているスカンジウム 45 周辺の反応を調べることにした。Woosley は反応の経路が ${}^{42}\text{Ca}(\alpha, p){}^{45}\text{Sc}$ と ${}^{45}\text{Sc}(p, \gamma){}^{46}\text{Ti}$ に集中していると指摘した。我々は、 ${}^{42}\text{Ca}(\alpha, p){}^{45}\text{Sc}$ の反応率を評価するために逆反応の ${}^{45}\text{Sc}(p, \alpha){}^{42}\text{Ca}$ の断面積を測定し、過去の実験値 [7] と比較した。測定は 1MV タンデムで行われ、2MeV の陽子ビームを $1.47\text{mg}/\text{cm}^2$ の金のバッキング上の $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ のスカンジウムに照射し、 α 粒子を 148° に設置した E- Δ E カウンター (SSD) で測定した。測定時間は約 7.5 時間であった。結果は、dead time による補正を加えて 67 カウントであった。この収量から計算すると、微分断面積は $0.066 \pm 0.0010 [\text{mb}/\text{sr}]$ となった。この結果は、過去の報告値の良い外挿値になっているように見える。他のエネルギーでの測定や角度依存性など、より詳しい測定を今後行う予定である。

【2】 高エネルギー原子核実験 (三明康郎、江角晋一、中條達也、加藤純雄)

(1)ALICE 実験における高次方位角異方性 v_n と 2 粒子相関の測定

スイス・フランスの国境にある欧州共同原子核研究機構 (CERN) における大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) で、2010 年より始まった高エネルギー重イオン衝突実験における、高次の方位角異方性の研究と 2 粒子方位角相関を使ったジェットとクォーク・グルーオン・プラズマの相互作用に関する研究を行った。これまで、2 次の異方性である楕円型方位角異方性が測定されており、クォーク・グルーオン・プラズマの流体的性質の研究を行ってきた。初期衝突時に原子核内の核子分布の幾何学的揺らぎによる反応領域の初期形状の高次異方性を起源として、その後の膨張発展により終状態での発生粒子の運動量空間での高次方位角異方性を生み出す。高次の方位角異方性を測定する事は、その次数毎の初期状態から終状態への変換効率を調べる事につながり、このクォーク・グルーオン・プラズマの (粘性や初期条件等の) 流体的性質決定のための不確定性要素を取り除く事につながる。図 5 (左) は、LHC-ALICE 実験で、2.76 TeV で Pb+Pb 衝突の中心衝突度 0~2 % において、測定された高次方位角異方性 v_n の横方向運動量依存性を示す。異なる次数の異方性が異なる横方向運動量依存性を示す事と、特に高い横方向運動量領域では、3 次 (三角型)、4 次 (四角型) の異方性強度が、2 次 (楕円型) の異方性に比べて大きくなっている事が顕著である。図 5 (右) は、高次方位角異方性の中心衝突度依存性を示す。数通りの異なる反応平面定義に対する異方性測定の結果や異なる解析手法を使った結果を比較する事により、特に 3 次の異方性が初期の幾何学的形状の揺らぎに起因する事を示す緩やかな中心衝突度依存性や、1 次及び 2 次の異方性と 3 次の異方性の相関が極めて小さい事が確認された。

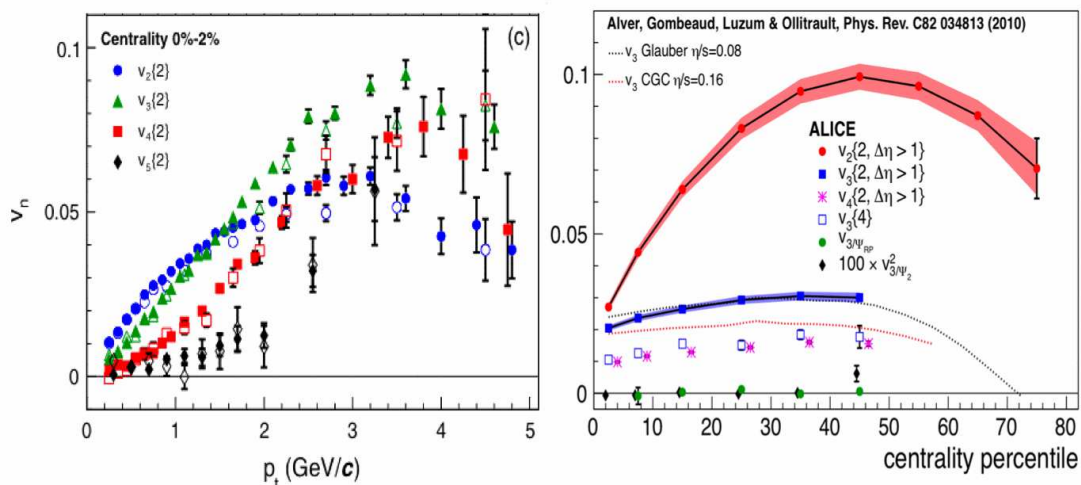


図 5: 高次方位角異方性 v_n の横方向運動量依存性 (左図) と中心衝突度依存性 (右図) [8]

図 6 (左) は、LHC-ALICE 実験で、2.76 TeV で Pb+Pb 衝突の中心衝突度 0~1 % において測定された 2 粒子方位角相関分布であり、その分布が前に測定された高次の方位角異方性のパラメータを使った 5 次まで含んだフーリエ多項式で良く説明出来る事を示している。この測定では、ラピディティー間隔を取った高次の異方性測定により得られた v_n を使って、同様のラピディティー間隔を取った 2 粒子方位角相関関数が、良く再現出来るという解析的にも当たり前の結果を示しているが、RHIC

及び LHC エネルギー領域で先に観測された、“ridge”や“mach-cone”と呼ばれる現象の大まかな部分をほぼ説明してしまう。さらに、図 6 (右) に示したのは、2 粒子間の様々な横運動量の組み合わせによって作られた 2 粒子相関分布を、高次のフーリエ多項式でフィットする事により得られた 2 次と 3 次のパラメータを示す。これは、2 粒子の v_n の積に対応するので、さらに 1 粒子の方位角異方性のパラメータの運動量依存性を求めるために同時にフィットする。そのグローバルフィットの結果は、図中のヒストグラムで表され、低い横運動量領域のデータをほぼ再現している。また、このグローバルフィットにより得られた 1 粒子の v_n の横方向運動量依存性の結果は、前の図 5 の結果とも矛盾しない。しかし、特に、図 6 (右上) の高い横運動量域に見られるグローバルフィットからの顕著なずれは、ジェット等の寄与であり、このハードな粒子生成機構からソフトな粒子生成機構の中間的領域である 2~4 GeV/c の横運動量領域へも続いており、ハード・ソフト間の相互作用の寄与は無視出来ない。その領域での、さらに多角的な多次元解析を現在進めている。

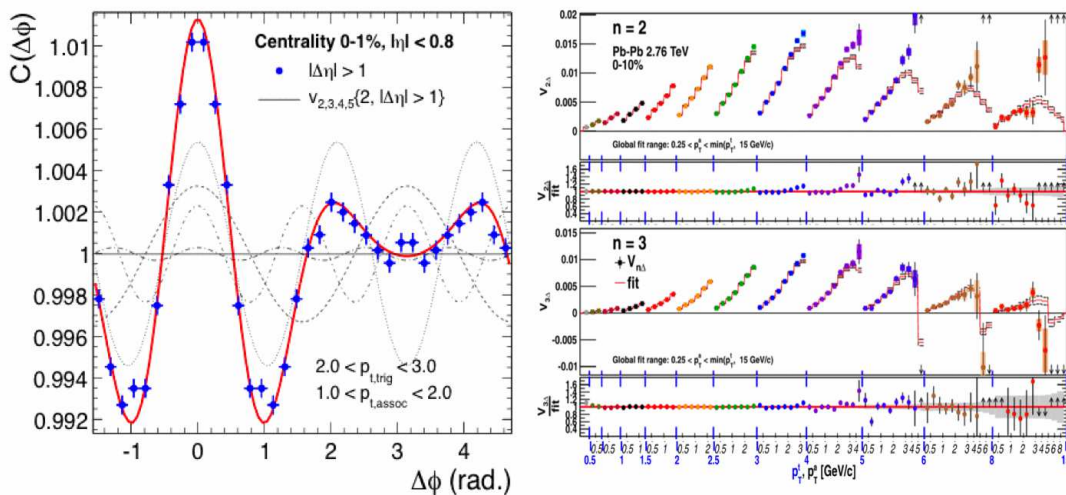


図 6: 2 粒子方位角相関関数 (左図) と高次異方性係数によるグローバルフィット (右図) [8, 9]

(2) PHENIX 実験における高次の反応平面 Φ_n を用いた測定

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行っている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) における PHENIX 実験を用いて、重心系核子あたり 200 GeV での高エネルギー重イオン衝突実験を継続し、温度-密度で描く QCD 物質の相図上の、LHC 実験とは異なる領域でのクォーク・グルーオン・プラズマの研究を進めている。特に、比較的低いエネルギー領域で到達可能になる高密度領域のクォーク・グルーオン・プラズマの性質や、そこで期待される 1 次相転移への境界点とも言われる QCD 物質の相図上の臨界点を探索することが、一つの大きな課題である。ここで紹介する研究では、高次の反応平面を使った様々な観測を進め、クォーク・グルーオン・プラズマの流体力学的性質に関する情報を得る事を目的とする。図 7 に示したのは、200 GeV での Au+Au 衝突の中心衝突度 0~50 % で測定された高次の方位角異方性パラメータ $v_n(\Phi_m)$ の横方向運動量依存性を、異なる種類のハドロン (π 中間子、K 中間子、陽子、反陽子) に対して測定した結果である。低い横方向運動量領域では、流体力学的性質により、粒子質量による依存性が見え、高い横方向運動量領域ではその粒子のクォーク数による効果が見える。高次の異方性も、楕円型膨張と同様に、初期幾何学的形状を起源とするがその後流体力学的発展している事、また終状態粒子 (ハドロン) となる前のクォーク相において膨張

発展している事の証しとなる。

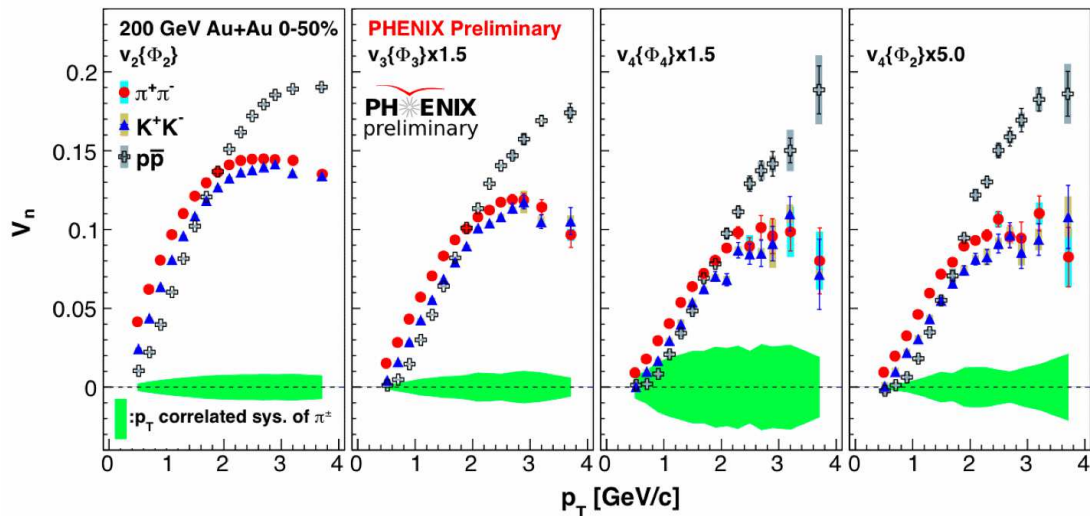


図 7: 高次方位角異方性 v_n の粒子種依存性、左から右へ、 $v_2(\Phi_2)$ 、 $v_3(\Phi_3)$ 、 $v_4(\Phi_4)$ 、 $v_4(\Phi_2)$

量子力学的干渉効果を用いた HBT2 粒子相関測定による粒子発生源サイズ、空間的広がり、時間的広がりの測定と、高次の異方性で決まる反応平面その相関を調べる事により、終状態粒子の放出領域の空間的・時間的・形状の異方性の測定を行った。図 8 (左) は、粒子発生源の横方向サイズを観測者から見込む角度方向への広がり (R_{side}) 及び、それと直交する奥行き方向への広がり (R_{out}) 等の大きさの、反応領域の楕円軸に対する角度依存性を示す。楕円型をした粒子放出領域の形状を示すように、その楕円の短軸方向から見た場合と、長軸方向から見た場合に、これら 2 つのサイズ (R_{side} 、 R_{out}) が、逆の角度依存性を持っていることがわかる。奥行き方向に対応する R_{out} で測られるサイズは、空間的な奥行きに加えて、時間的な広がりを含んでいると考えられる。これらの情報から得られた、終状態での楕円率と、初期衝突の形状から計算できる初期状態での楕円率を比較したのが、図 8 (右) である。その楕円形状は、初期状態より終状態において小さくなっている、つまり、その短軸方向への楕円の膨張によって、形状がより円に近い楕円形に変形しているが、その形状が短軸、長軸入れ替わる程には膨張していない事を示唆している。しかしより重いハドロンである K 中間子を用いた測定では、放出領域の楕円率は、 π 中間子で観測するの楕円率に比べて大きく、初期状態での楕円率と終状態での楕円率の違いがほぼ無い事が観測された。これは、K 中間子のより早い時点での放出と解釈する事ができる。

(3) ラドン測定実験教育用の静電捕集型検出器の製作と測定回路製作

ラドン測定実験教育用の静電捕集型検出器の製作と測定回路製作を行い、実験的な演習授業を行った。検出器の小型化と、パーソナル・コンピュータを用いた、測定回路の手軽な使用を目的とし、検出器及び測定回路の設計、製作を行った。図 9 (左図) には、検出器用の測定回路を示す。これは、高圧電源回路を含み、シグナル増幅、アナログ・デジタル変換、USB による測定の制御やデータ収集等を集積した回路の写真を示す。高エネルギー加速器研究機構での大学 3 年生のための物理サマー

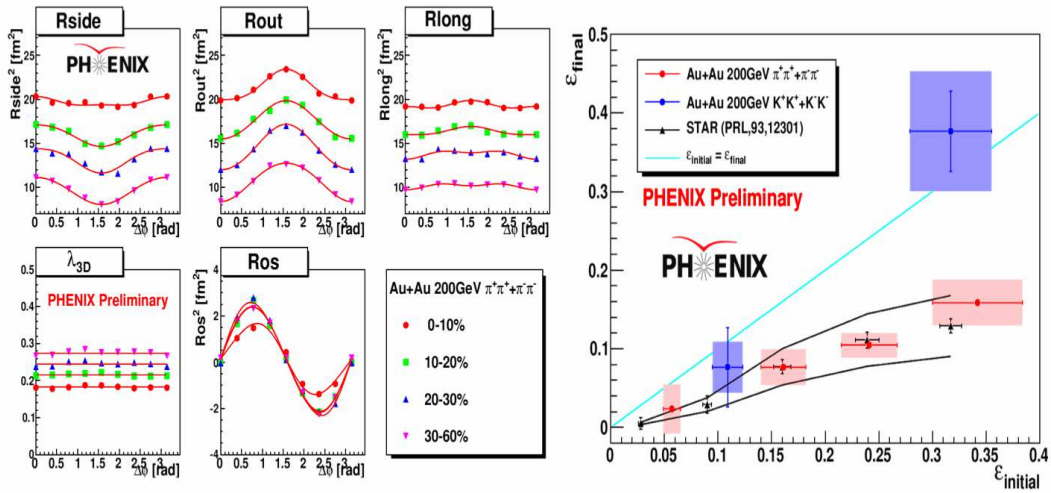


図 8: HBT 相関測定による粒子発生源サイズの方角依存性 (左図) と、初期楕円形状と終状態における楕円形状の比較 (右図)

チャレンジや、高校・大学一貫授業での物理教育教材として使う事を想定して開発している。図 9 (右図) は、このシステムを使って測定した α 線のエネルギー分布とその検出頻度の時間依存性を示している。これにより、崩壊核種の同定をする事ができる。

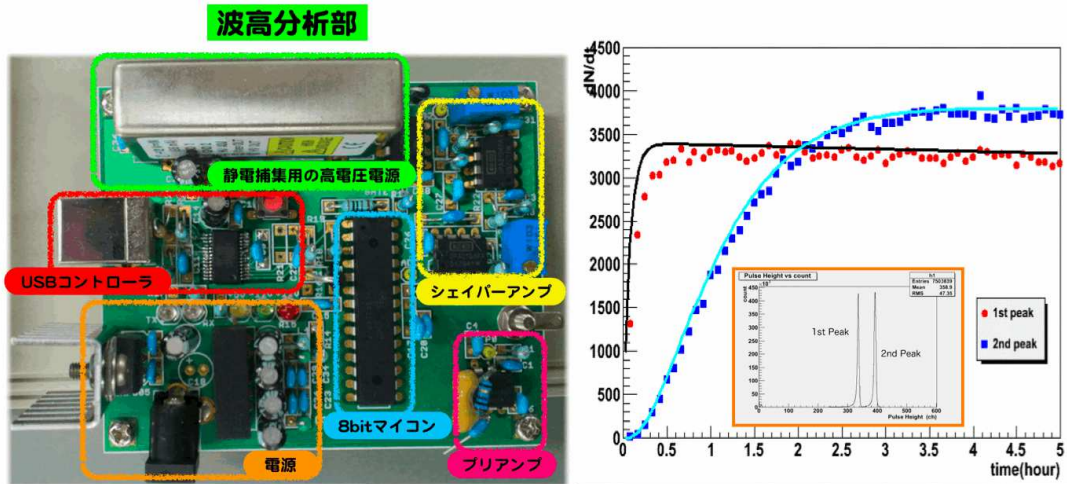


図 9: ラドン検出器用測定回路 (左) と、そのデータ解析 (右)

(4)LHC-ALICE 実験におけるダイジェット電磁カロリメータ検出器 (DCal) の製作

筑波大学では 2008 年より、LHC-ALICE 実験におけるダイジェット検出用電磁カロリメータモジュールの製作を、アメリカ、フランス、イタリア、中国の各研究機関との国際共同プロジェクトとして推進している。6 機のカロリメータ・スーパーモジュールの内、筑波大学では 1.5 機分 (モ

ジュール単体で 288 個) の製作を分担している。2010 年度までに、既に 192 個の製作及びフランスへの輸送を終えている。2011 年度では、残り 96 個のモジュールを筑波大学において製作を行い、2011 年 7 月にスパテック・ナント研究所 (フランス) へモジュールの輸送を行った。その後 LPSC Grenoble 研究所 (フランス) およびスパテック・ナントに大学院生 2 名、スタッフ 2 名を約 1 ヶ月間派遣し、現地スタッフの協力の基、スーパーモジュール製作に携わった。本検出器は、2013 年から 2015 年の LHC 加速器ロングシャットダウン期間中にインストールする予定である。これによりフルエネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV における鉛・鉛原子核衝突の最初の物理データを収集し、本検出器によって再構成されるダイジェットを用いた QGP 物性の解明を目指す。

(5) $\sqrt{s} = 200$ 及び 62.4 GeV での陽子 + 陽子衝突における識別した荷電ハドロン分布の測定

米国・ブルックヘブン国立研究所の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) の PHENIX 実験において、中心ラピディティ領域での π^\pm 中間子、 K^\pm 中間子、陽子、反陽子の横運動量分布を、核子あたり重心衝突系エネルギー $\sqrt{s} = 200$ GeV と 62.4 GeV で測定した。本データは、RHIC 加速器における重イオン衝突での横運動量分布測定に対し、重要なベースラインデータを与える。本測定では逆スロープパラメータ T_{inv} 、平均横運動量 $\langle p_T \rangle$ 、単位ラピディティ当りの粒子収量 dN/dy を各ビームエネルギーにおいて測定し、それらを異なるビームエネルギーでの陽子・陽子衝突、および陽子・反陽子衝突データと比較した。また m_T スケーリング、 x_T スケーリングなどの粒子生成に関するスケーリング則についても調べた。粒子生成機構を理解するため、next-to-leading-order (NLO), next-to-leading-logarithmic (NLL) 摂動 QCD 計算 (pQCD) との比較を行った。その結果、以下の事が分かった。

1. m_T (横質量) スケーリングにおいて、バリオンとメソンの分布が高い m_T 領域においてスプリットすることが、200 GeV、62.4 GeV の両エネルギーにおいて見えた。これはパートン強散乱による粒子生成機構がメソンとバリオンで違うとすることを意味する。
2. x_T スケーリングにおける乗数 n_{eff} は、すべての粒子種でほぼ同じであった。
3. 今回測定した陽子・陽子衝突実験の結果と、同じ実験で測定した Au+Au 200 GeV のデータと比較を行った結果、陽子・陽子から Au・Au の周辺衝突、中心衝突に向かうにつれて、様々な物理量 (例えば T_{inv} , 平均横運動量等) がスムーズに変化していることが分かった。
4. Au+Au 200 GeV (0-10 %) の Nuclear modification factor R_{AA} を測定し、中間 p_T 領域でバリオン生成異常を確認した。
5. 測定した横運動量分布を、NLO および NLL pQCD 計算結果との比較を行った。62.4 GeV データは NLL pQCD の方が良く合うことが分かった。

以上の結果を Physical Journal C 誌に投稿し、掲載された [11]。また本論文は、数理物質科学研究科博士後期課程修了生の金野正裕氏 (2008 年博士号取得) と中條との共同で、データ解析及び論文執筆を行った。

(6) LHC-ALICE 実験におけるジェット物理解析

本研究室では、LHC-ALICE 実験におけるジェット再構成、およびジェットをプローブとした QGP 物性研究を推進している。特に、今年度は以下の項目に着目し、LHC-ALICE 実験のデータ解析を行った。

- 荷電粒子を使ったダイジェット-ハドロン相関 (p+p 2.76 TeV)
- π^0 - ジェット相関 (Pb+Pb 2.76 TeV および p+p 2.76, 7 TeV)
- ダイジェットエネルギーバランスの粒子多重度依存性の測定 (p+p 7 TeV)

特に陽子・陽子 7 TeV におけるダイジェットエネルギーバランスの測定では、高い生成粒子多重度イベントにおいて、シミュレーション結果と比較して、エネルギーバランスが崩れる傾向が見れたが(窪田晋太郎氏、2011年度修士論文)、結論づけるには更なる高統計のデータが必要である。今後は、上記の研究テーマをさらに発展させるとともに、電磁カロリメータおよび TPC 検出器を用いたジェットと直接光子の測定を行い、重イオン衝突におけるジェット抑制効果の研究や、パートン破碎関数の変化など、ジェット・光子を用いた QGP 物性の研究を多角的に進める。

参考文献

- [1] T.Moriguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A **624**, 27 (2010).
- [2] R.Sanchez *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 033002 (2006).
- [3] T.Myo *et al.*, Prog. Theor. Phys. **119**, 561 (2008).
- [4] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978)
- [5] Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa *et al.*, Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 108 (49), 2011, 19526-19529.
- [6] 笹 公和, 筑波大学タンデム加速器施設の震災被害と復興計画, 加速器, Vol.9 (1), 2012, 14-21.
- [7] J.S. Schweitzer, Z.E. Switkowski, R.M. Wieland NPA 287 (1977) 344
- [8] ALICE Collaboration, Phys.Rev.Lett. 107(2011)032301.
- [9] ALICE Collaboration, Phys.Lett.B 708(2012)249-264.
- [10] PHENIX Collaboration, Phys.Rev.Lett. 107(2011)252301.
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), Phys. Rev. **C 83**, 064903 (2011).

<論文>

1. T. Yamaguchi, K. Tanaka, T. Suzuki, A. Ozawa, T. Ohtsubo, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, M. Fukuda, Y. Hashizume, K. Inafuku, N. Iwasa, T. Izumikawa, K. Kobayashi, M. Komuro, Y. Kondo, T. Kubo, M. Kurokawa, T. Matsuyama, S. Michimasa, T. Motobayashi, T. Nakabayashi, S. Nakajima, T. Nakamura, H. Sakurai, R. Shinoda, M. Shinohara, H. Suzuki, M. Takechi, E. Takeshita, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yamada, T. Yasuno, M. Yoshitake, Nuclear reactions of $^{19,20}\text{C}$ on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer, Nuclear Physics A 864 (2011) 1-37.
2. Nozomi Sato, Hiromitsu Haba, Takatoshi Ichikawa, Daiya Kaji, Yuki Kudou, Kouji Morimoto, Kosuke Morita, Kazutaka Ozeki, Takayuki Sumita, Akira Yoneda, Eiji Ideguchi, Hiroyuki Koura, Akira Ozawa, Tsutomu Shinozuka, Takayuki Yamaguchi, and Atsushi Yoshida, Production and Decay Properties of ^{264}Hs and ^{265}Hs , J. Phys. Soc. Jpn., Vol.80, (2011) 094201.
3. K. Minamisono, T. Nagatomo, K. Matsuta, C. D. P. Levy, Y. Tagishi, M. Ogura, M. Yamaguchi, H. Ota, J. A. Behr, K. P. Jackson, A. Ozawa, M. Fukuda, T. Sumikama, H. Fujiwara, T. Iwakoshi, R. Matsumiya, M. Mihara, A. Chiba, Y. Hashizume, T. Yasuno, and T. Minamisono, Low-energy test of second-class current in β decays of spin-aligned ^{20}F and ^{20}Na , Phys. Rev. C 84, 055501 (2011).
4. A. Ozawa, Y. Hashizume, Y. Aoki, K. Tanaka, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, B. A. Brown, M. Fukuda, K. Inafuku, N. Iwasa, T. Izumikawa, K. Kobayashi, M. Komuro, Y. Kondo, T. Kubo, M. Kurokawa, T. Matsuyama, S. Michimasa, T. Motobayashi, T. Nakabayashi, S. Nakajima, T. Nakamura, T. Ohtsubo, H. Sakurai, R. Shinoda, M. Shinohara, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, E. Takeshita, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yamada, T. Yamaguchi, T. Yasuno, and M. Yoshitake, One- and two-neutron removal reactions from $^{19,20}\text{C}$ with a proton target, Phys. Rev. C 84, 064315 (2011).
5. M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Kuboki, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, T. Moriguchi, H. Ooishi, D. Nagae, H. Suzuki, S. Suzuki, T. Izumikawa, T. Sumikama, M. Ishihara, H. Geissel, N. Aoi, Rui-Jiu Chen, De-Qing Fang, N. Fukuda, I. Hachiuma, N. Inabe, Y. Ishibashi, Y. Ito, D. Kameda, T. Kubo, K. Kusaka, M. Lantz, Yu-Gang Ma, K. Matsuta, M. Mihara, Y. Miyashita, S. Momota, K. Namihira, M. Nagashima, Y. Ohkuma, T. Ohnishi, M. Ohtake, K. Ogawa, H. Sakurai, Y. Shimbara, T. Suda, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, R. Watanabe, M. Winkler, Y. Yanagisawa, Y. Yasuda, K. Yoshinaga, A. Yoshida, K. Yoshida, Interaction cross sections for Ne isotopes towards the island of inversion and halo structures of ^{29}Ne and ^{31}Ne , Physics Letters B 707 (2012) 357-361.
6. K. Nomura, Y. Ohki, M. Fujimaki, X. Wang, K. Awazu, T. Komatsubara A study of the critical factor determining the size of etched latent tracks formed on SiO_2 glass by swift-Cl-ion irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 272 (2012) 1-4.
7. S. Merchel, W. Bremser, V. Alfimov, M. Arnold1, G. Aumaître, L. Benedetti, D. L. Bourlès, M. Caffee, L. K. Fifield, R. C. Finkel, S. P. H. T. Freeman, M. Martschini,

- Y. Matsushi1, D. H. Rood, K. Sasa, P. Steier, T. Takahashi, M. Tamari, S. G. Tims, Y. Tosaki, K. M. Wilcken and S. Xu, Ultra-trace analysis of ^{36}Cl by accelerator mass spectrometry: an interlaboratory study, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 400, 2011, 3125-3132. doi:10.1007/s00216-011-4979-2.
8. Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Jun-ichi Kitagawa, Satoshi Ikarashi, Tomohiro Nishimura, Ying-Shee Wong, Yukihiko Satou, Koji Handa, Tsutomu Takahashi, Masanori Sato, Takeyasu Yamagata, First assessment of individual radionuclides distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2011. doi:10.1073/pnas.1111724108.
 9. Yuki Tosaki, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Measurement of ^{36}Cl deposition flux in central Japan: Natural background level and its seasonal variability, *Journal of Environmental Radioactivity*, *Journal of environmental radioactivity*, 106 (2012) 73-80.
 10. N. Kinoshita, M. Paul, Y. Kashiv, P. Collon, C. M. Deibel, B. DiGiovine, J. P. Greene, D. J. Henderson, C. L. Jiang, S. T. Marley, T. Nakanishi, R. C. Pardo, K. E. Rehm, D. Robertson, R. Scott, C. Schmitt, X. D. Tang, R. Vondrasek, A. Yokoyama, A Shorter ^{146}Sm Half-Life Measured and Implications for ^{146}Sm - ^{142}Nd Chronology in the Solar System, *Science*, 30 March 2012, Vol. 335 no. 6076 pp. 1614-1617.
 11. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *JHEP* 01, 128, 2012
 12. B. Abelev et al. (Alice Collaboration), J/psi polarization in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, *Phys. Rev. Lett.* 108, 082001, 2012
 13. B. Abelev et al. (Alice Collaboration), Light vector meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Phys. Lett. B* 710, 557-568, 2012
 14. B. Abelev et al. (Alice Collaboration), J/psi Production as a Function of Charged Particle Multiplicity in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Phys. Lett. B* 712, 165-175 2012
 15. B. Abelev et al. (Alice Collaboration), Measurement of Event Background Fluctuations for Charged Particle Jet Reconstruction in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, *JHEP* 1203, 053, 2012
 16. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Higher harmonic anisotropic flow measurements of charged particles in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV, *Phys. Rev. Lett.* 107, 032301, 2011
 17. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Particle-Yield Modification in Jet-like Azimuthal Dihadron Correlations in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, *Phys. Rev. Lett.* 108, 092301, 2011
 18. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Harmonic decomposition of two-particle angular correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, *Phys. Lett. B* 708, 249-264, 2011

19. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Heavy flavour decay muon production at forward rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Phys. Lett. B 708, 265-275, 2011
20. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Femtoscopy of pp collisions at $\sqrt{s}=0.9$ and 7 TeV at the LHC with two-pion Bose-Einstein correlations, Phys. Rev. D 84, 112004, 2011
21. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Suppression of back-to-back hadron pairs at forward rapidity in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev.Lett. 107, 172301 2011
22. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Measurements of Higher-Order Flow Harmonics in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. Lett. 107, 252301 2011
23. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Production of ω mesons in p+p, d+Au, Cu+Cu, and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C 84, 044902 2011
24. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Rapidity and transverse momentum dependence of inclusive J/psi production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. Phys. Lett. B 704, 442-455, 2011
25. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), J/psi suppression at forward rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C 84, 054912, 2011
26. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Identified charged hadron production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ and 62.4 GeV. Phys. Rev. C 83, 064903, 2011
27. K. Aamodt et al. (Alice Collaboration), Production of pions, kaons and protons in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC, Eur. Phys. J. C 71, 1655, 2011
28. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Suppression of away-side jet fragments with respect to the reaction plane in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C 84, 024904, 2011

<招待講演 (国際会議) >

1. Akira Ozawa, 'Overview of Rare-RI Ring and mass measurements' RIBF-ULIC-Symposium-009 'Physics of Rare-RI Ring' Nov. 10-12, 2011, Wako, RIKEN Nishina Center, Japan (招待講演)
2. Daisuke Nagae, 'TOF detector for RIKEN Rare-RI Ring' RIBF-ULIC-Symposium-009 'Physics of Rare-RI Ring' Nov. 10-12, 2011, Wako, RIKEN Nishina Center, Japan (招待講演)
3. Yuki Tosaki, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahash and Yasuo Nagashima, Estimation of Groundwater Age Using the ^{36}Cl Bomb Pulse: a Case Study in the Mt. Fuji Area, Central Japan, AOGS 2011. (招待講演)

4. S. Esumi, "Collective Flow Measurements from the PHENIX Experiment", Quark Matter 2011, XXII International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, May 23-28, 2011, Annecy, France (招待講演)
5. S. Esumi, "Imaging the initial condition by (1) higher order event anisotropy v_n (2) multi-particle correlation (3) direct photon v_2 from the RHIC-PHENIX experiment", The Seventh Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2011), Sep. 20-24, 2011, Tokyo, Japan (招待講演)
6. T. Chujo, "Global event properties in Pb+Pb collisions at LHC energies from ALICE", XLI International Symposium of Multiparticle Dynamics (ISMD 2011), Miyajima, Japan, Sep. 26-30, 2011 (招待講演)

<国際会議発表>

1. Peter Schury, 'MRTOF at RIKEN' RIBF-ULIC-Symposium-009 'Physics of Rare-Ring' Nov. 10-12, 2011, Wako, RIKEN Nishina Center, Japan
2. K. Sasa, S. Ishii, and M. Kurosawa, Micro-PIXE system for geoscience applications at the Tsukuba 1 MV Tandatron accelerator facility, the 7th International Symposium on Bio-PIXE (BioPIXE7), Tohoku University, Sendai, Japan, 30 Oct. - 4 Nov. 2011.
3. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi and Keisuke Sueki, New AMS project at the University of Tsukuba, The 4th East Asia AMS Symposium, 16-18 December, 2011, Takeda Hall, The University of Tokyo.
4. Yuki Matsushi, Kimikazu Sasa, Kazuna Kurosumi, Tsutomu Takahashi, Kazuho Horiuchi, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Hiroyuki Matsuzaki, Motohiro Hirabayashi and Hideaki Motoyama, Long-term ^{36}Cl depositional flux recorded in the Dome Fuji ice core, Antarctica: a possible link to climate change in mid latitudes during the last two deglaciations, The 4th East Asia AMS Symposium, 16-18 December, 2011, Takeda Hall, The University of Tokyo.
5. Keisuke Sueki, Jun-ichi Kitagawa, Takahiro Amano, Michiko Tamari, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Norikazu Kinoshita, Hangtao Shen, Yuki Tosakii, Yuki Matsushi and Matuzaki Distributions of radionuclides ^{36}Cl and ^{129}I in surface soils, The 4th East Asia AMS Symposium, 16-18 December, 2011, Takeda Hall, The University of Tokyo.
6. Yuki Tosaki, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Sonia Gmati and Sayako Ueno, Characterization of groundwater chemistry and ages in volcanic aquifers of the southern foot of Mt. Fuji, central Japan, The 4th East Asia AMS Symposium, 16-18 December, 2011, Takeda Hall, The University of Tokyo.
7. T. Chujo, "Physics with DCal in ALICE", Symposium on Jet Physics at RHIC and LHC, Hangzhou, China, July 21, 2011
8. M. Sano, "Systematic study of elliptic and higher order harmonics by event plane method in Pb-Pb 2.76 TeV collisions at LHC-ALICE", The Seventh Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2011), Sep. 20-24, 2011, Tokyo, Japan

9. T. Todoroki, “ Two particle hadron correlations with higher harmonic reaction plane in Au+Au 200 GeV collisions at RHIC-PHENIX ”, The Seventh Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2011), Sep. 20-24, 2011, Tokyo, Japan
10. T. Niida, “ Azimuthal HBT measurements of charged pions and kaons in Au+Au 200GeV collisions at RHIC-PHENIX ”, The Seventh Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2011), Sep. 20-24, 2011, Tokyo, Japan
11. S. Mizuno, “ Identified particle v3 measurements at 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX experiment ”, The Seventh Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2011), Sep. 20-24, 2011, Tokyo, Japan
12. S. Esumi, ”sPHENIX upgrade at mid-rapidity”, Future Directions in High Energy QCD, Nishina Hall, RIKEN, Japan, Oct. 20-22, 2011
13. S. Esumi, ”Collective Flow and Correlation with Higher Harmonic Event Plane”, 7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2011), CCNU, Wuhan, China, Nov. 7-11, 2011
14. Y. Ikeda, ”Understanding of Radial and Elliptic expansion with Quark number scaling and Blast wave model in 200GeV Au+Au at RHIC-PHENIX”, 7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2011), CCNU, Wuhan, China, Nov. 7-11, 2011
15. S. Esumi, ”A new upgrade of PHENIX experiment for future US-J project”, US-Japan Workshop, KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 20-21, 2011.
16. Y. Miake, ”Experimental Seminar:Quark-Gluon Plasma”, Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology), Kusatsu, Japan, Jan. 11,2012

<日本物理学会発表>

1. 長江大輔、荷電変化断面積測定による B 同位体の荷電半径の研究、日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学) 2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
2. 阿部康志、理研稀少 RI リングのための飛行時間検出器の開発、日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学) 2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
3. 舟田周平、谷川英臣、笹公和、小原ひとみ、中井陽一、J.O.P. Pedersen、P. Hvelplund、富田成夫、N₂/H₂O/SO₂ 中での 20 MeV 陽子線による液滴生成過程における SO₂ 濃度依存性、日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学) 2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
4. 江角晋一、シンポジウム 「LHC・RHIC 重イオン衝突最新結果で迫るクォーク・グルーオンプラズマの本質 (Quark-Gluon Plasma explored by new results of heavy-ion collisions at LHC and RHIC)」 “ LHC - ALICE 実験におけるソフトな指針で見る QGP (QGP through soft probes at LHC-ALICE) ”、日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学) 2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
5. 坂田洞察、” Jet Measurement with ALICE experiment at the LHC ”、日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学) 2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日

6. 佐野正人、”The measurement of identified charged hadron elliptic flow and higher order harmonics in $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ Pb+Pb collisions at LHC-ALICE ”、日本物理学会 2011 年秋季大会（弘前大学）2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
7. 轟木貴人、”Two particle correlations with higher harmonic reaction plane in Au+Au 200 GeV collisions at RHIC-PHENIX ”、日本物理学会 2011 年秋季大会（弘前大学）2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
8. 新井田 貴文、”Azimuthal HBT measurements of charged pions and kaons in Au+Au 200GeV collisions at RHIC-PHENIX ”、日本物理学会 2011 年秋季大会（弘前大学）2011 年 9 月 16 日～9 月 19 日
9. 小松原哲郎、「 ^{26}Si 励起状態の角分布、角相関測定」日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
10. 土田秀次、村越亮平、森翔、横江潤也、富田成夫、笹公和、石井聡、間嶋拓也、今井誠、柴田裕実、伊藤秋男、キャピラリーを透過した高速炭素クラスターの生存率における出口径依存性、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
11. 中條達也、”Electromagnetic calorimeter upgrade for the di-jet measurement in LHC-ALICE ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
12. 轟木貴人、”Two particle correlations with respect to higher harmonic plane in Au+Au 200 GeV collisions at RHIC-PHENIX ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
13. 新井田貴文、”Azimuthal HBT measurement of charged pions with respect to 3rd event plane In Au+Au 200GeV collisions at RHIC-PHENIX ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
14. 渡邊大介、”Neutral pion and jet measurements in Pb-Pb collision at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ in ALICE ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
15. 中込宇宙、”RHIC-PHENIX 実験におけるシリコン崩壊点検出器 (VTX) を用いた反応平面測定 ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日
16. 中島朋、”ラドン検出器を用いた放射線教育 - 教材開発と指導方法 ”、日本物理学会、第 67 回年次大会、於関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日

<国内学会発表>

1. 笹 公和、松四雄騎、戸崎裕貴、黒住和奈、高橋努、末木啓介、松崎浩之、堀内一穂、東久美子、本山秀明、氷床コア中の宇宙線生成核種 Cl-36 の変動記録、「第 2 回極域科学シンポジウム」国立極地研究所、会期：平成 23 年 11 月 14 - 18 日

2. 笹 公和、「筑波大学の加速器質量分析装置による研究の展望」、西アジア文明研究センター 第5回定例研究会、2012年1月20日(金)、筑波大学人文社会学系棟A 110
3. 笹 公和、「マルチタンデム加速器施設の学術・産業共用促進事業」、イノベーションつくば 2012WS 「先端研究施設共用事業の新展開～日本復興への科学技術の役割と Tsukuba からの提案～」、放送大学東京文京学習センター、2012年2月24日
4. 笹 公和、「筑波大学の新しいオンビーム加速器システム：新たな大型共用実験装置として」、イノベーションつくば 2012WS 「先端研究施設共用事業の新展開～日本復興への科学技術の役割と Tsukuba からの提案～」、放送大学東京文京学習センター、2012年2月24日
5. 笹公和, 末木啓介, 北川潤一, 高橋努, 沈洪涛, 松村万寿美, 安倍聡美, 佐藤志彦, 木下哲一, 山形武靖, 松崎浩之, 福島第一原子力発電所事故により放出された放射性ヨウ素 129 の表層土壌分布、第13回「環境放射能」研究会、2012年2月27日 - 29日, 高エネルギー加速器研究機構 研究本館・小林記念ホール
6. 笹公和, 末木啓介, 北川潤一, 木下哲一, 高橋努, 沈洪涛, 松村万寿美, 山形武靖, 松崎浩之, 福島原発事故由来の放射性ヨウ素 129 の加速器質量分析と放射性ヨウ素 131 評価法への適用、日本原子力学会「2012年春の年会」 2012年3月19日(月) - 21日(水)、福井大学 文京キャンパス
7. 岡 大地, 廣瀬 靖, 伊藤 誠二, 森田 明, 松崎 浩之, 福谷 克之, 石井 聡, 笹公和, 関場 大 一郎, 長谷川 哲也, 新奇強誘電体ペロブスカイト型 $\text{SrTaO}_{3-y}\text{N}_y$ 薄膜の誘電特性評価、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演、山形大学小白川キャンパス、2011年8月29日(月)～9月2日(金)
8. 木下 哲一, 末木 啓介, 北川 潤一, 五十嵐 訓, 西村 朋紘, 黄 穎斯, 佐藤 志彦, 半田 晃士, 高橋 努, 笹 公和, 佐藤 正教, 山形 武靖, 福島県および関東地方東部における福島原発事故の放射能調査、Radioactivity survey on the Fukushima accident in Fukushima and eastern Kanto、日本放射化学学会年会・第55回放射化学討論会、2011年9月20日(火)～22日(木)、長野・若里市民文化ホール
9. 北川潤一, 末木啓介, 笹公和, 高橋努, 木下哲一, 松四雄騎, 松崎浩之, 原発事故以前の土壌中の放射性核種 ^{129}I と ^{137}Cs の分布、日本放射化学学会年会・第55回放射化学討論会、2011年9月20日(火)～22日(木)、長野・若里市民文化ホール
10. 西村朋紘, 松四雄騎, 末木啓介, 笹公和, 高橋努, 木下哲一, 天野孝洋, 北川潤一, 黒住和奈, 地表面下における石灰岩中の宇宙線生成核種 ^{36}Cl の深度プロファイル: 侵食速度の復元にむけて、日本放射化学学会年会・第55回放射化学討論会、2011年9月20日(火)～22日(木)、長野・若里市民文化ホール
11. 黒住和奈, 笹公和, 末木啓介, 高橋努, 松四雄騎, 木下哲一, 戸崎裕貴, 堀内一穂, 松崎浩之, 本山秀明, 南極氷床コア中の塩素 36 測定による 11 ka 付近の宇宙線強度変動の研究、日本放射化学学会年会・第55回放射化学討論会、2011年9月20日(火)～22日(木)、長野・若里市民文化ホール
12. 佐藤 志彦, 末木啓介, 北川潤一, 五十嵐訓, 笹公和, 土壌における福島原発事故由来の放射性核種の深度分布、Depth distributions of radionuclides in soils from the Fukushima

- nuclear accident、日本放射化学学会年会・第55回放射化学討論会、2011年9月20日（火）～22日（木）、長野・若里市民文化ホール
13. 黒澤 正紀、Shin Ki-Cheol、笹 公和、石井 聡、日本の新第三紀花崗岩の熱水流体の組成と挙動、日本鉱物科学会 2011 年年会、合同学術大会、2011年9月9日～9月11日、茨城大学水戸キャンパス 共通教育棟
 14. 黒住和奈、笹公和、末木啓介、高橋努、松四雄騎、木下哲一、戸崎裕貴、堀内一穂、松崎浩之、本山秀明、氷床コア中の ^{36}Cl 測定による 11 ka 付近の宇宙線強度変動の分析、「第2回極域科学シンポジウム」、2011年11月14～18日、国立極地研究所 2階大会議室
 15. Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Jun-ichi Kitagawa, Satoshi Ikarashi, Tomohiro Nishimura, Ying-Shee Wong, Yukihiko Satou, Koji Handa, Tsutomu Takahashi, Masanori Sato, Takeyasu Yamagata, 福島県及び関東地方におけるヨウ素-131の降下量「生物と環境におけるヨウ素」、ヨウ素発見200年記念 サテライトシンポジウム、2011年11月19日（土）学習院大学
 16. 末木啓介、北川潤一、笹 公和、高橋 努、沈 洪涛、木下哲一、松四雄騎、松崎浩之、山形武靖、「福島県東部地域における土壤中の放射性ヨウ素 I-129 の分布 一原発事故の前と後」「生物と環境におけるヨウ素」、ヨウ素発見200年記念 サテライトシンポジウム、2011年11月19日（土）、学習院大学
 17. 鈴木 温、岡 大地、廣瀬 靖、伊藤 誠二、森田 明、松崎 浩之、福谷 克之、石井 聡、笹 公和、関場 大一郎、福村知昭、長谷川 哲、アナターゼ型 TaON エピタキシャル薄膜の物理特性、(Physical properties of anatase TaON epitaxial thin film)、2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会、早稲田大学 早稲田キャンパス、2012年3月15日（木）～18日（日）
 18. 北川潤一、末木啓介、笹公和、高橋努、木下哲一、松四雄騎、松崎浩之、放射性核種 ^{137}Cs 、 ^{129}I の土壤中の分布に関する研究、第13回「環境放射能」研究会、2012年2月27日～29日、高エネルギー加速器研究機構 研究本館・小林記念ホール
 19. 西村朋紘、松四雄騎、末木啓介、笹公和、高橋努、松崎浩之、地表面下における石灰岩中の宇宙線生成核種 ^{36}Cl および ^{10}Be の深度プロファイルを用いた侵食速度の復元、第13回「環境放射能」研究会、2012年2月27日～29日、高エネルギー加速器研究機構 研究本館・小林記念ホール
 20. 黒住和奈、笹公和、末木啓介、高橋努、松四雄騎、戸崎裕貴、堀内一穂、松崎浩之、本山秀明、最終退氷期から完新世にかけての南極氷床コア中の宇宙線生成核種 ^{36}Cl の分析、第13回「環境放射能」研究会、2012年2月27日～29日、高エネルギー加速器研究機構 研究本館・小林記念ホール
 21. 小松原哲郎、「1M タンデトロンによる宇宙核物理」、「筑波大学複合タンデム加速器施設の新展開—タンデム加速器更新計画と今後の研究展望」、筑波大学、2012年3月29日

<学位論文（博士論文）>

1. 博士（理学）、森口 哲朗（Tetsuaki Moriguchi）、Density distributions for two neutron halo nuclei ^{11}Li and ^{14}Be deduced by the reaction cross section measurements

<学位論文 (修士論文) >

1. 修士 (理学)、阿部 康志 (Yasushi Abe)、炭素薄膜からの二次電子放出を利用した RI ビーム飛行時間検出器の開発 (Developments of time-of-flight detector for RI beams using secondary electron emission from carbon foil)
2. 修士 (理学)、奥村 公威 (Kimitake Okumura)、 ^{48}Ca ビームによる Al 同位体の生成断面積測定 (Measurements of production cross sections for Al isotopes from ^{48}Ca beam)
3. 修士 (理学)、福岡 翔太 (Shota Fukuoka)、J-PARC 主リングのインピーダンス整合集中定数型キッカー磁石の開発 (Developments of lumped parameter type kicker magnet with impedance matching for J-PARC main ring)
4. 修士 (理学)、中村 聡佑 (Sosuke Nakamura)、質量校正の為に RF カーペットを用いた高効率 ESI の開発 (Developments high efficiency ESI using RF carpet for mass calibration)
5. 修士 (理学)、水野三四郎 (Sanshiro Mizuno)、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における高次方位角異方性の粒子依存性の研究 (Study of identified particle higher harmonic azimuthal anisotropy in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ by the RHIC-PHENIX experiment)
6. 修士 (理学)、近藤祐樹 (Yuki Kondo)、LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛+鉛衝突における多粒子相関の研究 (Study of multi-particle correlations in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ by the LHC-ALICE experiment)
7. 修士 (理学)、窪田晋太郎 (Shintaro Kubota)、LHC-ALICE $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 陽子陽子衝突実験におけるジェットエネルギーバランスの粒子多重度依存性の研究 (Study of the multiplicity dependence of the jet energy balance in p+p collisions at $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ by the LHC-ALICE experiment)
8. 修士 (理学)、仲里仁 (Hitoshi Nakazato)、LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛+鉛衝突における高次方位角異方性の研究 (Study of Higher Harmonic Azimuthal anisotropy in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ by the LHC-ALICE experiment)

<学士論文>

1. 学士、物理学類、岡田 俊祐 (Syunsuke Okada)、稀少 RI リングのセプタム磁石の設計 (Design of septum magnet of Rare-RI Ring)
2. 学士、物理学類、斉藤 佑多 (Yuta Saito)、稀少 RI リングの入射ラインの光学計算 (Beam-optics for injection line in Rare-RI Ring)
3. 学士、物理学類、向井 もも (Momo Mukai)、クラスター源内部の希薄ガス流の DSMC シミュレーション (DSMC simulation of rarefied gas flow inside Cluster-Ion Source)
4. 学士、物理学類、大西貴博、(Takahiro Onishi)、スカンジウム 45 + 陽子反応による宇宙元素合成の研究 (Study of nucleosynthesis by means of scandium 45 + proton reaction)

5. 学士、物理学類、小林大洋、(Taiyou Kobayashi)、検出器シミュレーション GEANT を用いた LHC-ALICE 実験におけるジェット再構成の評価
6. 学士、物理学類、木原宏一、(Kouichi Kihara)、RHIC-PHENIX 実験における 10 ピコ秒高時間分解能飛行時間測定器開発に向けたマルチアノード MCP-PMT の性能評価

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究 (C)、銀河系ガンマ線源 A 1 - 2 6 の天体起源の解明、代表者：小松原 哲郎、700,000 円 (間接経費 210,000 円)
2. 基盤研究 (B)、蓄積リングおよび原子核実験用の窓無し固体水素パラ標的の開発、分担：小沢顕、200,000 円
3. 挑戦的萌芽研究、「難測定核種カルシウム 4 1 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」、研究代表者：笹 公和、1,300,000 円 (間接経費 390,000 円)
4. 基盤研究 (B)、「加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確立」研究代表者：笹 公和、1,700,000 円 (間接経費 510,000 円)
5. 基盤研究 (B)、「花崗岩深部地下水に対する流体包有物組成の影響に関する研究」、研究代表者 黒澤正紀研究分担者 笹 公和、小松原哲郎、安間了、辻村真貴、500,000 円 (間接経費：150,000 円)
6. 基盤研究 (A)、「アイスコアに刻まれた十～千年スケールの宇宙線強度変動と地球環境変動」、研究代表者 松崎浩之、研究分担者 笹 公和、堀内一穂、柴田康行、村松康行、本山秀明、川村賢二、11,400,000 円 (間接経費 3,420,000 円)、 研究者分担金 笹 公和 2,100,000 円

<外部資金取得状況>

1. 平成 22 年度公益財団法人クリタ水・環境科学振興財団、国内研究助成事業 「長半減期核種 Cl-36 を用いた地下水滞留時間評価法の研究」研究代表者 笹 公和、研究期間：2010 年 10 月 - 2011 年 9 月、研究経費：650 千円
2. 筑波大学・KEK 連携事業「物質-量子ビーム融合領域」、素粒子原子核分野 (検出器・加速器科学 分担)、三明 康郎、小沢 顕、笹 公和、中條 達也、2,000 千円 (2011 年度)

<学内プロジェクト>

1. 筑波大学平成 22 年度プレ戦略イニシアティブ (研究拠点提案型)、高度制御量子ビームを用いた先端的分析技術による研究教育と産学連携拠点の形成、(Formation of center of excellence for research and education and industry-university cooperation with advanced analytical techniques using highly controlled particle beams)、研究代表者 笹 公和、採択金額 (千円) 10,000 千円 (2011 年度)

2. 2011 筑波大学 東日本大震災復興支援プログラム、東日本大震災による原発事故後の放射性核種の汚染の実態と対策、研究代表者 松本 宏 アイソトープ総合センター長、研究者分担金 笹 公和 300,000 円 (2011 年度)

VII – 1 . 非平衡統計物理

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 (Salerno 大 (伊) 留学, 2010.10.1~2011.9.30),
真山 祐児
博士前期課程大学院生 程 コウ, 阿部 将大

【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) 論文 [1, 3], 解説・紀要 [1], 講演 [1, 2, 6, 7, 10, 13, 15]

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 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。乱流の特性を抽出するためには, スケールを変えた一連の PDF の情報が必要である。一連のスケール $r = \ell_n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) は, 観測者が指定する拡大率 $\delta (> 1)$ で与えられるものであり, δ の値が乱流系の観測に影響を与えてはならない。この要請から, スケーリング関係式は $1/(1-q) = (1/\alpha_- - 1/\alpha_+) \ln \delta / \ln 2$ が導出された。ただし, α_- と α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は, 注目している物理量のマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ のゼロ点である。

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。Coherent な運動とは, Reynolds 数が無限大の極限で, N-S 方程式がスケール変換の下に不変であることに起因して, 物理量に現れる微小スケールでの発散と関わる運動を指す。発散の指数 α (これは, スケール変換で任意パラメータとして現れる実数である) を確率変数と読み直すことによりゆらぎの効果を取り入れ, その物理量の間欠的发散 (実際には有限のバースト) と関連付ける。Coherent 部分は, 間欠性指数 μ を唯一のパラメータとして含むマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ により特定される。発散の指数を特徴付ける $f(\alpha)$ は, 階層構造の深度 n に依らず同一である。自己相似性に関わるこの階層構造は, Reynolds 数無限大で得られる $f(\alpha)$ の関数形で特定される。エネルギー・カスケード・モデルの描像で絵解き解釈をすると, Reynolds 数無限大では, カスケード・ステップ数が無限大で, 階層構造は $f(\alpha)$ で特定されるマルチスケール・Cantor 集合の構造である。実際には, Reynolds 数は有限であり, 階層は高々数階層しか実現しないが, その Reynolds 数が有限である効果は, Reynolds 数無限大で見られる理想的な coherent な運動で高精度に近似できると考えられる。その現れとして, 実際の乱流も PDF の裾野部分の運動も, 理想的な coherent 運動に付随するのと同じ関数形 $f(\alpha)$ で特定される。Coherent 運動への Reynolds 数が有限である効果は, μ の値に繰り込まれると解釈する。 μ はカノニカル分布における温度の役割をしている量で, μ の値の大小が Reynolds 数の大小の目安を与えると考えるのである。速度構造関数の m 次モーメントのスケール指数 ζ_m に寄与する $\alpha_{m/3}$ の値は, PDF の裾野に当たる部分に位置する。従って, スケーリング指数での乱流の解析は, coherent な運動部分のみの性質を見ていることにな

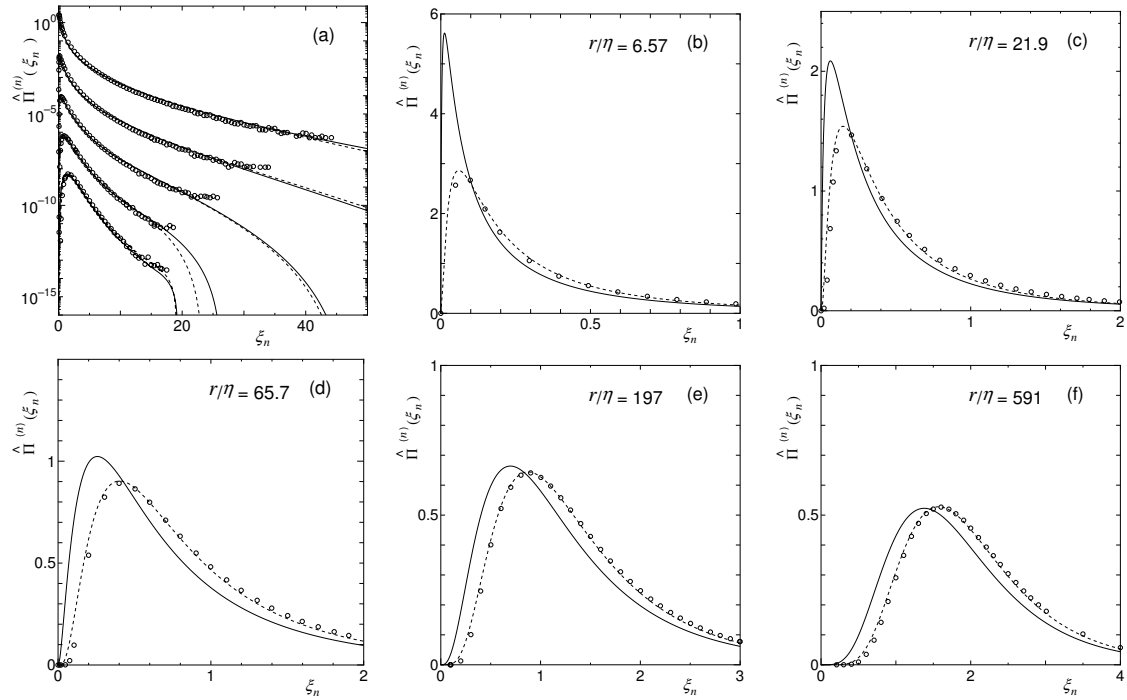


図 1: PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 3$ drawn on (a) log and (b)–(f) linear scale in the vertical axes. Open circles are the experimental PDFs derived with the help of the formula (1). Dashed lines represent the curves given by the present theory with the intermittency exponent $\mu = 0.260$. In (a) presented are PDFs for $r/\eta = 6.57, 21.9, 65.7, 197$ and 591 from the smallest value (top) to the largest value (bottom) with $r = \ell_n$. For better visibility, each PDF is shifted by -1 unit along the vertical axis. In (b)–(f), magnification of the center part PDFs for each r is given. We added, for comparison, solid lines which are the PDFs derived with the formula (2).

る。中心部分の PDF に現れるパラメータは、粗視化領域のサイズ r に関してスケーリング的振る舞いをする事が分かった。Incoherent 運動は、coherent 運動の周りの揺らぎであり、乱流に特有な揺らぎとして捉えるべきものであると考える。

現時点で世界一のサイズ 4096^3 大規模乱流 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、新しいスケーリング関係式が上記の物理的要請を満たしていることの検証をすると共に、PDF の裾野部分と中心部分の有する情報の抽出を行った。

気象研の毛利等による乱流風洞実験で測定された風速時系列生データの提供を受け、それからエネルギー散逸率 PDF を 2 種類の差分公式：

$$\partial v / \partial t \approx [v(t + \Delta t) - v(t)] / \Delta t, \quad (1)$$

$$\partial v / \partial t \approx \{8 [v(t + \Delta t) - v(t - \Delta t)] - [v(t + 2\Delta t) - v(t - 2\Delta t)]\} / 12\Delta t \quad (2)$$

にて算出し抽出した PDF を利用して、2 つの PDF の相対位置から、流体の coherent 成分と incoherent 成分が、それぞれ、安定的、不安定的であることを明らかにした (図 1)。

(2) δ^∞ 不安定周期軌道のべき的不安定性と Ljapunov 指数

(小松崎(院生), 本池巧(駿河台大), 有光) 論文 [4], 解説・紀要 [2, 3], 講演 [3, 4, 11, 14]

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 δ^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_{\pm} ($\alpha_- < \alpha_+$) 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に単独で存在し、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。

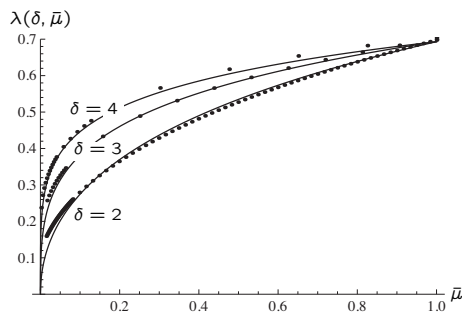


図 2: $2^{12}, 3^9, 4^7$ 不安定周期軌道に対する Ljapunov 指数 $\lambda(\mu, \delta)$ の $\bar{\mu}$ 依存性。 $\bar{\mu} = 0$ および $\bar{\mu} = 1$ が、それぞれ不安定化直後および充分発達したカオス状態に対応する。

今年度は、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 $\lambda(\mu, \delta)$ について、不安定化直後から充分発達した領域までの μ 依存性を、数値解析および理論解析の両面より考察した (図 2)。数値解析の結果を、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

$$\lambda(\mu, \delta) = \ln(1 + \bar{\mu}^{1/\delta}) \quad (3)$$

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 周期軌道が安定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。この度、 $\mu \sim \mu_{FD}$ 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が解析的に求まることが明らかとなった。 $(\bar{\mu} - 1)$ の 1 次のオーダーで位相共役からのずれを求めた結果、Ljapunov 指数の μ, δ 依存性が解析的に

$$\lambda(\mu, \delta) = \ln[2(1 + A(\bar{\mu} - 1)/\delta)] \quad (4)$$

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。(4) 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 (3) 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。今後は、(4) 式より得られる δ^K -PSSO の階層構造の μ 依存性を求め、充分発達したカオス領域に於ける δ^K 不安定周期軌道のマルチフラクタル・スペクトルと軌道の不安定性の関係を明らかにすることが目下の課題である。

(3) 極性流体としての粉粒体流の構成方程式

(武智 (院生), 有光, 吉田) 論文 [2], 講演 [5, 8, 9]

砂や小麦粉といった多数の粒子からなる系を総称して粉粒体と呼ぶ。粉粒体を速度場の他にスピン (粒子回転) 場の自由度を持つ極性流体と捉えたとき、その運動方程式を閉じるには、応力・偶応力と場の量との間の関係、すなわち構成方程式、を決める必要がある。

本研究では、昨年度に引き続き、粉粒体に特化したシミュレーション手法である離散要素法を用いて、一様剪断率の速度場、一様トルク外場下における2次元粉粒体の振る舞いを調べた。特に粉体のスピン場が渦度に従属しない場合の散逸関数や構成方程式を測定し、その関数形を決定した。

シミュレーションにおいて、マクロな場の量である応力是对應するミクロな量を適当な時空間スケールで平均することで得られるが、その応力の平均とそこからの揺らぎについて、平均空間スケール依存性を調べた。その結果、応力の揺らぎは運動論的寄与、粒子の接触による寄与と双方について平均空間スケールの増加に伴い減少し、平均空間スケールを十分大きくとれば応力の揺らぎを無視した極性流体の描像が適切であることを示唆した。揺らぎの減少の巾則は対応するミクロな量の相関距離が短いことと整合することが分かった。

また、トルク外力場の向きを一様剪断の向きに対して順方向と逆方向に加えることで、平均的なスピン場と渦度場の差について符号を反転することができる。この符号の反転について、測定結果の応力、粉体温度にずれがあることが分かった。この非対称性は粉粒体の体積分率 ν が小さい場合($\nu = 0.1$)に顕著で、 $\nu = 0.7, 0.8$ などの高密度になるとより対称的になった。低密度 $\nu = 0.1$ の場合は、シミュレーション結果は概ねLunの運動論的理論と整合するのであるが、この非対称性については従来の運動論では十分に取り入れられておらず、この非対称性を取り込んだ理論モデルの必要性を示唆した。

(4) 量子流体乱流の統計解析 (吉田, 有光) 講演 [16, 17, 18, 19]

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 (NS) 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はじめとして、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。

本年度の研究では、GP 方程式に完結近似の解析手法を適用し、理論面から量子流体乱流のエネルギースペクトルについて考察した。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おり、我々の研究でも、既に一様剪断平均流を持つ乱流、電磁流体乱流などに完結近似を適用しスペクトルを求めてきた。完結近似はどのような統計量で近似方程式を閉じるかが重要で、それにより結果も一般には異なる。どのような統計量を選ぶかは物理的考察が必要である。本研究では、GP 方程式の基本的場の量である ψ の2点相関関数および応答関数で式を閉じることにし、その完結近似方程式を導いた。GP 方程式では運動エネルギーと相互作用エネルギーを合せた全エネルギーが保存量であり、この全エネルギーがカスケードする場合のエネルギースペクトルのスケージングの巾を求めた。より定量的な解析、数値シミュレーションとの比較などは今後の課題である。

【2】散逸場の量子論，量子情報物理

(1) 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 [5], 講演 [12]

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。

連続量子情報の伝送では、スクイズド状態を利用してエンタングル状態が作られているが、実験室で生成されるスクイズド真空では、そのスクイズドの度をあまり大きくできないため（スクイーミング・パラメータ r 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。

さらに、Alice が実施するホモダイン測定が、不完全状態による測定である効果についての探求も進めた。これは、不完全測定に対する基本的な認識を精査する課題である。

(2) 量子鋏（程（院生）、有光）

量子鋏（QS）系では、量子もつれ状態と測定による波束の収縮を利用して、量子テレポーテーションを起こす。その際、ビーム・スプリッター（BS）は、量子絡み合い状態をつくるのに使用される。量子鋏系は、2つのBS（ BS_1 、 BS_2 ）を含んでいる。 BS_1 で、2モードの入射光に対する絡み合い状態1を生成する。 BS_2 で、QS系への入力状態（すべての光子数状態を含んだ古典的状态） $|\text{in}\rangle_c$ と絡み合い状態1との絡み合い状態2が生成される。この状態に特定の測定を実施すると、QS系の出力状態 $|\text{out}\rangle_a$ が得られる。これより、 $|\text{in}\rangle_c$ の波動状態から光子数が0個と1個の個数状態（光子の粒子的性質が表に出た量子的状態） $|\text{out}\rangle_a$ を切り出すことができる。

BSを通過する光が散逸やデコヒーレンスの影響を受けた場合、QSとしての機能に如何なる変化が現れるかを調べるために、QS系のNETFDによる定式化を行った。さらに、散逸的ハイゼンベルグ方程式を解くことより、生成・消滅演算子の時間発展に散逸の影響を取り入れた解を求めた。

(3) 脳皮質における非平衡相転移

（大日向（院生）、G. Vitiello（U of Salerno）論文 [6]）

脳の機能が発現する際、ニューロン集合体の振幅変調および位相変調の形成が見られる。このような構造形成を研究するには、異なる階層（微視的、中間的（メゾスコピック）、巨視的）に跨る解析が必要である。各階層に付随する特有な時空尺度と、脳で発生して消費される種々なエネルギー形態（電気的、化学的、熱的）がある。この研究では、中間的階層や巨視的階層の基礎をなす微視的な運動を、非平衡相転移の熱力学的側面に焦点を当てた取り扱いを行った。非定常領域における時間依存Ginzburg-Landau方程式を導出して、トポロジカルに非自明な構造（渦状態の解など）の形成に関する考察をし、脳の機能活性時に見られる冪則について議論した。この冪則は、脳の多体散逸モデルを特徴付けるコヒーレント状態と関連するものである。

【3】研究・教育成果の社会への還元・奉仕活動

雑誌編集委員（有光）社会還元等 [1]

ウクライナ国科学アカデミー凝縮系物理学研究所出版の学術雑誌「Condensed Matter Physics」の編集委員を務めた。

< 論文 >

- [1] (Selected paper from BIFD2011) T. Arimitsu, N. Arimitsu and H. Mouri: “Verification of PDFs within MPDFT by analyzing turbulence in a wind tunnel”, Fluid Dyn. Res. **44** (2012) 031402(15 pp).
- [2] K. Takechi, K. Yoshida and T. Arimitsu: “Numerical simulation of 2D granular particles and its analyses by means of the micropolar fluid model”, Central European J. Phys. (2012) in press (DOI: 10.2478/s11534-012-0036-9).

- [3] T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. Takechi, Y. Kaneda and T. Ishihara: “Towards a separation of the elements in turbulence via the analyses within MPDFT”, (2012) submitted.
- [4] T. Motoike and T. Arimitsu: “A new scaling relation characterizing the intermittency of δ^∞ periodic orbit”, (2012) in preparation to submit.
- [5] S. Kitajima, M. Obinata, T. Arimitsu and K. Yoshida: “Quantum teleportation for continuous variables via an imperfect entangled state with environment effects”, (2012) in preparation to submit.
- [6] W.J. Freeman, R. Livi, M. Obinata and G. Vitiello: “Cortal phase transitions, nonequilibrium thermodynamics and the time-dependent Ginzburg Landau equation”, Int. J. Modern Phys. B **26** (2012) 1250035(29 pages).

< 解説・紀要 >

- [1] 有光直子, 有光敏彦: 「マルチフラクタル確率密度関数 (PDF) 理論による乱流 PDF の解析」, 京都大学数理解析研究所講究録 (RIMS Report, Kyoto), **1771** (2011) 65–87.
- [2] 本池巧, 有光敏彦: 「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」, 京都大学数理解析研究所講究録 (RIMS Report, Kyoto), **1771** (2011) 88–105.
- [3] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦: 「 n^∞ 不安定周期軌道の階層構造の解析」, 京都大学数理解析研究所講究録 (RIMS Report, Kyoto), **1771** (2011) 106–123.

< 講演 >

- [1] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: “On a new interpretation of turbulence via the scaling relation of A&A model within MPDFT”, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), 2011 年 7 月 11 日–15 日, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus
- [2] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Verification of the scaling relation within Multifractal Probability Density Function Theory by analyzing PDFs from experiment and DNS”, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), 2011 年 7 月 11 日–15 日, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus
- [3] T. Motoike and T. Arimitsu: “Hierarchical Structures of Periodic Orbits and Multifractal Structure of Fully Developed Turbulence”, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), 2011 年 7 月 11 日–15 日, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus
- [4] M. Komatsuzaki, T. Motoike and T. Arimitsu: “On Cantor sets associated with unstable periodic orbits generated by the logistic map”, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), 2011 年 7 月 11 日–15 日, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus
- [5] K. Takechi, K. Yoshida and T. Arimitsu: “Numerical simulation of 2D granular particles and its analyses by means of the micropolar fluid model”, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), 2011 年 7 月 11 日–15 日, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus
- [6] T. Arimitsu and N. Arimitsu: “Multifractal Probability Density Function Theory and Its Application to Fully Developed Turbulence”, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (BIFD2011), 2011 年 7 月 18 日–21 日, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain

- [7] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Multifractal Probability Density Function Theory and Its Application to Fully Developed Turbulence — A Detailed Study of PDFs from Experiment and DNS —”, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (BIFD2011), 2011 年 7 月 18 日–21 日, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- [8] K. Yoshida, K. Takechi and T. Arimitsu: “Constitutive equations for granular flows under uniform mean shear and external torque”, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (BIFD2011), 2011 年 7 月 18 日–21 日, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- [9] K. Takechi, K. Yoshida and T. Arimitsu: “Numerical simulation of 2D granular particles and its comparison with the micropolar fluid theory”, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (BIFD2011), 2011 年 7 月 18 日–21 日, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- [10] 有光直子, 武智公平, 有光敏彦, 金田行雄, 石原卓: 「 4096^3 乱流のマルチフラクタル密度関数理論による解析 II」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日–24 日, 富山大学, 富山
- [11] 本池巧, 小松崎慎人, 有光敏彦: 「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造 V」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日–24 日, 富山大学, 富山
- [12] 北島佐知子, 有光敏彦, 吉田恭, 大日向正志: 「環境下における連続量テレポーテーション II」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日–24 日, 富山大学, 富山
- [13] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: “Analyses of two elements in turbulence by a multifractal theory”, International Workshop on *Anomalous Statistics, Generalized Entropies, and Information Geometry*, 2012 年 3 月 6 日–10 日, Nara Womens University, Japan.
- [14] 本池巧, 小松崎慎人, 有光敏彦: 「充分発達したカオス領域における不安定周期軌道の階層構造と不安定性の解析 III」, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日–27 日, 関西学院大学, 神戸
- [15] 有光直子, 有光敏彦, 毛利英明: 「風洞乱流のマルチフラクタル確率密度関数理論による解析 III」, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日–27 日, 関西学院大学, 神戸
- [16] 吉田恭, 有光敏彦: 「量子流体乱流の完結近似に向けて」, 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011 年 11 月 11 日, 九州大学応用力学研究所, 福岡.
- [17] (招待講演) 吉田恭: 「Navier-Stokes 方程式, 非線形 Schrödinger 方程式に従う乱流の統計理論」, 2011 年 12 月 21 日, RIMS 共同研究「偏微分方程式の背後にある確率過程と解の族が示す統計力学的な現象の解析」, 京都大学数理解析研究所, 京都.
- [18] (招待講演) 吉田恭: 「量子流体乱流のシミュレーションと完結近似」, 2012 年 2 月 13 日, 第 5 回核融合科学研究所・名古屋工業大学共同セミナー, 核融合科学研究所, 土岐.
- [19] 吉田恭, 有光敏彦: 「量子流体乱流の完結近似」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学, 西宮.

< 社会還元等 >

- [1] 有光敏彦: Condensed Matter Physics (The Institute for Condensed Matter Physics on the National Academy of Science of Ukraine), 編集委員

VII-2. 量子物性理論

教授：初貝安弘

助教：濱本雄治

大学院生：2名

1 物質中のディラックフェルミオンとしてのグラフェンの研究

1.1 ゼロエネルギーランダウ準位のトポロジカルな安定性

グラフェンにおいて重要と考えられるカイラル対称性はディラック分散のトポロジカルな起源であり、その物性に重要な役割を果たす。K点、K'点の2重に重複したディラックコーンの存在は、格子ゲージ理論においてよく知られたニールセン・ニウマンの定理の2次元の対応物でありカイラル対称な模型におけるフェルミオンダブリングと理解できる。また、磁場下のグラフェンに固有なゼロエネルギーランダウ準位の特異な安定性もこのカイラル対称性に帰着される。このゼロエネルギーランダウ準位の安定性は、リップルとよばれる単層グラフェンに固有の乱れの存在下においても保存されるが、これはリップルがなめらかなランダウゲージ場として働くことにより理解される。本年はこのゼロエネルギーランダウ準位のトポロジカルな安定性を下図に示す2層グラフェンにおいても推敲し、その特異な安定性とカイラル対称性の意義を数値計算により明らかとした。また、2層グラフェンのデバイス応用においては必須の重要性をもつと考えられる電場効果に着目した研究も数値的に行った。また2層グラフェンにおける trigonal warping という現象に関するリフシツツ転移のカイラル対称性の視点からの研究も現在進行中である。(図1)

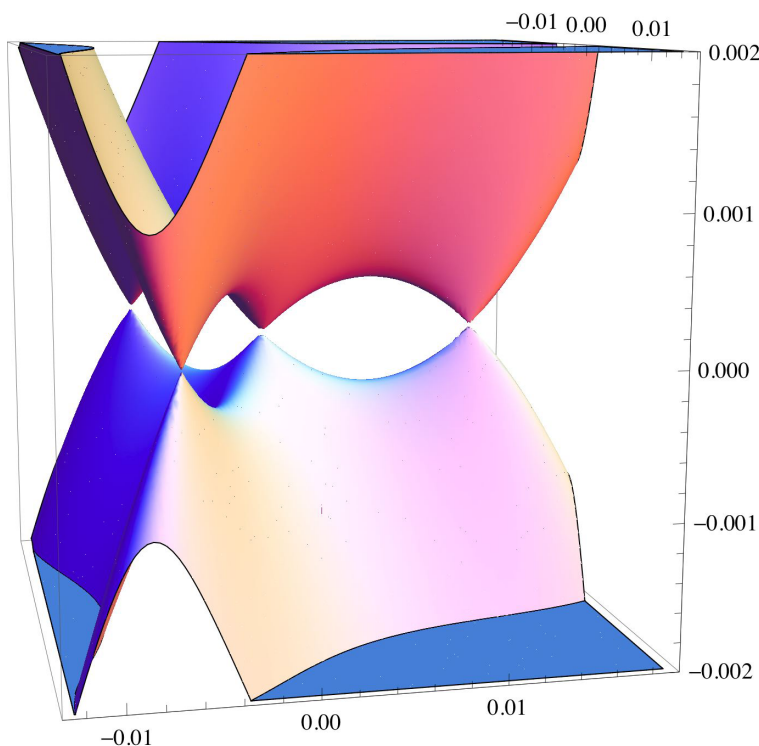


図 1: trigonal warping を含む 2 層グラフェンの K 点近傍でのエネルギー分散

1.2 電子間相互作用によるグラフェンのカイラル凝縮状態

グラフェンにおいて残された理論的な大きな課題は電子間相互作用の問題であるが、これに関して、前述のカイラル対称性の観点から理論的枠組みを構築し、ランダウ準位間の組み替えが十分小さいとの仮定の下では最近接の電子間相互作用により電子正孔対称な系は、カイラル凝縮相とよばれる 2 重縮退した基底状態となることを厳密に見だし、さらにこの系がホール絶縁体であることをチャーン数とよばれるトポロジカル不変量を計算することにより明らかとした。さらに一般のトポロジカル相において普遍的に成立する概念である「バルク・エッジ対応」の観点からカイラル凝縮相におけるエッジ状態を詳しく議論した。具体的には電子間相互作用のあるグラフェンのカイラル凝縮相を境界ならびに欠陥の近傍において詳細に検討し、平均場近似下におけるボンド秩序の観点から議論するとともに、通常の量子ホール相との比較をおこなった。(図 2, 3)

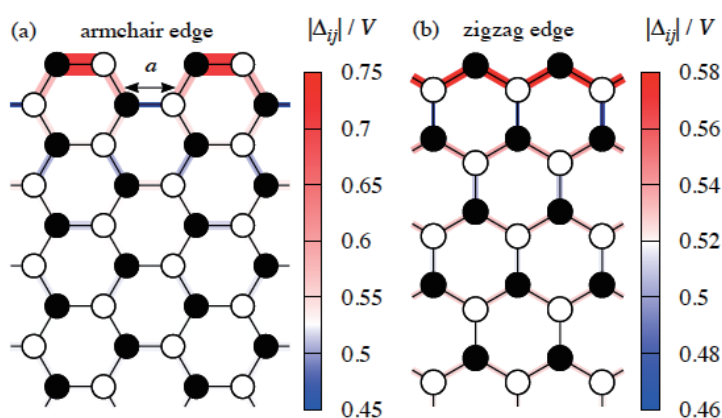


図 2: カイラル凝縮状態における境界近傍のボンド秩序変数

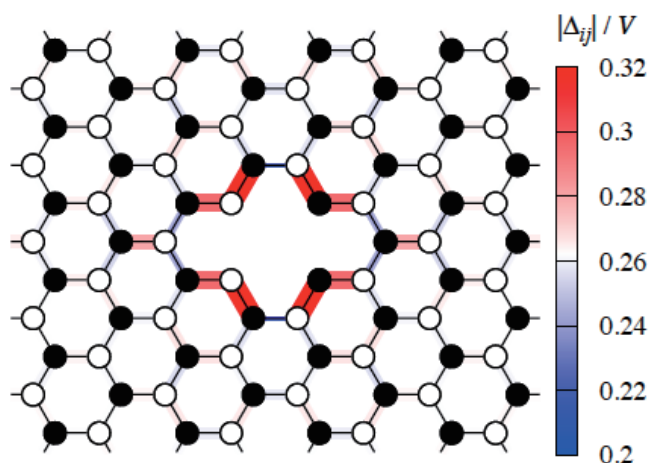


図 3: カイラル凝縮状態における単一欠陥近傍のボンド秩序変数

2 量子物質相におけるトポロジカルな相分類の研究

ランダウ以来、物質の相の分類において対称性とその破れは本質的な役割を果たしてきたが、特徴的な対称性の破れが存在しないことを以て量子液体相の定義とすれば、量子液体相においては対称性の破れは重要な意義をもたない。一方量子液体相においても多様な相が存在するとすれば、その相分類に用いる何らかの新しい「物理量」が必要である。我々はその「物理量」としてベリー接続をもちいたトポロジカルな「物理量」をもちいることを提案し[*]、(スピン)量子ホール系、グラフェン、Haldane 相等のダイマリゼーションを含む整数スピン鎖、2次元直交ダイマー系、half-filled のランダムフェルミオン系、カゴメ格子パイロクロア格子上のフラストレートした電子系等、種々の物理系での有効性を確認してきた。

ここで、ベリー接続とは量子系の波動関数の位相の不定性、より一般的には(擬似)多重項内のユニタリ変換の自由度をゲージ不定性とするゲージ構造を記述する一般化されたベクトルポテンシャルを意味し、基底状態もしくは、トポロジカル多重項などの多重項が他からエネルギー的に分離されているときにのみ定義可能であるが、これは一般の量子液体相において励起ギャップの存在を仮定することが自然であることを考えるとき示唆的である。

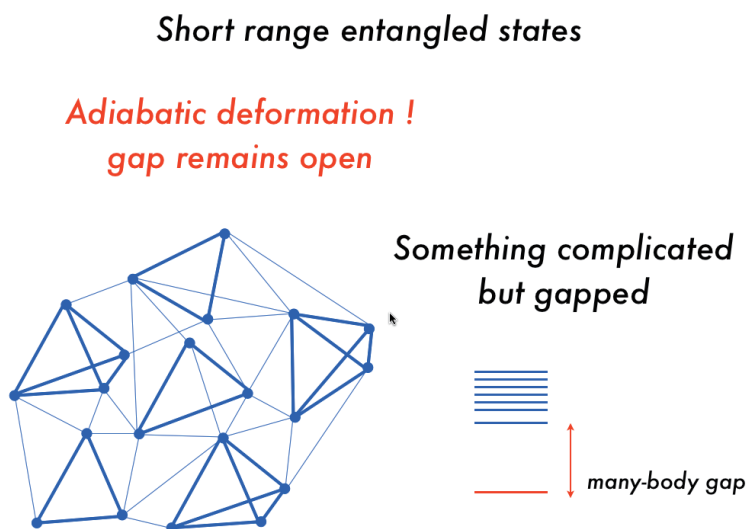


図 4: Short range entanglement をもつ系の概念図:バルクな量子状態を局所的な構造物の集合体に励起ギャップをあけたまま断熱変形できる。

ここで一般の Short-range entangled (SRE) 状態を「系のパラメタの連続変形により分離した局所的な量子的構造物の集合体まで断熱変形(すなわちギャップを開けたまま、量子相転移をおこさず変形)できる状態」と定義しよう(図4)。Haldane スピン系、直交ダイマー系、強結合のパイポーラロン相などがこの範疇に入り、局所的な量子的構造物の非直交性が局所的な量子もつれを意味する。この時 von Neumann-Wigner による準位交差の議論に従えば、一般の変形に対してギャップは閉じないので SRE 状態は単一相となり、系に時間反転等ある種の対称性があるときのみ多様な相の存在が許容される。われわれの対称性が保護するベリー位相の量子化の理論[*]ならびに近年の他の研究と整合的である。この観点に立つとき我々のギャップをもつ量子液体相の分類論は、Jain による複合フェルミオン描像を正当化した Wilczek による adiabatic heuristic argument の一つの具現化と考えられる。又、対称性の高い SRE 電子系における Z_Q ベリー位相の有効性を第一原理的電子論との関連も含めて議論した。

[*] Y. Hatsugai, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 311 (2004), **74**, 1374 (2005), **75**, 123601 (2006), New J. Phys. **12** 065004 (2010).

3 トポロジカル絶縁体におけるクラマース縮退とベリー接続の研究

四元数 (Quaternion) が時間反転対称性と密接に関係していることは, Dyson による一連の研究以来の既知の事実であるが, 時間反転対称な量子系に固有のクラマース縮退による多重項に対して定義される幾何学的位相と幾何学的位相の Z_2 -量子化に対する理論に関して研究を進めた。現在、時間反転対称な系におけるエッジ状態に関する研究が進行中である。

また、本年度は外国人客員教授の Y. Avishai 教授と時間反転対称な系における電荷 - 磁束双対性に関する研究を進め、現在論文を準備中である。

< 論文 >

1. Y. Hatsugai, I. Maruyama, " Z_Q Topological Invariants for Polyacetylene, Kagome and Pyrochlore lattices", Euro. Phys. Lett. 95, 20003 (2011)
2. Y. Hatsugai, "Topological aspect of graphene physics". Phys. Conf. Series 334, 012004 (13) (2011)
3. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto, H. Aoki, "Generalized chiral symmetry and stability of zero modes for tilted Dirac cones", Phys. Rev. B 83,153414 (2011)
4. M. Arikawa, Y. Hatsugai, T. Endoh, K. Shiraishi, "Wave packet dynamics in the spin torque transfer", J. Phys. Soc. Jpn. 81, 044706 (4) (2012)
5. 初貝安弘, 「グラフェンの特異な物性とカイラル対称性」素粒子論研究 118, 4 (2011)
6. M. Arai, Y. Hatsugai, "Numerical study of electronic structure under uniform magnetic field and quantized Hall conductance for multi-band tight-binding models", J. Phys. Conf. Series 334, 012042 (4) (2011)
7. M. Arikawa, H. Aoki, Y. Hatsugai, "Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder", J. Phys. Conf. Series 334, 012043 (4) (2011)
8. H. Watanabe, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Manipulation of the Dirac cones and the anomaly in the graphene related quantum Hall effect", J. Phys.: Conf. Ser. 334, 012044 (5) (2011)
9. Y. Takada, Y. T. Yoon, T. Shiokawa, S. Konabe, M. Arikawa, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, " Multi-Electron Wave Packets Dynamics in Applied Electric Field ", Jpn. J. Appl. Phys. 51, 02BJ01 (5) (2012)

< 講演:国際会議 >

1. Invited: Yasuhiro Hatsugai, "Symmetry, Dirac cones and Berry connections for frustrated fermions", "26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop " "Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011)", "Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, JAPAN". 2011.11.17
2. Invited: Yasuhiro Hatsugai, " Quantized Berry phases for characterization of short range entangled states in d-dimensions ", Kavli Institute for Theoretical Physics program : Topological Insulators and Superconductors ", Kavli Institute for Theoretical Physics, UCSB, Santa Barbara, California, U.S.A., 2011.11.3

3. Invited: Y. Hatsugai, " Use of Berry connections in condensed matter physics and the bulk-edge correspondence ", Workshop on Emergence in Field Theory ", Nanyang Executive center, Nanyang Technology University, Singapore, 2011. 8. 6.
4. Y.Hamamoto, Y. Hatsugai, and H. Aoki, " Chiral Symmetry and Electron-Electron Interaction in Many-Body Gap Formation in Graphene ", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) 16P-D046, "TheBeijing International Convention Center, China" 2011. 8. 11.
5. Y.Hamamoto, Y. Hatsugai, and H. Aoki, "Exact ground states of $\nu = 1/2$ states in grapheme ", The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19) ", Florida State University Conference Center, USA, 2011. 7.26
6. Y. Hatsugai, " Symmetry protected quantization of Berry phases and applications (Invited) ", Workshop and School on Topological Aspects of Condensed Matter Physics "International Center for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy", 2011.6.29
7. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto, H. Aoki, " Robustness of zero-modes and generalised chiral symmetry for tilted Dirac cones with disorder (Oral presentation) " Graphene Week 2011: Fundamental Science of Graphene and Applications of Graphene-Based Devices "Oberurgl, Austria", 2011. 4.25
8. Y. Hamamoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, " Electron correlation and chiral symmetry in half-filled graphene in magnetic fields ", Graphene Week 2011: Fundamental Science of Graphene and Applications of Graphene-Based Devices ", Oberurgl, Austria, 2011.4.29
9. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto, H. Aoki, " Robustness of zero-modes and generalised chiral symmetry for tilted Dirac cones with disorder(Oral) ", Graphene Week 2011: Fundamental Science of Graphene and Applications of Graphene-Based Devices, Oberurgl, Austria, 2011. 4. 25

< 講演:国内会議 >

1. (招待講演) 初貝安弘, 「グラフェンの特異な物性とカイラル対称性」京都大学基礎物理学研究所 研究会「熱場の量子論とその応用」 京都大学 基礎物理学研究所 湯川記念館 Panasonic 国際交流ホール, 2011 年 8 月 22 日
2. (招待講演) 初貝安弘「時間反転対称性とトポロジカル絶縁体のエッジ状態:バルクエッジ対応の物理」平成 23 年度 第 10 回 飯綱・サイエンスサマー道場, 長野県飯綱高原「ホテルアルカディア」2011 年 8 月 17 日
3. (招待講演) 初貝安弘「グラフェンにおけるカイラル対称性と電子相関」理論核領域, 素粒子領域合同シンポジウム 強相関物理の新展開 18pSJ-6 日本物理学会 2011 年秋季大会(素粒子原子核) 弘前大学, 青森、2011 年 9 月 18 日
4. 棚谷翔, 丸山勲, 初貝安弘「2次元パイロクロア格子におけるクロスダイマー相と量子化ベリー位相」日本物理学会 2012 年年会, 関西学院大学, 神戸 2012 年 3 月 26 日
5. 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫「電場中の 2 層グラフェンにおけるゼロエネルギーランダウ準位のトポロジカルな安定性」日本物理学会 2012 年年会, 関西学院大学, 神戸, 2012 年 3 月 25 日

6. 本田貴大, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透「フェルミオン・ダブリングを伴わないディラック電子のランダウ準位に対するランダムネスの効果」日本物理学会 2012 年年会, 関西学院大学, 神戸, 2012 年 3 月 27 日
7. 高田幸宏, 塩川太郎, 尹永扱, 岩田潤一, 小鍋哲, 有川晃弘, 村口正和, 遠藤哲郎, 初貝安弘, 白石賢二「2次元半導体ナノ構造における多電子波束ダイナミクスの検討」日本物理学会 2012 年年会, 関西学院大学, 神戸, 2012 年 3 月 26 日
8. 塩川太郎, 高田幸宏, 尹永扱, 岩田潤一, 小鍋哲, 有川晃弘, 村口正和, 遠藤哲郎, 初貝安弘, 白石賢二, 「半導体ナノ構造における多電子波束ダイナミクスの印加電圧依存性」日本物理学会 2012 年年会, 関西学院大学, 神戸 2012 年 3 月 27 日
9. 初貝安弘, 丸山勲「フラストレーションの量子もつれによる解消と量子化ベリー位相」特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」最終成果報告会大阪大学吹田キャンパス銀杏会館, 2012 年 1 月 8 日
10. 棚谷翔, 丸山勲, 初貝安弘「チェッカーボード格子上の $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型における量子化ベリー位相」特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」最終成果報告会, 大阪大学吹田キャンパス銀杏会館, 2012 年 1 月 7 日
11. 丸山勲, 初貝安弘「フラストレートした格子とベリー位相の ZQ 量子化条件」特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」最終成果報告会, 大阪大学吹田キャンパス銀杏会館 2012 年 1 月 7 日
12. 初貝安弘, 丸山勲「対称性が保護するベリー位相の量子化とその電子系での応用」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 22pGT-5 富山大学, 富山 2011 年 9 月 22 日
13. 河原林透, 初貝安弘, 森本高裕, 青木秀夫「傾いたディラックコーンにおけるゼロモードのトポロジカルな安定性 — カイラル対称性の非エルミートな一般化 —」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 21pTR-10 富山大学, 富山 2011 年 9 月 21 日
14. 濱本雄治, 初貝安弘, 青木秀夫「磁場中グラフェンのカイラル対称性と多体状態の数値的研究」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 22aTL-12 富山大学, 富山 2011 年 9 月 22 日
15. 高田幸宏, 尹永扱, 塩川太郎, 岩田潤一, 小鍋哲, 有川晃弘, 村口正和, 遠藤哲郎, 初貝安弘, 白石賢二「半導体中での波束ダイナミクスの印加電圧依存性」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 22aTM-3 富山大学, 富山 2011 年 9 月 22 日
16. 高田幸宏, 尹永扱, 塩川太郎, 岩田潤一, 小鍋哲, 有川晃弘, 村口正和, 遠藤哲郎, 初貝安弘, 白石賢二「ハートリーフォック近似によるナノ構造中の電子波束ダイナミクス」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 21aTM-2 富山大学, 富山, 2011 年 9 月 21 日
17. 尹永扱, 塩川太郎, 高田幸宏, 岩田潤一, 小鍋哲, 有川晃弘, 村口正和, 遠藤哲郎, 初貝安弘, 白石賢二「Suzuki-Trotter 法による電子波束ダイナミクスの多体効果」日本物理学会 2011 年秋季大会(物性) 21aTM-1 富山大学, 富山 2011 年 9 月 21 日
18. 棚谷翔, 丸山勲, 有川晃弘, 初貝安弘「二次元パイロクロア格子上の $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型の基底状態と Z2 ベリー位相を用いた相分類」ポリスケール大学間連携研究会, 東京理科大学長万部キャンパス 〒049-3514 北海道山越郡長万部 2011 年 9 月 4 日

< 社会還元等 >

1. 初貝安弘, 理論物理学刊行会, ”Progress of Theoretical Physics” 編集委員
2. 初貝安弘, 東北大学学際科学国際高等研究センター 客員教授 2010 年 4 月 ~ 2012 年 3 月
3. 初貝安弘, 東京大学物性研究所共同利用施設専門委員会委員
4. 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

< 卒業論文 >

1. 鷲見理沙: グラフェンのホール伝導度とそのトポロジカルな意義 (数理物質科学研究科、卒業論文、2012.3)
2. 我妻友明: グラフェンのクライントンネリング (数理物質科学研究科、卒業論文、2012.3)

< 修士論文 >

1. 藤縄直也: 超伝導体における反転対称性の研究 (数理物質科学研究科、修士論文、2011.7)

< 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, 2011 年度: 7800 千円 (直接経費: 6000 千円, 間接経費: 1800 千円) (研究代表者: 初貝安弘)
2. 科学研究費 特定領域研究 (A) 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相とその展開」研究課題番号: 22014002, 2011 年度: 700 千円 (直接経費: 700 千円) (公募研究代表者: 初貝安弘)
3. 科学研究費 挑戦的萌芽研究 「クラマース多重項による四元数的ベリー接続の理論と物理的応用への挑戦」研究課題番号: 23654128, 2011 年度: 1950 千円 (直接経費: 1500 千円, 間接経費: 450 千円) (研究代表者: 初貝安弘)
4. 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, 2011 年度: 2600 千円 (直接経費: 700 千円, 間接経費: 210 千円) (研究代表者: 新井正男) (研究分担者: 初貝安弘)

< 外国人招聘 >

1. Yshai Avishai 教授 (Ben-Gurion University, Israel), 2012 年 2 月 12 日—2012 年 3 月 31 日 (筑波大学国際連携プロジェクト招へい及び革新的な教育プロジェクト支援経費)

VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 (2名)

半導体ナノ構造系はスピン・電荷自由度を単電子レベルでコントロール可能な電荷・スピン制御素子として有望視されている。ナノ系は、電子間相互作用と量子干渉効果が輸送現象に本質的な影響を及ぼす系であると同時に、有限の電圧により電流/スピン流が駆動される非平衡系である。そのためこのような「電子相関非平衡現象」を解明するためには、微視的理論に立脚したアプローチが必要となる。当研究室では、「非平衡系の場の量子論」の観点より、ナノ構造系の量子物性の理論的研究を進めている。本年度の成果は以下のとおりである。

【1】スピン軌道相互作用量子ドット干渉計による非平衡スピン輸送

単一準位量子ドット系であっても、磁場や強磁性リードを導入すること無く電場のみで、スピン流を生成可能であることが明らかになってきた。これが、電場によるラシュバ型スピン軌道相互作用を利用した干渉計 (=SO 干渉計) である。本年度は継続して SO 干渉計におけるスピン分極・スピン輸送の生成機構を「非平衡近藤効果」の側面から詳細に調べた。特に、多体効果である近藤効果が非平衡系において果たす役割を明らかにした。

(1) スピン軌道相互作用による誘起スピン分極 (論文 [2])

リング形状にすることで、スピン軌道相互作用によりドットにはスピン分極が誘起される。Keldysh 非平衡理論を使い、導線の自由度を消去して有効的に「開いた量子ドット」を求めることで、生成されるスピン分極がどのように各種のパラメータ依存するかを陽に示すことが明らかになった。リング形状を特徴付ける背景透過率を $4\xi/(1+\xi)^2$, リングを貫く AB 位相を ϕ_{AB} , SO 位相を ϕ_{so} とすると、スピン分極の分布関数 $m(\varepsilon)$ は

$$m(\varepsilon) = \frac{2\sqrt{\xi}}{1+\xi} (f_R - f_L) \cos \phi_{AB} \cos \phi_{so} \quad (1)$$

となることが分かった ($f_{L,R}$ は左右のリードの Fermi 分布)。この表式は相互作用の無い場合だけではなく、相互作用ドットについても準粒子描像が正しい低温で成立する。(1) は、リング形状の場合 ($\xi \neq 0$) のみ、相互作用の有無に関わらず有限バイアスにより、ドットにスピン分極が誘起されることを示す。

(2) スピン依存輸送と非平衡近藤効果 (論文 [1,2]、講演 [1])

ドットに誘起されるスピン分極が、必ずしもスピン依存輸送をもたらすわけではない。このことは、実際に相互作用の無い SO 干渉計 ($\phi_{AB} = 0, \phi_{so} \neq 0$) ではスピン分極は現れるが、電流・コンダクタンスにスピン依存性は現れないことから明らかである。相互作用のある量子ドット系の非線形応答領域に限り、スピン依存輸送を示すことが昨年度の計算により示されていたが、その詳細な機構は不明であった。そこで、特にスピン分極とおよびスピン輸送現象を詳細に比較を行うことでその機構を調べた。その結果、単一準位量子ドット系については、(1) 干渉計のスピン依存輸送は非線形応答領域を含め、厳密にドットの遅延グリーン関数 G^R のみで決まること、(2) 従ってスピン依存輸送を示すには、スピン分極が G^R に反映される付加的機構が必要なこと、(3) いわゆる近藤効果の自己エネルギーは、分布関数のスピン依存性を G^R に反映させるための具体的な機構として理解することができる、ということがわかった。

【2】スピン回転不変スレーブボゾン平均場 (学位論文 [1])

電子相関と非平衡定常状態を扱える数少ない近似手法として、これまで Kotliar-Ruckenstein によるスレーブボゾン平均場近似を用いてきた。KR スレーブボゾン近似は、平衡近藤領域において数値繰り込み群の結果をよく再現することから十分信頼性の高い非摂動的な近似法と考えられているが、その近似の過程でスピン軸を z 軸 (半導体界面垂直) 方向に選択的に固定するため、スピン空間のスピン回転不変性を満たしていない。このため、KR スレーブボゾン法をスピン空間に関するデリケートな状況 — 例えばスピン軌道相互作用と横磁場が共存するような場合 — へと適用することはこれまでできなかった。一方、近年、半導体ドット面内方向の横磁場を導入する量子輸送実験が開始されており、このような状況に多くの注目が集まっている。

本年度は、平衡系で Li-Wölfle が KR スレーブボゾン法に行った拡張を参考にして、非平衡系にも使えスピン回転不変性を満たすスレーブボゾン近似法を確立するため、拡張を行った。これがスピン回転不変 (SRI) スレーブボゾン法であり、非平衡系への適用は、本研究が初めての例である。

この新しい近似法を用い、スピン軌道相互作用と横磁場によるスピン分極誘起、平衡系におけるスピンコンダクタンス、非平衡系におけるスピンコンダクタンスの計算を行った。横磁場によって、スピン軌道相互作用によって誘起したスピン分極を実質的に回転させることができる。パラメータの選び方によっては、ごく僅かの磁場により大きな変化が

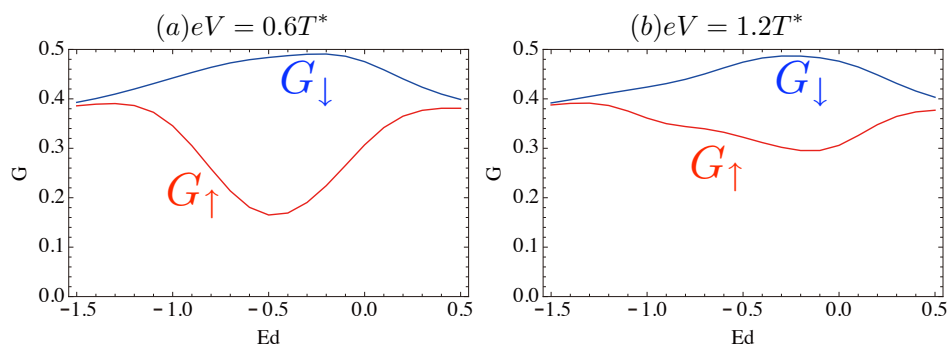


図1 SO 干渉計 $\phi_{\text{so}} = \pi/2$ と横磁場 $B_x = 0.1$ が共存するときのスピコンダクタンスの計算例。 $U = 1.0$, $\xi = 0.3$, $\Gamma = 0.5$ 。

得られるため、有効な制御パラメータとなり得ることがわかる。

【3】量子ドット系の非平衡揺らぎと相互作用

量子ドット系の非平衡状態を記述する現象として非線形コンダクタンスとともに良く用いられているものが、電流の非平衡揺らぎ（ショットノイズ）測定である。近藤効果が顕在化する極低温領域では、電子相関が電荷・電流揺らぎに大きな影響を及ぼすといわれており、理論/実験の両面から最近活発に研究が進められている。

本研究室では、これまで非平衡揺らぎに着目し電子相関効果や量子干渉効果の影響を調べてきた。前年度にはスレーブボゾン近似法により、カーボンナノチューブドットの非平衡揺らぎ（ショットノイズ）の解析を行っていたが、スレーブボゾン法による電流揺らぎの計算は、特にドットの電子数 $N_d \approx 2$ 相当のゲート電圧では近似精度が悪くなるという問題点があった。これは、スレーブボゾン平均場理論が非平衡グリーン関数の自己エネルギー部分（=2点バーテックス）に対する近似であり、相互作用バーテックス（=4点バーテックス）の寄与を考慮する必要があるためである。本年度は、この問題を解決すべく完全計数統計の考え方を取り入れた新しい近似法を考案した。現在、この手法をいろいろな系に使い、その有用性の確認を進めている。

（1）計数場依存自己エネルギーと相互作用バーテックス（講演 [1]）

相互作用バーテックスはその定義がダイアグラム解析に基づいている。そのため、同様な効果のスレーブボゾン平均場理論のような自己無撞着近似に系統的に取り込む手段は必ずしも自明ではない。付加的に相互作用バーテックスにあたるダイアグラムをの寄与を考慮することは可能であるが、一般にこのような ad-hoc な取り扱いはワード恒等式と呼ば

れる理論的整合性を脅かす。

スレーブボゾン法の枠組みで相互作用バーテックスの寄与を考慮する方法を様々な角度から検討した結果、完全計数統計解析の議論で使われている計数場 λ を導入し、この計数場 λ に依存した一体のグリーン関数を自己無撞着に求めることが、系統的な近似法として優れていることが分かった。つまり、自己エネルギーの λ 依存性を考慮することは、準粒子間の $n > 2$ 点バーテックスを考慮することと厳密に等価であることを示した。一体のグリーン関数を近似的に求めることは、相互作用バーテックスを求めるよりも通常はるかに簡単である。この結果は、(自己無撞着平均場理論を含む) 変分的手法が、計数場依存性を考慮することでこれまで以上に広く適用可能であることを示すもので重要である。

(2) 計数場依存スレーブボゾン平均場 (学位論文 [1], 講演 [3])

上述の計数場 λ 依存する平均場の考えを有限相互作用スレーブボゾン法に適用した。本年度、単一準位量子ドット系について、この新しい近似法に従い非平衡揺らぎの解析を行なった。計数場に依存するスレーブボゾン平均場を用いると、平均電流、およびショットノイズは次のように書ける。

$$\langle I \rangle = \langle I \rangle_{nv}, \quad (2)$$

$$\langle S \rangle = \langle S \rangle_{nv} + \frac{4e^2}{\hbar} \int \frac{d\omega}{2\pi} (f_L + f_R - 2f_L f_R) \left. \frac{\partial T_\lambda(\omega)}{\partial i\lambda} \right|_{\lambda=0}. \quad (3)$$

ここで $T_\lambda(\omega)$ は計数場依存透過率であり、 $\langle \dots \rangle_{nv}$ は相互作用バーテックスを無視したときの結果である。相互作用結節部の寄与は、絶対零度でのファノ因子 $F \equiv \frac{1}{2e} \delta S / \delta I$ (δS , δI は線形項からのずれ) により特徴づけられ、相互作用の無いときには $F = 1$ となる。最近行われた実験では 1.8 ± 0.2 以上の値が観測されている。従来のスレーブボゾン平均場近似ではファノ因子 F の値は相互作用のないドットと同じ $F = 1$ であった。計数場依存スレーブボゾン平均場に依れば $F > 1$ (単一準位量子ドット) となり、ダイアグラム解析で「相互作用結節補正」と呼ばれる寄与を説明可能であることが分かった。

研究業績

< 論文 >

1. N. Taniguchi, "Spin current manipulation through a Rashba dot by tunable nonequilibrium Fano-Kondo effect" (to be published in J. of Physics, 2012).
2. N. Taniguchi and K. Isozaki, "Spin current generation as a nonequilibrium

Kondo effect in a spin-orbit mesoscopic interferometer” (投稿済, 2012 年).

< 学位論文 >

1. 修士論文：根元太郎「非平衡近藤領域における量子ドット系のスピン制御と電荷揺らぎ」(筑波大学大学院数理物質研究科 2012 年 2 月).

< 講演 >

1. N. Taniguchi, “Spin current manipulation through a Rashba dot by tunable nonequilibrium Fano-Kondo effect” (26th International Conference on Low Temperature Physics, August, 2011, Beijing).
2. 谷口伸彦「非平衡量子ドット系の計数場依存性：汎関数繰り込み群による考察」日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 26 日、関西学院大学).
3. 根元太郎、谷口伸彦「量子ドット系における計数統計と slave-boson 法の拡張」日本物理学会 第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 26 日、関西学院大学).

< 外部資金 >

1. 科研費 基盤研究 (C)「スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子の有効理論の研究」(研究代表：谷口伸彦 2010 年度～2012 年度).

VII-4. ソフトマター理論

准教授：宮崎州正

大学院生：3名

委託院生：1名

卒研究生：2名

【1】ガラス転移とジャミング転移

(1) ジャミング転移とガラス転移の統一的描像 (尾澤, 黒岩, 池田, 宮崎) 講演 [1-5, 9, 13, 16, 20, 21]

ガラス転移の平均場描像の予想を剛体球系に適用すると、ジャミング転移とガラス転移の関係が自然に理解できる。まず、剛体球液体では、温度 T とそれに共役なポテンシャルエネルギーの代わりに、圧力 p と体積 (またはその逆数である密度 ϕ) をパラメータに選ぶのが自然である。するといわゆるエネルギーランドスケープは、 $1/\phi$ を自由エネルギーを見立てた多谷構造を持つと考えることができる。この図の多谷構造の谷底の値 (inherent structures, IS) は、剛体球液体の各瞬間の配置から得られる最大密度 (の逆数) の値となる。この値を数値実験で得るためには、ある密度 ϕ における剛体球液体に、急激に圧力をかけて圧縮すればよい。この手続きは、系をジャミング転移させることに他ならない。谷底の値に対応する密度 (の平均値) がジャミング転移点 ϕ_J である。つまり、ジャミング転移はガラス転移理論の枠組みの中に埋め込まれているのである。さて、この描像から予想されることは、圧縮する前の液体の密度 ϕ が動的転移点 ϕ_{mct} を超えると、 ϕ_J の値が上昇することである。 $\phi_{ini} < \phi_{mct}$

であれば、系は全ての谷底の上にあるため、圧縮後は谷底のあらゆる値の平均値が得られる。これが、ジャミング転移点が初期状態によらず一定値 $\phi_J \approx 0.645$ になると信じられてきた理由である。しかし、 ϕ_{ini} が ϕ_{mct} を超えると、取り得る谷底の値は平均して小さくなる。つまり ϕ_J は上昇する。我々は、3次元剛体球液体の IS を、さまざまな ϕ_{ini} において熱平衡化させた系に対して求めることにより、この平均場描像の予想を数値実験により初めて検証した (図 1)。この図から明らかなように、 ϕ_J は $\phi_{ini} \approx 0.51$ を境に上昇している。この 0.51 という値は、驚くべきことに、独立に MCT を用いて理論的に計算した ϕ_{mct} と一致している。さらに、これら異なる ϕ_J に対して、粒子配置、すなわち微視的構造を詳細に調べて定性的な変化や結晶秩序の痕跡があるかを調べた。その結果、ジャミング転移に特有の臨界特性がすべての ϕ_J に対して存在すること、結晶秩序が部分的にも全く見られないことを確認した。

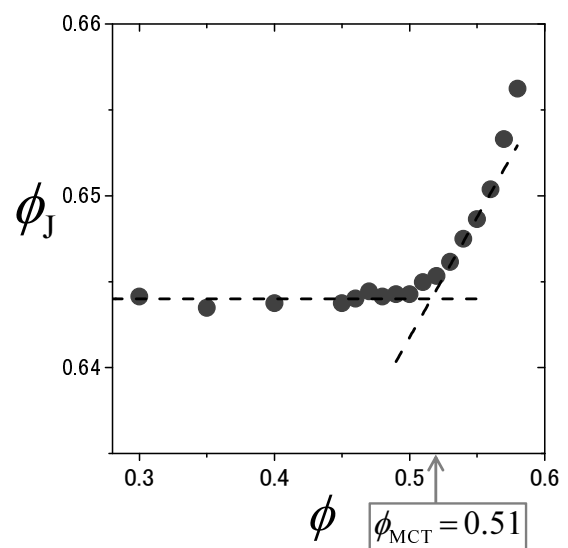


図 1: 3次元剛体球型をさまざまな初期密度 ϕ_{ini} で用意して、それを圧縮して作ったジャミング状態のジャミング密度 ϕ_J 。 ϕ_J が $\phi_{ini} = \phi_{mct}$ を境にして大きく変化し始めることがわかる。

(2) 拘束系の確率過程とスピングラス転移 (黒岩, 宮崎) 講演 [15, 22]

スピングラスは、液体ガラスのモデル系としてしばしば議論される。現在のガラス転移の平均場描像も、 p -スピン球型模型と呼ばれる特殊な平均場模型の厳密解を参考にして提案されたものである。この p -スピン球型模型においては、熱力学転移も転移点付近におけるダイナミクスも詳しく調べられていて、美しい

理論体系としてほぼ完成しているが、ひとつだけ非自明な問題が残っている。球型模型のダイナミクスは注意を要する。この模型の確率過程を時間の関数として扱いたいのだが、 N 次元球の面上に拘束されているという条件を常に満たさなくてはならない。今までの定式化においては、この拘束はラグランジュの未定定数を用いて、確率過程における平均値が拘束条件を満たすように扱われてきた。しかし、厳密には拘束条件は任意の時間に確率変数自身が満たすべきものである。平衡統計力学においては、熱力学極限でかつ常磁性相でありさえすれば、この厳密な拘束条件と平均としての拘束条件は等価であることが知られており、問題とはならない。しかし、ダイナミクスにおいてこの等価性は証明されていない。そこで我々は、一般のホロノミック拘束条件における確率過程の定式化を新たに行い、厳密に拘束条件を満たすランジュバン方程式を導出した。さらにこれを具体的に p -スピン球型模型に応用し、場の理論による定式化を行うことを試みた。ダイナミクスにおいては拘束条件の取り扱いによっては、エージングや低温相で異なる結果を導く恐れがあるため、我々の定式化が必要不可欠となる。

(3) ランダム系のガラス転移 (宮崎) 論文 [4]

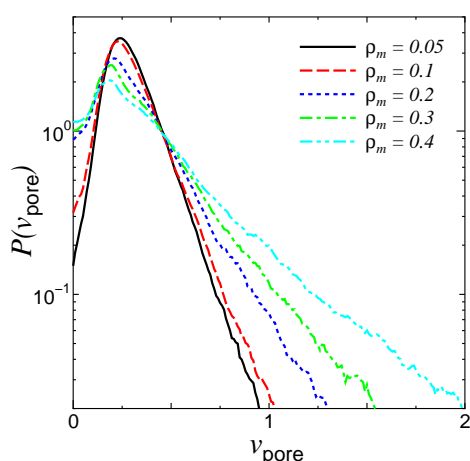


図 2: 動けない粒子の密度 ρ_i を固定したまま、動ける粒子の密度 ρ_m を変化させたときの、粒子の自由体積 v_{pore} の分布関数 $P(v_{pore})$ の変化。

液体粒子は動きやすくなる。一般に粒子の分布は、単純なポワソン分布より、熱平衡化させたほうが粒子の動きやすい分布になるはずであるから、この結果は自然である。しかし、その理由は未解明であった。そこで、我々は不純物の密度を固定したまま、動ける粒子の密度を変化させて、その際に動ける粒子にとっての自由体積がどのように変化するかを調べた。もし、不純物を動く粒子を用意する前に作っておいた場合、動ける粒子にとっての自由体積は、動く粒子の密度が大きくなれば小さくなる。これは当然である。しかし、不純物と動く粒子を同時にシミュレーションボックスに入れて、十分に平衡化が進んだ後で、不純物を固定して動けないようにすると、図のように動ける粒子の自由体積は大きく変化する。密度が大きくなるほど分布が長いテイルを持ち、動ける粒子の経路が広がるのである。この結果は我々の予想を裏付ける強力な証拠である。

昨年引き続き、ランダム系のガラス転移研究を行った。これは、球状粒子から成る液体中に、粒子と同じ大きさであるが動くことができない不純物を加えた時の、液体のガラス転移の振舞いを研究するものである。不純物密度が小さければ、摂動的な効果しかないだろう。逆に密度が大きい極限では、不純物中拡散の局在転移問題、即ちローレンツ気体問題となる。ガラス転移は動的な転移、局在転移は静的な転移であるから、この問題を理解することは、ガラス転移の理解にクロスオーバーから切り込める可能性があるのである。さらに、不純物間の平均距離は、そのまま動的転移の協同揺らぎ(もし存在すれば、であるが)の格好のプロープと成り得る。

我々はこの系についてより系統的な数値的な研究を行っているが、今年度は特に、ダイナミクスが不純物の作成プロトコルに敏感であることについて研究をおこなった。不純物を作る自由体積の分布は、不純物だけを平衡化させた場合と、液体粒子と共に平衡化させた場合とでは、後者の方が

【2】超ソフトなコロイド分散系の特異なダイナミクス

最近、粒子どうしが重なるほど弱い斥力を持つ系、いわゆる柔らかい相互作用系が関心を集めている。その熱力学的・動的振舞いは、通常の強い短距離斥力を持つ系に比べて、多彩で豊かな振舞いを示す。それだけではない。相互作用が柔らかく、かつ密度が高い系は、多くの粒子が重なり合うことができる、即ち

長距離相互作用としての性質を示す筈である。言い換えれば、柔らかい高密度液体は、平均場的な系でもある。

(1) ガウスコア液体の核生成とガラス転移 (池田, 宮崎) 論文 [2, 3]、講演 [6]

我々は昨年度に引き続き、柔らかい系の中で最も単純なモデルである、ガウスコア相互作用系のガラス転移をシミュレーションにより調べた。特にガラス転移点近傍におけるダイナミクスを詳細に調べ、その結果とモード結合理論と呼ばれるガラス転移における一種の平均場理論との比較を行った。その結果、モード結合理論との結果が非常に良いことだけでなく、モード結合理論の限界とよばれている物理量の異常な振る舞いすらも再現する結果を得た。平均場理論と一致するだけでなく、平均場理論の限界までも示す結果を得たことは、ガラス転移の平均場描像が正しいことを示唆する重要な結果である。

また、この系は単成分であるにもかかわらず、ガラス転移を引き起こす異常な系でもある。本来であれば、単成分系は結晶化しやすくガラス化しないはずだからである。その原因を理解するために、我々はさまざまな密度に対して、結晶相と液体相の化学ポテンシャルを計算し、核生成速度の見積もりを行った。その結果、本来であれば密度が大きくなると、化学ポテンシャル差も大きくなり、核生成を始めやすくなるはずであるが、ガウスコア系では逆に、密度が大きくなると化学ポテンシャル差が小さくなることがわかった。これは定性的に我々の予想を裏付ける結果である。しかし、定量的には、いわゆる古典核生成理論と整合せず未解決である。

(2) 実空間 overlap 相互作用系のスローダイナミクスと秩序相 (岡崎, 池田, 宮崎) 講演 [8, 17, 25]

柔らかい相互作用系のもう一つの例として、実空間 overlap ポテンシャルという相互作用を持つ液体の熱力学とダイナミクスに関する研究を行った。実空間 overlap ポテンシャルとは、粒子間の斥力が、粒子が重なった面積（体積）に比例する相互作用である。この系は、高密度で長距離相互作用系となるだけでなく、すでにその基底状態 ($T = 0$ の状態) でいわゆる相対性が成立することが知られている。これは、あるポテンシャルを持つ液体が、そのポテンシャル関数をフーリエ変換した関数をポテンシャルとして持つ液体の基底状態と 1 対 1 の関係、いわゆる相対関係が成立するというものである。我々は、まずこの相対性が有限温度においても成立しているかを 2 次元系に対して調べた。その結果、相関も微視的な相関関数も、相対性が近似的によく成立していることを確かめた。また、その相関の結晶相を調べたところ、低密度で通常の三角格子となるが、高密度では、クラスター結晶と呼ばれる異常な結晶相がいくつも発見された。これは、ひとつの格子に複数の粒子が落ち込み、そのクラスターが三角格子などの秩序相を作るものである。興味深いことに、密度を増大させるとともに、クラスター中の粒子の個数が単調増加する。まず 2 個のクラスターであるダイマーから始まり、続いて 3 個、4 個と増えていく。このようなクラスター相は、相互作用の長距離のテールが特徴的な波長で変調されているような場合 (フリーテル振動のように)、あるいは台地状の形状をした相互作用系では、よく知られているが、我々の系のような単純でありふれた柔らかい相互作用系で調べられたのは初めてのことである。

<論文>

1. Thomas E. Markland, Joseph A. Morrone, Kunimasa Miyazaki, Bruce J. Berne, David R. Reichman, Eran Rabani "Theory and simulations of quantum glass forming liquids" J. Chem. Phys. **136**, 074511 (10pp) (2012).

2. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki “Slow Dynamics of the High Density Gaussian Core Model” J. Chem. Phys. **135**, 054901 (13pp) (2011).
3. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki “Thermodynamics and Structural Properties of the High Density Gaussian Core Model” J. Chem. Phys. **135**, 024901 (9pp) (2011).
4. K. Kim, K. Miyazaki, and S. Saito, “Slow dynamics, dynamic heterogeneities, and fragility of super-cooled liquids confined in random media” J. Phys.: Condens. Matter **23**, 234123 (9pp) (2011).

<日本語の解説>

1. 宮崎州正, “メイドインジャパン物理用語 物性編 「朝倉-大澤理論」 「パリティ」 **26**, 61 (2011年11月号).

<講演>

1. K. Miyazaki, ”The Glass Transitions from the Mean-Field Perspectives” (5th International Discussion Meeting on Glass Transition, 2012年2月27日-3月1日, 仙台, invited).
2. K. Miyazaki, ”Dynamical Transition, Inherent Structures, and Jamming Transition of Hard Spheres” (French-Japanese meeting on Jamming, Glasses and Phase transitions, 2011年12月7-10日, Paris).
3. 宮崎州正, 「ガラス転移とジャミング転移の統一的理解」(第34回 溶液化学シンポジウム プレシンポジウム, 2011年11月14日, 名古屋大学, 招待講演).
4. K. Miyazaki, ”The glass and jamming transition from the mean-field perspectives” (Konstanz 大学 Fuchs 研究室セミナー, 2011年9月29日, Konstanz, Germany).
5. K. Miyazaki, ”The glass/jamming transition from the mean-field perspectives” (Workshop on Sphere Packing and Amorphous Materials , 2011年7月25-29日, Trieste, Italy).
6. K. Miyazaki, ”Glass transition of exotic liquids” (The 5th International Mini-Symposium on Liquids, 2011年6月25-26日, 岡山大学, 招待講演).
7. 宮崎州正, ”モード結合理論はガラス転移の平均場理論か?” (日大塑性研究会, 2011年6月15日, 千葉, 招待講演).
8. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正, ”Ultrasoft ポテンシャル液体の熱力学と液体論” (日本物理学会 2012年春季年会, 25aAH-5, 2012年3月24日-3月27日, 兵庫).
9. 尾澤岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正, ”剛体球系における Inherent Structure の構造とダイナミクス” (日本物理学会 2012年春季年会, 24aBF-9, 2012年3月24日-3月27日, 兵庫).
10. 黒岩健, Thomas Voigtmann, 宮崎州正, ”2成分モード結合理論における実効的な時間スケールの分離の起源について” (日本物理学会 2012年春季年会, 24aBF-6, 2012年3月24日-3月27日, 兵庫).
11. 金鋼, 齊藤真司, 宮崎州正, Giulio Biroli, David R. Reichman, ”ガラス転移における多点相関関数と動的相関長: NEMD and IMCT? or NEMD vs IMCT?” (日本物理学会 2012年春季年会, 24aBF-4, 2012年3月24日-3月27日, 兵庫).

12. T. Kuroiwa, "Mode Coupling Theory and Time Scale Separation in Asakura-Oosawa Model Binary System" (5th International Discussion Meeting on Glass Transition, 2012年2月27日-3月1日, 仙台, poster).
13. M. Ozawa, "Structural Properties of the Inherent Structures of the Hard Spheres" (5th International Discussion Meeting on Glass Transition, 2012年2月27日-3月1日, 仙台, poster).
14. Kunimasa Miyazaki, "Mean-field description of the glass transition" (Phase Transition Dynamics in Soft Matter : Bridging Microscale and Mesoscale, 2012年2月19日-2月22日, 京都基研, poster).
15. Takeshi Kuroiwa and Kunimasa Miyazaki, "p-spin spherical model revisited", (Unified Concept in Glass Physics V, Henri Poincare Institute, Paris, 12.12-16.2011, poster).
16. 尾澤 岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正"ガラス転移平均場描像とジャミング転移" (第10回 関東ソフトマター研究会, 2011年11月12日, 東大生産研, ポスター).
17. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正"低密度 k-space overlap ポテンシャル液体のガラス転移" (日本物理学会 2011年秋季大会, 24aJF-9, 2011年9月21日-9月24日, 富山).
18. 黒岩健, 宮崎州正"サイズ比の大きな2成分系における時間スケールの分離-schematic model による解析-" (日本物理学会 2011年秋季大会, 24aJF-10, 2011年9月21日-9月24日, 富山).
19. 黒岩健, 宮崎州正"p-スピン球形模型のダイナミクスにおける拘束条件の厳密な取り扱いについて" (日本物理学会 2011年秋季大会, 24aJF-11, 2011年9月21日-9月24日, 富山).
20. 尾澤 岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正"剛体球系のジャミング転移と動的ガラス転移の関係" (日本物理学会 2011年秋季大会, 24pJF-8, 2011年9月21日-9月24日, 富山).
21. 尾澤 岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正"ガラス転移の平均場描像とジャミング転移との関係" (基研研究会 2011 非平衡系の物理 -マイクロとマクロの架け橋, 2011年8月18日-8月20日, 京都, ポスター).
22. 黒岩健, 宮崎州正"Dynamics of p-spin spherical model revisited" (基研研究会 2011 非平衡系の物理 -マイクロとマクロの架け橋, 2011年8月18日-8月20日, 京都, ポスター).
23. 宮崎州正"ガウス型ポテンシャル液体のガラス転移" (第一回ソフトマター研究会, 2011年8月3日-8月5日, 京都).
24. 黒岩健, 宮崎州正"サイズ比の大きな2成分系における時間スケールの分離" (第一回ソフトマター研究会, 2011年8月3日-8月5日, 京都, ポスター).
25. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正"柔らかい長距離相互作用系におけるガラス的振る舞い" (第一回ソフトマター研究会, 2011年8月3日-8月5日, 京都, ポスター).

<社会還元等>

1. 宮崎州正, 「ソフトマター研究会」運営委員

<学位論文 (修士) >

1. 尾澤岬, "A Unified Picture of Glass and Jamming Transitions"

<学位論文（学士）>

1. 池田晴國, “p-spin spherical model の平均場におけるガラス的振舞い”
2. 藤井秀樹, “Enskog 理論による輸送係数の計算”

<受賞など>

1. 尾澤 岬, 平成 23 年度 数理物質科学研究科 研究科長賞 (2012 年 3 月)

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 (C) (平成 21 年度～平成 23 年度、研究代表者: 宮崎州正) 課題番号: 21540416
「過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性」(研究代表者: 宮崎州正)

<集中講義>

1. 宮崎州正, 「数理解析学特別講義」北海道大学大学院数学科, 集中講義, 2011 年 7 月 11-15 日

<その他>

特になし

VII-5 半導体ナノ物性グループ

1. メンバー

教授	白石 賢二
助教	岩田 潤一
助教	神谷 克政
研究員	Cristoph M. Puetter
大学院生	博士前期課程 3名、 博士後期課程 4名

2. 概要

半導体ナノ物性グループは本年度は大きくわけて2つの大きなテーマを中心に研究を推進した。第1のテーマは新しい計算手法の開発、第2のテーマはナノ物質・ナノ材料の機能・物性解明、及び、新奇ナノ物質のデザインを目指したナノサイエンスの研究である。

3. 研究成果

【1】 次世代パワーデバイス材料 SiC の研究

SiC は次世代パワーデバイスとして期待されている。本研究では10年以上も謎として認識されていた SiC の MOSFET を Wet 酸化によって作製するときには生じる原因不明のしきい値シフトの物理的起源を明快に明らかにした。SiC を熱酸化する際には酸化過程でC原子が放出されると考えられる。こうして放出されたC原子はSiO₂中に取り込まれると、水素原子のアシストで炭酸イオンとして負に帯電することを明らかにした。水素原子はWet 酸化において不可避に混入するものであり、Wet 酸化によるしきい値シフトは不可避であることを示している。

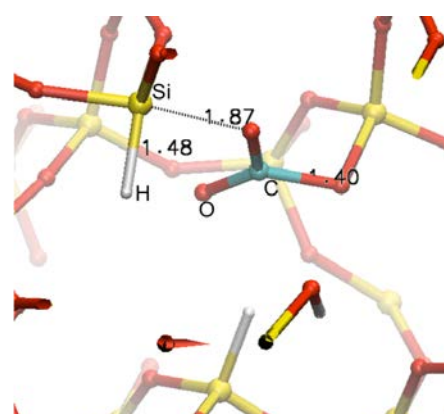


図1: SiO₂中に形成された炭酸イオン

【2】 次世代メモリ抵抗変化型メモリの機能発現機構の電子レベルでの解明

次世代メモリとして期待される抵抗変化型メモリは酸素空孔の凝集・離散による伝導フィラメントの形成と破壊が機能発現機構と考えられている。しかしその電子レベルの理解は全く未踏の状態であった。本研究では伝導フィラメントの形成・破壊はキャリア注入をきっかけとする構造相転移であることを明らかにし、世界に先駆けて抵抗変化型メモリの電子レベルでの発現機構の提案を行うことに成功した。

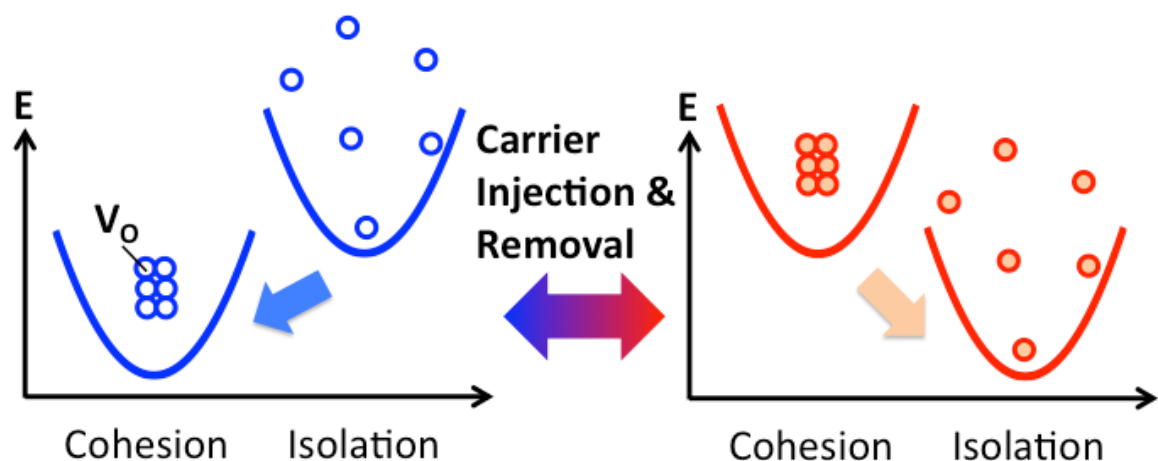


図2：抵抗変化型メモリにおけるフィラメントの形成崩壊機構の模式図

【3】 星間空間によるアミノ酸の形成・破壊過程の研究

星間空間におけるアミノ酸の形成・破壊は太陽系における生命誕生につながる非常に重要な物性である。本研究では当該センターの宇宙グループ・原子核グループ・生命グループと共同して初期太陽系におけるL型アミノ酸過剰発生の原因を第一原理量子論によって明らかにした。その結果、初期太陽系における真空紫外領域の円偏光照射がL型アミノ酸過剰を引き起こすという説を提案するに至った。

【4】 大規模第一原理計算によるシリコンナノワイヤの電子構造解析

長年計算機工学グループと開発してきたRSDFTを「京」コンピュータ用にチューニングして、次世代デバイスとして注目されているシリコンナノワイヤFETの電子状態解析を行なった。計算規模は数万原子となった。本研究は2011年のゴードンベル最高性能賞に輝いた。

【5】 多電子波束ダイナミクスの計算科学による検討

多電子波束ダイナミクスを時間依存ハートリーフォック近似を用いて考察し、多電子波束の特異な性質を明らかにした。

<発表論文>

1. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, "Geometries and electronic structures of diamond nanoparticles", Japanese Journal of Applied Physics 51 015001-1-015001-5 (2012). DOI:10.1143/JJAP.51.015001
2. Katsumasa Kamiya, Moon Young Yang, Seong-Geon Park, Blanka Magyari-Kope, Yoshio Nishi, Masaaki Niwa, and Kenji Shiraishi, "ON-OFF switching mechanism of resistive-random-access-memories based on the formation and disruption of oxygen

- vacancy conducting channels”, *Applied Physics Letters* 100 073502-1-073502-4 (2012). DOI:10.1063/1.3685222
3. Katsumasa Kamiya, Yasuhiro Ebihara, Makoto Kasu, and Kenji Shiraishi, “Efficient Structure for Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes with High Emission Efficiency: A First-Principles Study of AlN/GaN Superlattice”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 51 02BJ11-1-02BJ11-6 (2012). DOI:10.1143/JJAP.51.02BJ11
 4. Katsumasa Kamiya, Toru Matsui, Takashi Sugimura, and Yasuteru Shigeta, “Theoretical Insight into Stereoselective Reaction Mechanisms of 2,4-Pentenediol-Tethered Ketene-Olefin [2+2] Cycloaddition”, *The Journal of Physical Chemistry A* 116 1168-1175 (2012). DOI:10.1021/jp211542m
 5. Mitsuo Shoji, Kyohei Hanaoka, Akimasa Sato, Daiki Kondo, Moon Young Yang, Katsumasa Kamiya, and Kenji Shiraishi, “Calculation of the Electron Transfer Coupling Matrix Element in Diabatic Reactions”, *International Journal of Quantum Chemistry*(2012). DOI: 10.1002/qua.24074
 6. Toru Matsui, Takeshi Baba, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, “An accurate density functional theory based estimation of pKa values of polar residues combined with experimental data: from amino acids to minimal proteins”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 14, 4181-4187 (2012). doi: 10.1039/C2CP23069K
 7. Takashi Sugimura, Eigo Mitani, Takahiro Tei, Tadashi Okuyama, Katsumasa Kamiya, Toru Matsui, and Yasuteru Shigeta, “Temperature-Independent Stereoselectivity in Intramolecular Cycloaddition of Ketene Generated from Diazoester in Solution and in Vapor Phase: How Entropy Term Governs the Selectivity” *Bull. Chem. Soc. Jpn.* (2012). doi:10.1246/bcsj.20110337
 8. Katsumasa Kamiya, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, “Efficient Guiding Principle of Highly Scalable MONOS-Type Memories”, *ECS Transactions*, 41 (7) 71-79 (2011). doi:10.1149/1.3633286
 9. Katsumasa Kamiya, Yasuhiro Ebihara, Kenji Shiraishi, and Makoto Kasu, “Structural design of AlN/GaN superlattices for deep-ultraviolet light-emitting diodes with high emission efficiency”, *Applied Physics Letters*, 99, 151108-1-151108-3 (2011). DOI:10.1063/1.3651335
 10. Katsumasa Kamiya and Yasuteru Shigeta, “First-principles molecular dynamics study on the atomistic behavior of His503 in bovine cytochrome c oxidase”, *Biochimica et Biophysica Acta*, 1807, 1328-1335 (2011). doi:10.1016/j.bbabi.2011.03.015
 11. Katsumasa Kamiya, Naoto Umezawa, and Susumu Okada, “Energetics and electronic structure of graphene adsorbed on HfO₂(111): Density functional theory calculations”,

- Physical Review B 83, 153413-1-153413-4 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.153413
12. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, "Energetics and electronic structure of encapsulated single-stranded DNA in carbon nanotubes", Physical Review B 83, 155444-1-155444-6 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.153413
 13. Takeshi Baba, Katsumasa Kamiya, Toru Matsui, Naoki Shibata, Yoshiki Higuchi, Tatsuya Kobayashi, Seiji Negoro, and Yasuteru Shigeta, "Molecular dynamics studies on the mutational structures of a nylon-6 byproduct-degrading enzyme", Chemical Physics Letters 507, 157-161 (2011). DOI:10.1016/j.cplett.2011.03.046
 14. Yasuhiro Ebihara, Katsumasa Kamiya, Kenji Shiraishi and Atsushi A Yamaguchi, "Intrinsic Origin of the Breakdown of the Quasi-Cubic Approximation in Nitride Semiconductors", Physica Status Solidi (c) 8, 2279-2281 (2011). DOI 10.1002/pssc.201001085
 15. Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, "Atomistic Design of Guiding Principles for High Quality MONOS Memories -First Principles Study of H and O Incorporation Effects for N Vacancies in SiN Charge Trap Layers-", Japanese Journal of Applied Physics, 50, 04DD05-1-04DD05-5 (2011). DOI:10.1143/JJAP.50.04DD05
 16. Akira Otake, Keita Yamaguchi, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, "An atomistic study on hydrogenation effects toward quality improvement of program/erase cycle of MONOS-type memory", IEICE Transactions, E94-C, 693-698 (2011). DOI:10.1587/trainselse.E94.C
 17. K. Shiraishi, K. Yamaguchi, K. Kamiya, A. Otake, and Y. Shigeta, "Guiding Principle of Highly Scalable MONOS-Type Memory", ESC Transaction, 41-7, p71-p.78 (2011)
 18. W. Feng, R. Hettiarachchi, Y. Lee, S. Sato, K. Kakushima, M. Sato, K. Fukuda, M. Niwa, K. Yamabe, K. Shiraishi, H. Iwai, and K. Ohmori, "Fundamental origin of excellent low-noise property in 3D Si-MOSFETs -Impact of charge-centroid in the channel due to quantum effect on 1/f noise-", 2011 Technical Digest of 2011 International Electron Devices Meetings, 27.7-1-4, (2011)
 19. K. Yamguchi, A. Otake, K. Kamiya, Y. Shigeta, and K. Shiraishi, "Atomistic Design of Guiding Principles for High Quality Metal-Oxide-Nitride-Oxide-Semiconductor Memories: First Principles Study of H and O Incorporation Effects for N Vacancies in SiN Charge Trap Layers", Jpn. J. Appl. Phys. 50, Art. No. 04DD05 (2011)
 20. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, and T. Endoh, "Collective Tunneling Model in Charge-Trap-Type Nonvolatile Memory Cell", Jpn. J. Appl. Phys. 50 Art. No. 04DD04 (2011).

21. Y. Takada, Y. T. Yoon, T. Shiokawa, S. Konabe, M. Arikawa, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Hatsugai, and K. Shiraishi, "Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Applied Electric Field", Jpn. J. Appl. Phys. 51, Art. No. 02BJ01 (2012)
22. M. Arikawa, M. Muraguchi, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and T. Endoh, "Role of Synthetic Ferrimagnets in Magnetic Tunnel Junctions from Wave Packet Dynamics", Jpn. J. Appl. Phys. 51, Art. No. 02BM03 (2012).
23. N. Umezawa and K. Shiraishi, "Theoretical model for artificial structure modulation of HfO₂/SiO_x/Si interface by deposition of a dopant material", Appl. Phys. Lett. 100, Art. No. 092904 (2012)

<学術講演>

1. 長川健太, 加藤重徳, 海老原康裕, 神谷克政, 白石賢二, 「4H-SiC 表面の初期酸化過程の第一原理計算による検討」、2011 年秋季 第 72 回応用物理学学会学術講演会 2011 年 8 月 29~9 月 2 日 @山形大学
2. 海老原康裕、長川健太、加藤茂徳、吉崎智浩、神谷克政、白石賢二、「酸化時に形成される負の固定電荷に関する理論的検討 -Intrinsic Origin of Negative Fixed Charge in Wet Oxidation for Silicon Carbide-」SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会 2011 年 12 月 8~9 日 愛知県産業労働センター(ウイंकあいち)
3. 長川健太、加藤重徳、海老原康裕、吉崎智浩、神谷克政、白石賢二、「4H-SiC 表面の初期酸化過程の第一原理計算による考察 -First Principles Analysis of Initial Oxidation Process of 4H-SiC Surfaces-」SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会 2011 年 12 月 8~9 日 愛知県産業労働センター(ウイंकあいち)
4. 加藤重徳、海老原康裕、吉崎智浩、長川健太、神谷克政、白石賢二、「4H-SiC 表面の NO 初期酸化過程の第一原理計算による検討 -First-Principles Analysis of NO Initial Oxidation Process of 4H-SiC Surfaces-」SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会 2011 年 12 月 8~9 日 愛知県産業労働センター(ウイंकあいち)
5. Moon Young Yang, 神谷克政, Seong-Geon Park, Blanka Magyari-Kope, 西 義雄, 丹羽 正昭, 白石 賢二, "TiO₂ ベース抵抗変化型メモリの ON-OFF 切り替え機構の提案 (Proposal of ON-OFF switching mechanism of TiO₂-based ReRAM)", 第 17 回ゲートスタック研究会 -材料・プロセス・評価の物理-, 2012 年 1 月 20 日, 口頭発表 東レ総合研修センター, 静岡県.
6. Y. Ebihara, K. Chokawa, S. Kato, K. Kamiya, and K. Shiraishi, "Theoretical Approach of Effects of Wet Oxidation to SiC Materials", International Symposium on Surface Science -Towards Nano-, Bio-, and Green Innovation - (ISSS-6) 2011 年 12 月 11~15 日 Tokyo, Japan
7. K. Chokawa, S. Kato, Y. Ebihara, T. Yoshizaki, K. Kamiya, and K. Shiraishi, "First Principle Analysis of the Initial Oxidation Process of 4H-SiC Surface", International Symposium on

Surface Science -Towards Nano-, Bio-, and Green Innovation - (ISSS-6) 2012年12月11~15日 Tokyo, Japan

8. 海老原 康裕, 長川 健太, 加藤 重徳, 吉崎 智浩, 神谷 克政, 白石 賢二、「Intrinsic Origin of Negative Fixed Charge in Wet Oxidation for Silicon Carbide」、ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理— (第17回研究会)、2012年1月20~21日 静岡県三島市、東レ総合研修センター
9. 長川 健太, 加藤 重徳, 海老原康裕, 吉崎 智浩, 神谷 克政, 白石 賢二、「First Principle Analysis of the Initial Oxidation Process of 4H-SiC Surfaces」、ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理— (第17回研究会)、2012年1月20~21日 静岡県三島市、東レ総合研修センター
10. 加藤 重徳, 海老原 康裕, 吉崎 智浩, 長川 健太, 神谷 克政, 白石 賢二、「第一原理計算による4H-SiC表面の初期酸化過程の考察」、ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理— (第17回研究会)、2012年1月20~21日 静岡県東レ総合研修センター
11. 吉崎 智浩, 海老原 康裕, 長川 健太, 加藤 重徳, 神谷 克政, 白石 賢二、「熱酸化における4H-SiCの欠陥の理論的検討」、ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理— (第17回研究会)、2012年1月20~21日 静岡県東レ総合研修センター
12. 加藤重徳, 長川健太, 海老原康裕, 吉崎智浩, 白石賢二, 神谷克政、「4H-SiC表面のNO初期酸化過程の第一原理計算による検討」、2012年春期 第59回 応用物理学関係連合後援会 2012年3月15~18日、早稲田大学 早稲田キャンパス 早稲田中・高等学校興風館
13. 長川健太, 加藤重徳, 海老原康裕, 吉崎智浩, 白石賢二, 神谷克政、「4H-SiC初期酸化におけるDry酸化とWet酸化の相違の理論的考察」、2012年春期 第59回 応用物理学関係連合後援会 2012年3月15~18日、早稲田大学 早稲田キャンパス 早稲田中・高等学校興風館
14. 佐藤皓允, 庄司 光男, 神谷 克政, 梅村 雅之, 矢花 一浩, 白石 賢二: “星間空間におけるアミノ酸キラリティ生成機構の理論的研究”, ALMA WorkShop 「宇宙と生命」, 国立天文台 三鷹キャンパス, 2012年1月21日
15. 佐藤皓允, 庄司 光男, 神谷 克政, 梅村 雅之, 矢花 一浩, 白石 賢二: “星間空間における光誘起L型アミノ酸過剰の理論的研究”, 日本天文学会 2012年春季年会, P224a, 龍谷大学 深草キャンパス, 2012年3月19日~22日
16. <招待講演> Yasuteru Shigeta, Katsumasa Kamiya, “First-principles analysis on proton transport pathways of cytochrome c oxidase”, Asian International Symposium -Theoretical Chemistry, Chemoinformatics, Computational Chemistry-, 日本化学会第92春季年会, 2012年3月26日-27日(3月26日に口頭発表), 慶応義塾大学..
17. <招待講演> K. Kamiya, M. Y. Yang, S.-G. Park, B. Magyari-Köpe, Y. Nishi, M. Niwa, and K. Shiraishi, “Universal Theory of ON-OFF Switching Mechanism of RRAM via VO Based Conducting Channels -Guiding Principle for Oxide Based High Quality RRAM- “, 1st International Workshop

- on RRAM, Leuven, Belgium, Oct. 20-21, (2011).
18. Y. Ebihara, K. Chokawa, K. Kato, K. Kamiya, and K. Shiraishi, "Theoretical Approach of Effects of Wet Oxidation to Carbon Vacancy for 4H-SiC", 42nd IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference, Arlington, VA, USA, Dec. 1-3, (2011).
 19. Y. Takada, Y. T. Yoon, T. Shiokawa, S. Konabe, M. Arikawa, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Hatsugai and K. Shiraishi, "Electron Dynamics in the Nano scale Transistor", 2011 Asia_Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of advanced semiconductor devices, Daejeon, Korea, June 29- July 1, (2011).
 20. M. Arikawa, Y. Hatsugai, K. Shiraishi and T. Endoh, "Electron dynamics in the ferromagnetic tunnel junction", 2011 Asia_Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of advanced semiconductor devices, Daejeon, Korea, June 29- July 1, (2011).
 21. <招待講演> K. Shiraishi, K. Yamaguchi, K. Kamiya, A. Otake, and Y. Shigeta, "Guiding Principle of Highly Scalable MONOS-Type Memory", 220th Electrochemical Society Meeting, Boston, MA, USA, Oct. 9-14 (2011)
 22. W. Feng, R. Hettiarachchi, Y. Lee, S. Sato, K. Kakushima, M. Sato, K. Fukuda, M. Niwa, K. Yamabe, K. Shiraishi, H. Iwai, and K. Ohmori, "Fundamental origin of excellent low-noise property in 3D Si-MOSFETs -Impact of charge-centroid in the channel due to quantum effect on 1/f noise-", International Electron Devices Meetings, Dec.5-7, Washington D.C. USA, (2011)
 23. Katsumasa Kamiya, Susumu Okada, and Kenji Shiraishi, "First-Principles Computational Studies of Nano-Bio Materials", 2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium, 2011年12月15日-17日 (12月16日にポスター発表), University of Tsukuba, Japan.
 24. <招待講演> Kenji Shiraishi, "Computational Sciences toward Developing Semiconductor Industry", 第21回日本MRS学術シンポジウム、(2011年12月19日~21日、横浜)
 25. K. Yamaguchi, A. Otake, K. Kamiya, Y. Shigeta, and K. Shiraishi, "First Principle Study of the Stability of H Atoms in SiN Layers on MONOS-Type Memories During Program/Erase Operations", 2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, Sept. 8-10, Osaka, Japan (2011).
 26. M. Arikawa, M. Muraguchi, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and T. Endoh, "Role of Synthetic Ferrimagnets in MTJs from Wave Packet Dynamics", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011) September 28-30, Aichi, Japan, 2011
 27. K. Kamiya, M. Kasu, and K. Shiraishi, "First-Principles Study of Electronic Structures of AlN/GaN Superlattices," , 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011) September 28-30, Aichi, Japan, 2011
 28. Y. Takada, Y. T. Yoon, T. Shiokawa, S. Konabe, M. Arikawa, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Hatsugai,

and K. Shiraishi, "Multi Electron Wave Packet Dynamics in Applied Electric Fields", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011) September 28-30, 2011

29. <招待講演>白石賢二、「次世代 LSI 開発における計算科学の位置づけと利用方法」、日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム「ナノスケール量子輸送の計算科学的研究の現状・展望と次世代スパコンへの期待」、(2011 年 9 月 21 日-24 日、富山大学)
30. <IEEE Distinguished Lecture> K. Shiraishi, "Computational Science Studies toward Future Nano-Devices", WIMNACT Workshop and IEEE EDS Mini-colloquium on Nanometer CMOS Technology 31, Jan. 30th, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan, (2012)
31. <IEEE Distinguished Lecture> K. Shiraishi, "Interface Physics and Its Approach to Modern Devices -A Computational Physics Approach-", Nov. 27, Tohoku University, Sendai, Japan (2011)

4. 受賞

1. Moon Young Yang : 若手奨励賞 (服部賞)、第 17 回ゲートスタック研究会 ー材料・プロセス・評価の物理ー、2012 年 1 月 20 日、口頭発表 東レ総合研修センター、静岡県.

5. 学位論文

博士論文

1. 高田幸宏 : Theoretical Study of Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Nano-Structures (ナノ構造体中における多電子波束ダイナミクスの理論的研究)

修士論文

1. 海老原康裕 : 熱酸化で形成された SiC/SiO₂ 界面の負の固定電荷に関する理論的検討
2. 佐藤皓允 : 星間空間における光誘起 L 型アミノ酸過剰の理論的研究

VII-6 ナノ構造物性グループ

メンバー：岡田 晋（准教授）

高木祥光（研究員）

小鍋 哲（研究員）

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。

研究成果

[1] C₅₉N フラーレンを内包した CNT の電子物性の解明

CNT の内側空隙に C₅₉N フラーレンが内包されたピーポッドにおいては、その伝導特性が CNT 単体、C₆₀ を内包した CNT のそれと異なり、n 型の伝導特性を示すことが実験的に示されている。我々は、密度汎関数理論に基づく第一原理計算を当該系に対して実行し、電場下における C₅₉N 内包 CNT の電子状態を詳細に調べた。その結果、ゼロ電界下では、CNT のバンドギャップ中に位置する C₅₉N 分子の部分占有された最高占有状態が、電界印加による電子注入により速やかに高エネルギー側にシフトし、CNT の伝導バンド下端と交差することが明らかになった。すなわち、C₅₉N の最高占有状態は電子ドーピングにより、CNT の伝導帯にたいしてドナー状態となることを示唆しており、実験的に報告されている C₅₉N 内包 CNT の n 型伝導の起源を明らかにした。また、この状態の高エネルギーシフトの起源は、C₅₉N の最高占有状態中の電子間のクーロン相互作用によるものであることが明らかになった。

[2]酸化ハフニウム上に吸着されたグラフェンの基礎物性

密度汎関数理論に基づき、high-k 物質の一つである酸化ハフニウムとグラフェンとの相互作用を明らかにした。本研究では、立方晶を有する酸化ハフニウムの(111)面を用い、その上におけるグラフェンの基礎物性の説明を行った。計算の結果、グラフェンと酸化ハフニウムとの相互作用は、グラフェン-グラフェン、グラフェン-酸化シリコンのそれと比較して一桁大きく、他方、通常の共有結合系の相互作用に比べては1桁小さい事が明らかになった。すなわち、両者の間の相互作用は弱い相互作用と共有結合的相

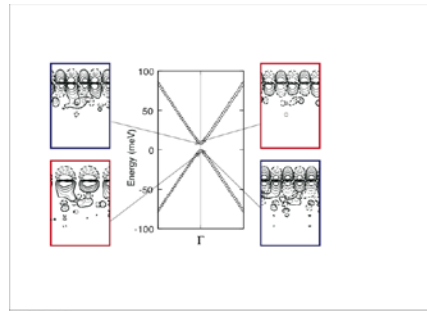


図 1:酸化ハフニア上に吸着されたグラフェンのフェルミレベル近傍のバンド構造と波動関数

互作用の中間的なものである事が明らかになった。また、波動関数の解析から、この中間的な相互作用の起源は、グラフェンの π 状態とハフニウムのd軌道のキャラクターを有する表面酸素原子のp軌道との間の強い軌道混成によるものであることが明らかになった(図1)。他方、この有意な基板との相互作用にも関わらず、グラフェンのバンド構造はそれほど大きく変調は受けず、酸化シリコン上のグラフェンと同程度のバンド構造の変調、すなわち、10meV程度の半導体化にとどまる事が明らかになった。しかし、有意な基板との軌道混成が存在する事から、グラフェン上の伝導電子は基板により大きく散乱を受け、当該基板上においては高い移動度を示さない事を予言した。

[3]絶縁体基板表面へのグラフェンの吸着機構を理論的に説明

酸化シリコン基板の表面として、特定の電子構造を持った表面を用いると、グラフェンと酸化シリコン表面の間の相互作用が、グラフェン-グラフェン層間相互作用よりも強くなることを理論的に発見した。これにより、これまで未解明であった、剥離法による酸化シリコン表面上でのグラフェン生成機構が明らかになった。このことは、絶縁体基板の表面構造を制御して電子状態を変えることにより、グラフェンを基板上の任意の位置、サイズで生成することが可能であることを示している。また同時に、さまざまな吸着構造のグラフェンを作成できると考えられ、今後のグラフェンデバイス実現、設計において重要な知見となり得るものと期待される。

[4]CNT 励起子を用いたナノ磁性状態の測定

ナノスケールを有する物質は、バルク状態とは異なる物性を示す事が知られている。とりわけ、磁性、超伝導等のある種の秩序状態は、ナノ構造に起因する揺らぎの影響を大きく受ける事が容易に想像される。ここでは、磁性原子ナノワイヤの磁性状態の測定方法を、間接的に、すなわちその磁性状態を非破壊的に測定する方法を理論的に提案した。通常、ナノチューブ、ナノグラフェンリボン等の1次元ナノ炭素物質では、その低次元性故に、内部において形成された荷電粒子

(電子、正孔)は非常に強いクーロン相互作用を及ぼし合う。そのため、電子、正孔は対となり準粒子、励起子として振る舞う。本論文では、電子・正孔のスピンの交換相互作用をペーテ・サルピータ方程式に加えて解くことにより、内包磁性物質の状態を反映した光学スペクトルを求めた(図4)。その結果、この電子正孔対の光学吸収が、磁性ナノワイヤの局在スピンとの相互作用により、本来グラフェン起因のバンド構造故に、光学的に禁制である三重項励起子吸収が発現し、その吸収スペクトルから近接する磁性ナノ物質の磁性状態の測定が可能である事を示したものである。

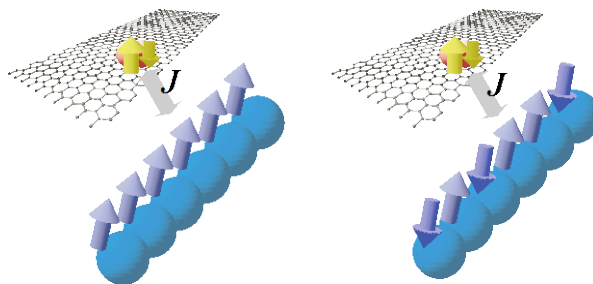


図4:ナノ磁性体と励起子との相互作用

<論文>

1. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, Yoko Iizumi, Toshiya Okazaki, Georgios Rotas, Nikos Tagmatarchis, Yongfeng Li, Toshiro Kaneko, Rikizo Hatakeyama, and Susumu Okada, "Origin of the n-type Transport Behavior of Azafullerene Encapsulated Single-walled Carbon Nanotubes ", Applied Physical Letters, vol. 99, No. 5, art. no. 053105, 2011 (DOI:10.1063/1.3619828)
2. Satoru Konabe and Susumu Okada, "Method for probing the magnetic state of nanomaterials encapsulated in carbon nanotubes", Applied Physics Letters, Vol. 98, art. no. 073109 (2011). [DOI:10.1063/1.3556274]
3. Katsumasa Kamiya, Naoto Umezawa, and Susumu Okada, "Energetics and electronic structure of graphene adsorbed on HfO₂(111): Density functional theory calculations", Physical Review B Vol. 83, art. no. 153413 (2011). [DOI: 10.1103/PhysRevB.83.153413]
4. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, "Energetics and electronic structure of encapsulated single-stranded DNA in carbon nanotubes" Physical Review B Vol. 83, art. no. 155444 (2011). [DOI: 10.1103/PhysRevB.83.155444]

5. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Energetics and electronic structure of semiconducting single-walled carbon nanotube adsorbed on metal surfaces", *Physical Review B*, Vol. 84, art. no. 035406 (2011). [DOI: 10.1103/PhysRevB.84.035406]
6. Satoru Konabe and Susumu Okada, "Effects of Localized Spins on Excitons in Single-Walled Carbon Nanotubes with Imperfections", *New Journal of Physics*. Vol. 13, art. no. 083028 (2011). [DOI:10.1088/1367-2630/13/8/083028]
7. Susumu Okada, "Two-dimensionally polymerized coronene: A metallic sheet of sp² C atoms", *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 80, art. no. 123704 (2011). [DOI: 10.1143/JPSJ.80.123704]
8. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, " Energetics and Electronic Structure of Diamond Nanoparticles", *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. 51, art. no. 015001 (2012). [DOI: 10.1143/JJAP.51.015001]
9. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, " Magnetic-state tuning of the rhombohedral graphite film by interlayer spacing and thickness" , *Surface Science*, Vol. 606, pp. 253-257 (2012) [DOI:10.1016/j.susc.2011.10.001]
10. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Geometries and Electronic Structures of Graphene Adsorbed on SiO₂ (0001) Surfaces: The Possibility of the Electronic Structure Tuning by the Insulating Substrate" , *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*. pp.11.6.1-11.6.4, 5-7 Dec. 2011 [doi: 10.1109/IEDM.2011.6131535]
11. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Tunable Magnetic Properties of Rhombohedral Graphite Thin Films" , *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. 51, 02BN04 (2012) [DOI: 10.1143/JJAP.51.02BN04]
12. Susumu Okada and Takazumi Kawai, "Electronic structure of corrugated graphene sheet" *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, 02BN05 (2012) [DOI: 10.1143/JJAP.51.02BN05].
13. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Design of π -network of graphene by atomic Pt adsorbates" *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 73, Pages 777 - 780 (2012). [DOI: 10.1016/j.jpcs.2012.01.023]

<発表>

1. Susumu Okada, "Electronic structure modulation of graphene by substrates"
Japan-India Joint Workshop on Graphene Sciences, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2012年3月2日(招待講演)

2. Susumu Okada, "Electronic Structure of Graphene Hybrid Materials", Recent Progress in Graphene Research, Suwon, Korea. 2011年10月5日, (招待講演)
3. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, Susumu Okada, "Electronic structure of graphene adsorbed on (0001) surfaces of SiO₂ substrate", NT11 International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Cambridge, UK, 2011年7月10日
4. Satoru Konabe, Susumu Okada, "Spin-Related Novel Optical Phenomena in Single-Walled Carbon Nanotubes", 11th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT11), Cambridge, UK, 2011年7月12日.
5. Katsumasa Kamiya, Naoto Umezawa, Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of Graphene Adsorbed on HfO₂ Surfaces", 11th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT11), Cambridge, U.K. 2011年7月12日.
6. Katsumasa Kamiya, Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structure of Encapsulated Single-Stranded DNA in Carbon Nanotubes", 12th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT11), Cambridge, UK, 2011年7月12日.
7. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Tunable Magnetic Properties of Rhombohedral Graphite Thin Films", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, 2011年9月28日
8. Susumu Okada and Takazumi Kawai, "Electronic Structure and Energetics of Corrugated Graphene Sheet" 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, 2011年9月28日
9. Katsumasa Kamiya, Naoto Umezawa, and Susumu Okada, "Electronic structure of graphene adsorbed on HfO₂ surfaces", 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, ANA hotel, Kyoto, 2011年10月25日.
10. Y. Takagi and S. Okada, "Band-Gap Engineering of Hydrogen-Potassium Ternary Graphite Intercalation Compound Thin Films", 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, ANA hotel, Kyoto, 2011年10月26日.
11. Y. Takagi and S. Okada, "Band-Gap Engineering of Hydrogen-Potassium Graphite Ternary Intercalation Compound Thin films" The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Tokyo, Japan, 2011年10月31日
12. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Origin of the n-type Transport Behavior of C₅₉N Encapsulated Semiconducting Single Wall Carbon Nanotube", The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Tokyo, Japan, 2011年10月31日

14. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of Inserted Single-Stranded DNA into Single-Walled Carbon Nanotubes", Workshop on Carbon Nanotube in Commemoration of The 20th Anniversary of its Discovery ("2011-CNT20"), The International House of Japan, Tokyo, 2011年12月12日~13日.
15. S. Konabe and S. Okada, "Multiple Exciton Generation by a Single Photon in Single-Walled Carbon Nanotubes" International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo, 2011年12月14日
16. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Geometries and Electronic Structures of Graphene Adsorbed on SiO₂ (0001) Surfaces: The Possibility of the Electronic Structure Tuning by the Insulating Substrate", IEEE International Electron Devices Meeting, Washington DC, USA, 2011年12月7日
17. Susumu Okada, "Electronic properties of carbon nanotube hybrid structures", Workshop on Carbon Nanotube in Commemoration of the 20th Anniversary of its Discovery ("2011-CNT20"), The International House of Japan, Tokyo, 2011年12月13日
18. S. Konabe and S. Okada, "Spin-Related Novel Optical Phenomena in Single-Walled Carbon Nanotubes", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, 2011年9月28日
19. Y. Takagi and S. Okada "Electronic Structure Modulation of Graphene Adsorbed by Metal Pillars", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, Japan, 2011年9月28日.

<新聞発表>

1. 日刊工業新聞、“絶縁体基板にグラフェン吸着 産総研が機構解明 “、2011年12月7日
2. 化学工業日報、“酸化シリコン基板 グラフェン強く吸着”、2011年12月7日
3. 日経産業新聞、“グラフェン製膜条件 計算”、2011年12月7日

<外部資金>

JST-CREST「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」

VIII 生命物理グループ

教授 白石賢二

助教 庄司光男

大学院生 花岡恭平(D1), 佐藤皓允(M2), 近藤大生(M1)

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、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。今年度は、一酸化窒素還元酵素と DNA トポイソメラーゼに注目し、高精度計算手法(QM/MM)を用いてこれらの特異的かつ効率的な化学反応を初めて明らかにした。また、L型アミノ酸生成過剰や異常型プリオン蛋白質の立体構造予測研究においても幾つか重要な結果を得た。これらの理論解明には膨大な計算が必要であり、これまで用いていた並列性能の低い計算プログラムでは取り扱う事が困難であった。そこで、高並列環境に適した計算プログラムを整備し、スーパーコンピュータ(T2K-Tsukuba 等)を活用することで、理論的解明を行った。

【1】一酸化窒素還元酵素(NOR)の反応機構の理論的研究

一酸化窒素還元酵素(NOR)は一酸化窒素(NO)を亜酸化窒素(N₂O)に変換する反応($2\text{NO} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$)を触媒し、微生物の嫌気呼吸経路を担っている。生成物のN₂Oは大気中に拡散することで、強力な地球温暖化ガス(CO₂の300倍)として働くため、NORは多くの分野で注目されている。NORは膜蛋白質であり結晶化が困難で、立体構造が不明であった。2010年に初めてX線結晶構造解析が成功し、鉄2核(Fe_B, Fe_{b3})で構成される活性中心構造を持つことが判明した(Fig. 1)。しかしながら求められた構造は休止状態(酸化状態)にあり、活性中心には基質NOが入る空間は無く、反応機構は推定できなかった。そこで我々はX線構造を基にNORの反応機構についての理論的解明を行った。QM/MM法を適用し、反応中心は高精度第一原理計算法(Broken-symmetry DFT: QM)を、周りの蛋白質は分子動力学法(MM)で取り扱った。NOからN₂Oが生成するまでの各反応ステップについて順に中間状態と遷移状態探索を行った。

(1) 休止状態(NOが結合していない状態)

(2) 基質結合状態(NOが1分子結合した状態) Fe_B, Fe_{b3}の2つのサイトにNOはNとOそれぞれで配位が可能であるため、合計4状態を求めた。N配位のほうがO配位よりも安定であり、Fe_BよりもFe_{b3}に配位した方が安定であることが分かった。

(3) 基質結合状態 (NO が 2 分子結合した状態)

NO 2 分子が結合した状態は 3 つの結合様式が考えられるが、cis-Fe_{b3} 形式が最も安定であった。また、初めの NO が部分的に還元されていることで、2 つめの NO は低い反応障壁で N-N 結合形成が行えることが分かった。

(4) NO 結合乖離過程

最も高いエネルギー障壁を持つ段階である。鉄中心は Fe_B(IV)=O, Fe_{b3}(II) のフェリル中間体となり、Glu211 が Fe_B に二座配位することで hyponitrite 中間体の過剰な安定化を防いでいることが分かった。この Glu211 は保存アミノ酸であり、反応機構にとって極めて重要な役割を持っていることが分かった。

(5) N₂O 脱離過程

N₂O は脱離 Fe_{b3} のスピン状態が low-spin から high-spin 状態へ変化する過程で N₂O が乖離させている事が分かった。

これらの反応では電子状態が反応途中で変化しており、正確な電子状態を求めることが、正確な反応機構解明に必須である。また、各中間状態や遷移状態探索は多くの計算が必要となるため、T2K-Tsukuba や HECToR 等のスーパーコンピューター利用が欠かせなかった。NOR における N₂O 生成メカニズムの解明は(1)環境学的重要性、(2)生物学的重要性、(3)化学的重要性、(4)医療への応用 に対して極めて重要である。そのため、大きなインパクトと波及効果を与える事が期待できる。これらは現在論文投稿中である。

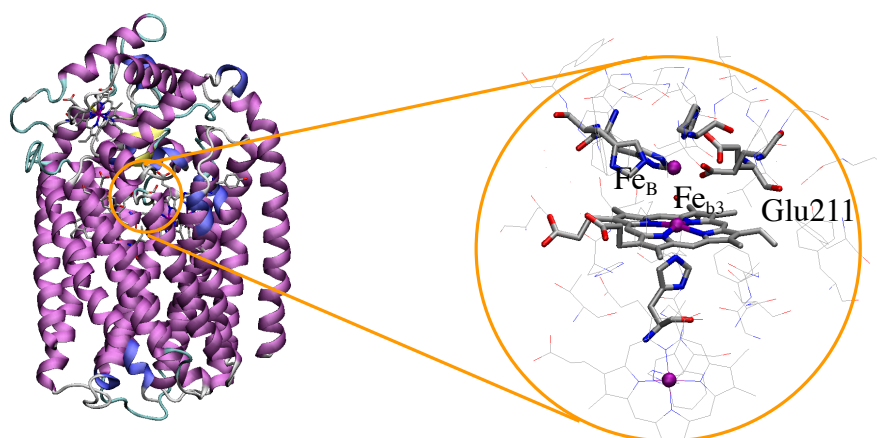


Fig. 1. NOR の全体構造と活性中心構造

【2】DNA トポイソメラーゼ II における DNA 再結合反応の理論的解明

DNA は細胞核内で高度に折りたたまれて収納されている。そのため、DNA の転写や複製

の際には、DNA 鎖のねじれ（トポロジ）が問題となるが、これは DNA トポイソメラーゼによって解消されている。DNA トポイソメラーゼは生命にとって不可欠な酵素であるだけでなく、抗生物質や抗がん剤に対する有力な標的であり、現在盛んに創薬研究がなされている。トポイソメラーゼの触媒サイクルは DNA の切断と再結合の二つがあるが、分子レベルでの触媒機構については未だ解明されていない。本研究では反応阻害に最も重要とされている再結合過程に注目し、DNA トポイソメラーゼ II (DNA-topo II) の DNA 再結合反応を QM/MM 法によって理論的に解明した (Fig. 2)。

我々は (1) プロトン移動経路と (2) 金属イオンの役割を明らかにした。これらは DNA-topo の触媒反応を説明できる初めての機構である。これらの結果は、今後新たな阻害剤を開発していくための、非常に有益な指針となりうる。本研究は花岡君が主に研究を進めた。現在論文にまとめ、投稿準備中である。

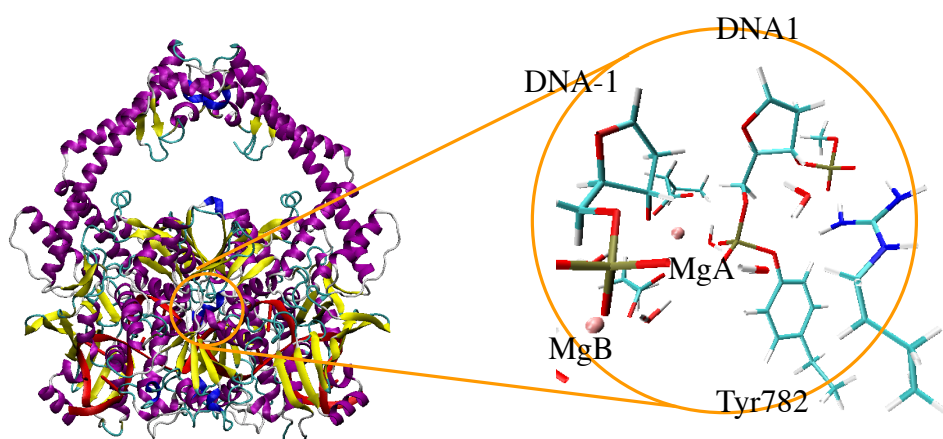


Fig. 2. DNA-topoII の全体構造と活性中心構造

【3】原始太陽系における L 型アミノ酸過剰についての理論的研究

地球上の生命を構成しているアミノ酸は、鏡像異性体であり、L 型と D 型という鏡合わせにした二つの立体構造を持つ。実験室中における化学合成では、L 型と D 型はそれぞれ等量生成されるにも拘らず、生命はほぼ 100%が L 型により形成されている。この矛盾を説明する仮説として、アミノ酸の起源が地球外から来たという説がある。このシナリオでは、宇宙空間中で円偏光が生成し、L 型と D 型のうち一方のアミノ酸：例えば D 型アミノ酸が選択的に破壊され、L 型アミノ酸の存在比が多くなり、現在の L 型アミノ酸世界が形成されたという説である (Fig. 3)。我々は、この説を理論的に検証するため、(1) どのような円偏光によってアミノ酸が崩壊するのか (2) どのような崩壊経路が存在するのか、について研究を行った。その結果、紫外領域において強い吸

収を持つこと、CA-CB 結合を切る経路が存在すること、隕石中に存在が確認されているアラニン、バリンに共通した性質であることが分かった。本研究は佐藤君が主に研究を進め、梅村、矢花、白石、神谷、庄司の協同研究体制でなされた。

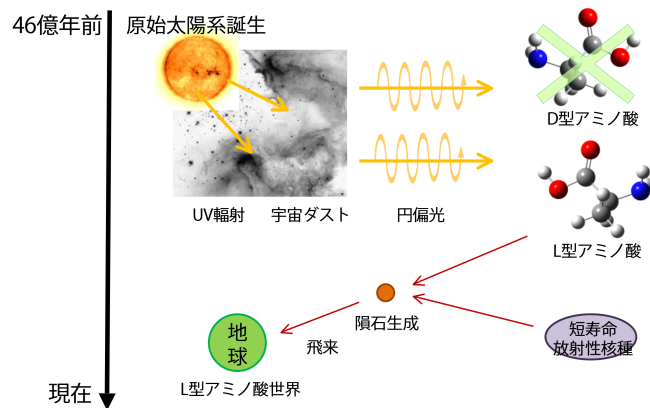


Fig. 3 L型アミノ酸生成シナリオ

【4】異常型プリオン蛋白質の立体構造予測

プリオンとは哺乳類で発見されたタンパク質性の感染因子のことである。正常な立体構造とは異なる立体構造のタンパク質(プリオン)が、正常型タンパク質を次々と異常型に転換、凝集していくことで、アミロイド線維と呼ばれる線維構造を形成する (Fig. 4)。この線維が生体内に蓄積すると細胞死を引き起こし、様々な神経性疾患の引き金となる。日本では 2001 年に牛での狂牛病感染が確認され、人にも伝染する可能性が指摘されたため、社会的にも大きな衝撃をもたらした。しかしながら、感染機構や異常型タンパク質の立体構造など、分子レベルでは明らかにできていないため、生物、化学、物理から医学にまたがる大きなフロンティア領域として科学的解明が期待されている。本研究では生物学的研究が最も進んでいる酵母プリオン Sup35 に注目し、この未知の立体構造を計算機シミュレーションによって再現することで、立体構造変化や感染機構を理論的に明らかにする事を試みた。その第一歩として、実験的に提唱されているモデルの1つである β ヘリックスモデルの熱力学的安定性の検討を行った。室温で $1\mu s$ の分子動力学シミュレーションを行った。特徴的な β シート構造が所々で壊れ、 β シートとループ構造の繰り返しパターンが現れた。この部位がヘリックス構造を安定に保つために必須であると考えられる。 β シートとループ構造の繰り返しパターンは、HET-s と呼ばれる他のプリオンでもみられている。HET-s でみられるモチーフと本研究で得られたパターンは非常に類似性が高いことが分かった。本研究は近藤君が主に研究を進め、田口英樹 (東工大)、野間繁子 (東工大)、白石、神谷、庄司の協

同研究体制でなされた。

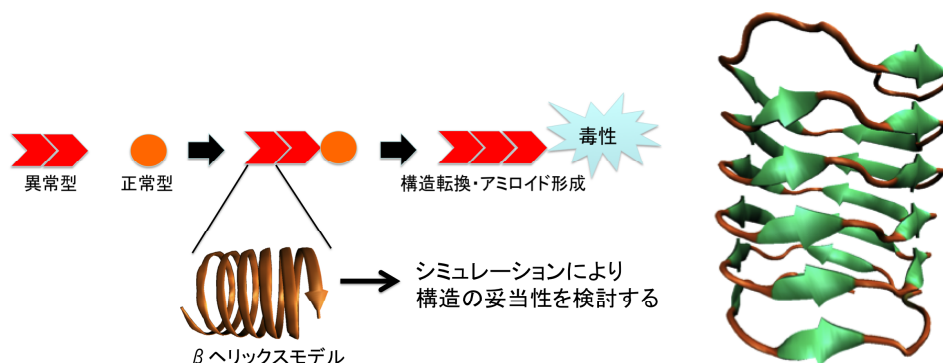
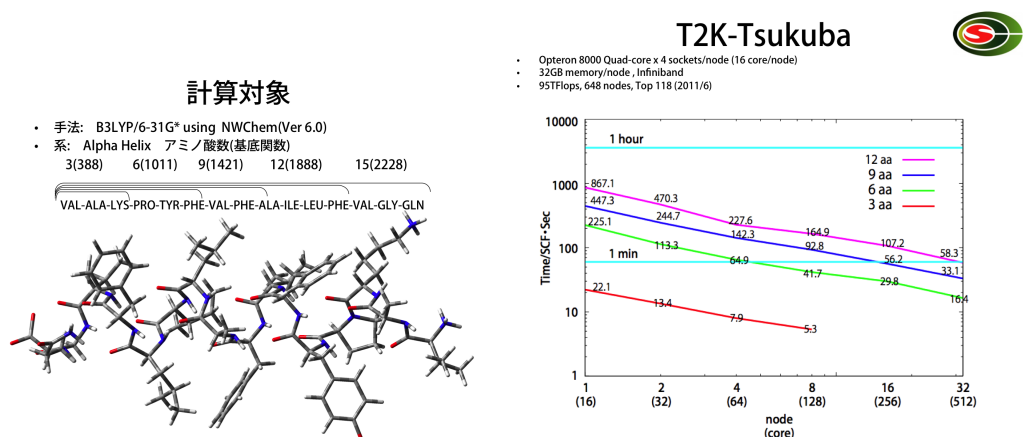


Fig. 4 プリオン蛋白質のアミロイド形成と $1 \mu s$ の MD シミュレーション結果

【5】スーパーコンピュータ利用

我々はこれまで QM/MM 計算に 2006 年版 GAMESS を基に開発したプログラムを用いていたが、(1) DFT 計算が遅い、(2) 対応する汎関数が限られる、(3) 並列化効率が悪い (<64 core) という問題があった。そこで、高並列化への大幅な改良を行うことを考えたが、調査の結果、NWChem プログラムパッケージを用いることで効率よく大規模並列環境(スーパーコンピュータ)に対応できる事が分かった。研究に必要なユーティリティプログラムを作成し、研究環境を整備した。T2K-Tsukuba において 512core でも効率よく動作する事を確認した (Fig. 5)。また、一万軌道の SCF 計算も行えるため、60 残基の蛋白質ならまるごと第一原理計算できる事がベンチマーク測定により判明した。また、昨年度末東日本大震災により T2K-Tsukuba が停止し、研究の中断をよぎなくされたが、エジンバラ大学 EPCC により、HECToR を利用させて頂いた。我々は NOR と DNA-TopoII の理論解析に大いに活用させて頂き、研究を行う事ができた。ここに心から感謝の意を表します。



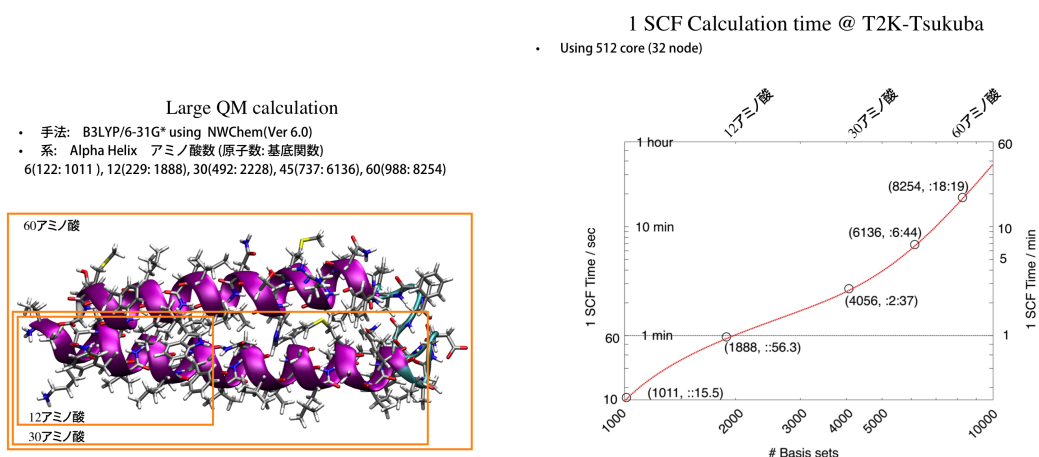


Fig5. T2K-Tsukuba における DFT ベンチマーク計算

【6】 GPGPU による計算加速

生命科学研究分野では、より短期間での問題解明やよりリアリステックなシミュレーションのために、計算のさらなる高速化と大規模化対応が欠かせない。一方、近年の計算機環境は目覚ましく発展している。CPU 単体の演算性能向上は見込めない段階に達し、現在は超並列やヘテロ並列計算によって計算の高速化を行う段階に入っている。中でも、GPU を用いるヘテロ計算機は消費電力や計算機コストの点でメリットが非常に大きい。そのため我々は QM/MM 計算を GPU 環境で行う事で、新たな生命科学研究領域を開拓することを試みている。

QM/MM 計算においてボトルネックはQM(量子力学) 計算である。QM 計算のプロファイルリングを詳細に行い、二電子積分ルーチンが最も重いことが分かった。しかしながらパッケージに組み込まれている CPU 二電子積分コードは非常に煩雑であり、GPU 対応させることは非常に難しい。そこで、改良が行いやすいシンプルな二電子積分ルーチンを GPU 対応させることを試みている。本研究は藤田典久君(システム情報工学研究科)が主に研究を進め、朴、塙、梅田、庄司の協同研究体制でなされた。

<論文>

1. 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, *Int. J. Quantum Chem.*, accepted(2012). DOI: 10.1002/qua.24074
2. K. Yamaguchi, H. Isobe, S. Yamanaka, T. Saito, K. Kanda, M. Shoji, Y. Umena, K. Kawakami, J.-R. Shen, N. Kamiya and M. Okumura, Full geometry optimizations of the mixed-valence

CaMn₄O₄X(H₂O)₄ (X=OH or O) cluster in OEC of PS II: Degree of symmetry breaking of the labile Mn-X-Mn bond revealed by several hybrid DFT calculations, *Int. J. Quantum Chem.*, 13 APR 2012, DOI: 10.1002/qua.24117

3. T. Saito, M. Shoji, K. Kanda, H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Kitagawa, S. Yamada, T. Kawakami, M. Okumura, K. Yamaguchi, Theory of chemical bonds in metalloenzymes. XVII. Symmetry breaking in manganese cluster structures and chameleonic mechanisms for the OO bond formation of water splitting reaction, *Int. J. Quantum Chem.*, 112, 121-135 (2012).
4. T. Saito, S. Yamanaka, K. Kanda, H. Isobe, Y. Takano, Y. Shigeta, Y. Umena, K. Kawakami, J.-R. Shen, N. Kamiya, M. Okumura, M. Shoji, Y. Yoshioka and K. Yamaguchi, Possible mechanisms of water splitting reaction based on proton and electron release pathways revealed for CaMn₄O₅ cluster of PSII refined to 1.9 Å X-ray resolution, *Int. J. Quantum Chem.*, 112, 253-276 (2012).

< 学位論文 >

佐藤皓允、星間空間における光誘起 L 型アミノ酸過剰の理論的研究、修士論文。

< 講演 >

1. 佐藤皓允、庄司光男、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、星間空間における L 型アミノ酸過剰の理論的研究、天文学会春季年会、2012/03/22.
2. Mitsuo Shoji, Computational Bioscience Utilizing Supercomputers: Performance and Applications, LBNL and CCS-Tsukuba Joint Workshop, CCS, University of Tsukuba, 2012/3/19.
3. Mitsuo Shoji, QM/MM Studies on the reaction mechanisms in metalloenzymes, Exascale Symposium, The University of Edinburgh, 2012/2/23.
4. 佐藤 皓允、庄司光男、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、星間空間におけるアミノ酸キラリティ生成機構の理論的研究, ALMA ワークショップ, 2012/01/21.
5. K. Hanaoka, D. Kondo, M. Yang, K. Kamiya, M. Shoji, K. Shiraishi, Theoretical investigation for mechanism of DNA religation by E.coli topoisomerase IA, 第 84 回日本生化学会大会、国立京都国際会館, 2011/09/23.
6. D. Kondo, K. Hanaoka, M. Yang, K. Kamiya, M. Shoji, S. Kawai-Noma, H. Taguchi, K. Shiraishi, Theoretical Investigation of Structural Stability of beta;-Helix Model for Amyloid Fibrils from Yeast Prion Sup35, The 49th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Hyogo, 2011/09/06.
7. M. Shoji, D. Kondo, K. Hanaoka, M. Yang, H. Umeda, K. Kamiya, K. Shiraishi, Theoretical investigation on the substrate binding states of nitric oxide reductase, The 49th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Hyogo, 2011/9/18.

<ポスター発表>

1. K. Hanaoka, D. Kondo, M. Yang, K. Kamiya, M. Shoji, K. Shiraishi, Theoretical investigation for mechanism of DNA religation by E.coli topoisomerase IA,第 84 回日本生化学会大会、国立京都国際会館, 2011/09/23.
2. 庄司光男、近藤大生、花岡恭平、梁 文榮、梅田宏明、神谷克政、白石賢二、一酸化窒素還元酵素における基質結合状態についての理論的研究, 第 84 回日本生化学会大会、国立京都国際会館, 2011/09/23.
3. K. Hanaoka, D. Kondo, M. Yang, K. Kamiya, M. Shoji, K. Shiraishi, Computational analysis for DNA religating reaction by E.coli topoisomerase IA, ISTCP-VII, Waseda, 2011/08/23.
4. M. Shoji, K. Hanaoka, M. Yang, D. Kondo, K. Kamiya, K. Shiraishi, A new procedure for the calculation of electron transfer coupling matrix element, ISTCP-VII, Waseda, 2011/08/23.

<その他>

1. 庄司光男、花岡恭平、佐藤皓允、第 1 回つくば科学研究コンテスト、筑波大学大学会館、2012/3/17.
2. 庄司光男、Poster展示、SC11, 2011/11/15.
3. 花岡恭平、Gromacsでの分子動力学法(MD)の入門 (基礎編)、公開講習会(生命科学WG),CCS, 2011/10/27.
4. 庄司光男、生命科学研究分野研究紹介,物理チャレンジ(宮城県聖ウルスラ学院英智高等学校),CCS 2011/9/1
5. 佐藤皓允、花岡恭平、庄司光男、大学説明会 (物理学類) ,2011/8/27.
6. 朴泰祐, 佐藤三久, 埜敏博, 児玉祐悦, 高橋大介, 建部修見, 多田野寛人, 藏増嘉伸, 吉川耕司, 庄司光男, 「演算加速装置に基づく超並列クラスター HA-PACS による大規模計算科学」, 情報処理学会研究報告, 2011-HPC-130(21), pp. 1-7, 2011 年 7 月.

IX 1. 磁性物性グループ

准教授 小野田 雅 重

大学院生 (8名)

研究概要

核磁気共鳴 (NMR), 電子スピン共鳴 (ESR), 結晶構造解析, 磁気・輸送・熱測定等の多角的手法に基づいた, 主に遷移金属酸化物を対象とした機能性物質系 (イオンバッテリー, 熱電材料等), 相関電子系 (新型超伝導), 並びに量子スピン系 (幾何学的競合系) の研究.

この報告書では, 本グループによる「バナジウム酸化物系 (ポリアニオン系を含む)」、「コバルト酸化物系」、「チタン酸化物系」、「鉄ニクタイト系」等の研究状況を簡潔に整理する. 近年, 本グループが対象とした物質群の一部を図 1 に示す.

【1】バナジウム酸化物系

(1) 機能性物質系, 新物質系, 複合結晶系

機能性物質系として, イオンバッテリー, 熱電変換等で代表されるエネルギー貯蔵・変換系を扱っている. 前者の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り, 後者は熱電性能指数の向上である. イオンバッテリー放電試料は, 一般に V^{3+} あるいは V^{4+} 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. しかしながら, 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.

昨年度より, ポリアニオン系正極材料を対象とした研究を開始した. 2010年に本研究室で発明された次世代二次電池正極材料 $Li_9V_3P_{8-\delta}O_{29-\delta'}$ の充放電性能は, 少量の酸素欠損導入により 2 電子反応が安定化し, 容量 $C = 170 \text{ A h kg}^{-1}$ およびエネルギー密度 $P = 670 \text{ W h kg}^{-1}$ を示す. これらの性能は, 従来の正極材料よりも遥かに高く, さらにリンおよび酸素イオンが部分欠損した系では, 見かけ上, $C = 260 \text{ A h kg}^{-1}$ および $P = 10^3 \text{ W h kg}^{-1}$ が得られる. 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, ナシコン型 $Li_xV_2P_3O_{12}$ およびその関連型, 並びにオリビン型 $LiVPO_4F$ 等が挙げられるが, 上記の結果は, これらの性能をも凌いでおり, 今後の研究の展開が非常に重要である.

イオンバッテリーおよび熱電変換の機能性を備えた物質として, 本研究室で開発された $Cu_xV_4O_{11}$ 系が挙げられる. 本系は, 2 種類の Cu 鎖と V_4O_{11} 格子からなり, その中の 1 つの Cu 鎖と CuV_4O_{11} 結晶の基本周期が異なる複合結晶である. 複合結晶はそれほど珍しい系ではないが, Cu, V 両イオンが不対電子を持つことが特徴である. 今年度は, Cu 脱離試料のソフト化学合成 (単結晶・多結晶) に成功し, それらの構造, 伝導, 並びに磁気物性の評価を行った.

a) ポリアニオン系

- 新型 $Li_9V_3P_{8-\delta}O_{29-\delta'}$ — 新型二次電池正極材料の開発および単結晶の合成に成功し, その精密結晶構造, 磁気物性, 並びに NMR の解析を行った (論文 1, 2; 講演 6, 7; 特許出願 1, 2; 継続)

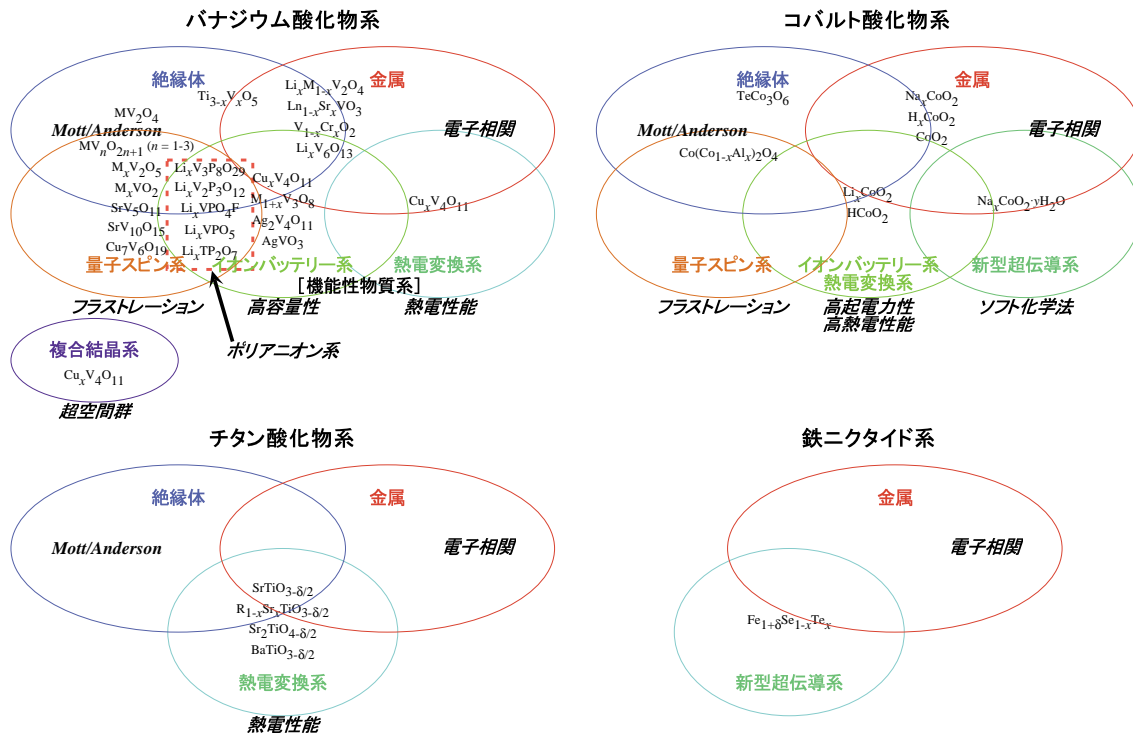


図 1: 近年, 本グループが研究対象としたバナジウム (ポリアニオン系を含む), コバルト, チタン酸化物系, 並びに鉄ニクタイト系の物質群.

- オリビン型 LiVPO_4F , LiVPO_5 (三斜晶および直方晶) — 単結晶合成および Li 脱離試料のソフト化学合成 (単結晶・多結晶) に成功し, それらの X 線粉末回折プロファイル解析, 精密結晶構造解析, 磁気物性評価, 並びに ESR を行った (学位論文 1; 講演 1, 4, 5; 継続)
- ナシコンおよびナシコン関連型 $\text{Li}_3\text{V}_2\text{P}_3\text{O}_{12}$ — 単結晶合成および Li 脱離試料のソフト化学合成 (多結晶) に成功し, それらの X 線粉末回折プロファイル解析, 精密結晶構造解析, 磁気物性評価, 高分解能 NMR, 並びに ESR を行った. また本系の結晶構造と充放電特性の相関を考察した (講演 2; 継続)
- 充放電特性評価時に問題となる dendrite 生成が抑制されるように測定手法の改良を行った.

b) 複合結晶系

- $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ — ソフト化学的手法による新物質 $\text{Cu}_{1.1}\text{V}_4\text{O}_{11}$ の合成と物性評価. (学位論文 3; 継続)
- $(\text{Cu}_{1-z}\text{M}_z)_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ — $x = 2.2$, $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Ag}$ 単結晶および多結晶に関する物性解析. (継続)

(2) 金属 絶縁体転移系

Anderson 型金属 絶縁体転移を示す $\text{Li}_x\text{M}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ 系, 多機能性物質の有力候補と考えられる複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系, 擬一次元金属・二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_6\text{O}_{13}$ 系等が現在の研究対象である. (継続)

(3) 量子スピン系

量子効果が強く現れる局在スピン系を量子スピン系とよぶ。フラストレーションのある系はその代表的系の一つで、最も活発に研究されている格子はスピネル格子と三角格子である。

a) スピネル格子 MV_2O_4

- $Li_xZn_{1-x}V_2O_4$ — 高分解能 NMR による Anderson 型金属-絶縁体転移機構の微視的解析 (継続)
- $Cd_xZn_{1-x}V_2O_4$ — 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 (保留)

b) 三角格子 M_xVO_2

- Li_xVO_2 — 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 (保留)
- Na_xVO_2 — $NaVO_2$ の超常磁性転移機構と $Na_{0.7}VO_2$ のスピン $\frac{1}{2}$ -3 量体転移機構に関する NMR. (保留)

c) オリビン格子 M_xVPO_4F , M_xVPO_5

- Li_xVPO_5 — 既出. スピンギャップ転移の機構解明 (学位論文 1; 講演 1, 4, 5; 継続)

【2】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、特にイオンバッテリー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等の問題がある。また類似の構造を持つ $Na_{0.3}CoO_2 \cdot 1.3H_2O$ 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ている。 Na_xCoO_2 はかつて熱電素材として注目された物質であるが、その後の詳細な研究により、大きな熱電性能因子は否定されている。

(1) 機能性物質系

- Li_xCoO_2 — 三角格子型 $Li_{0.759}CoO_2$ のソフト化学合成を行い、それらの構造、伝導、磁気物性評価、並びに NMR を行った。本組成において観測される 170 K での帯磁率異常が、Li イオンの運動の凍結に加えて、核四重極効果の変化 (あるいは NMR 強度の温度依存性の異常) に帰着されることが明らかになった (学位論文 2; 継続)

(2) 関連電子系

- CoO_2 (P3) — $LiCoO_2$ 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関する微視的モデルの確立。本成果に基づくイオンバッテリー性能向上の検討 (継続)

【3】他の 3d 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 $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ 系等の輸送機構を検討してきた。今回、 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たところ、本系は熱電変換材料には適さないが、一方で興味深い物性を示すことが明らかになった（講演 3；継続）

(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（継続）

(3) 三角格子 Li_xNiO_2

幾何学的フラストレーション効果、イオンバッテリー等の観点から 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（継続）

(4) 鉄ニクタイト系 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$

2008 年に発見された鉄ニクタイト系超伝導体の転移温度は銅酸化物高温超伝導体のそれに次ぐもので大変注目されている。本系の結晶構造、超伝導および常伝導機構を解明するために、多角的研究を進めた。また大塚研究室との共同研究が実施された（学位論文 4）

〈 論 文 〉

1. Masashige Onoda and Makoto Inagaki, A multiple-electron reaction in rechargeable lithium batteries with a positive electrode $\text{Li}_9\text{V}_3\text{P}_{8-\delta}\text{O}_{29-\delta'}$
Journal of the Physical Society of Japan **80**, 084801 (4pp) (2011)
2. Masashige Onoda, Satoshi Ikeda and Takehiko Ishibashi, Crystal structure and spin dynamics for the $\text{Li}_9\text{V}_3\text{P}_{8-\delta}\text{O}_{29-\delta'}$ insertion electrode system with a multiple-electron reaction
Journal of Physics: Condensed Matter **24**, 085402 (9pp) (2012)

〈 学位論文 〉

1. 池田聡，二次電池正極材料系 LiVPO_5 および関連物質の結晶構造と磁性
数理物質科学研究科修士（物理学）論文，2012 年 3 月

本研究は、二次電池正極材料として期待されている LiVPO_5 系の結晶構造と磁性の解明を目的として行われた。本系には、合成温度に応じて三斜晶 α 相と直方晶 β 相が存在する。一般に、遷移金属リン酸塩では遷移金属イオンが孤立し、その間の交換相互作用は弱いと考えられるのに対して、本系は V イオンの一次元ネットワークを持つため、磁気的な振る舞いについても興味深い。 α 相に関しては、ソフト化学法による Li の部分脱離を行った試料に対して、X 線四軸回折に基づく結晶構造解析を行い、Li イオンの濃度および異方性変位因子を決定した。 α 、 β 相の磁気的性質は、それぞれ一次元反強磁性交替鎖および一次元反強磁性鎖モデルで説明された。

2. 渋谷龍太, 三角格子系 Li_xCoO_2 ($x \sim 0.7$) の磁気異常と NMR

数理解物質科学研究科修士(理学)論文, 2012年3月

本研究は, Li_xCoO_2 系の物性評価および NMR による $x \sim 0.7$ の帯磁率異常の解明を目的として行われた. 固相反応法により Li_xCoO_2 ($x < 1$) を合成し, $\text{Br}_2/\text{CH}_3\text{CN}$ を用いたソフト化学法により, 種々の Li 濃度を持つ試料を得た. 電気抵抗率は, Li 濃度の低下とともに大きく減少し, 半導体 - 金属クロスオーバーが示唆された. $x = 0.703, 0.731, 0.773$ において, 帯磁率はキュリー-ワイス則に従い, Co が低スピン状態にあることがわかった. また, $x = 0.759$ において観測される帯磁率異常が, Li の核四重極効果の変化(あるいは NMR 強度の温度依存性の異常)および Li 運動による線幅の先鋭化に関連づけられることが明らかになった.

3. 田村麻人, 複合結晶系 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ の Cu 脱離効果

数理解物質科学研究科修士(理学)論文, 2012年3月

$\text{CuV}_4\text{O}_{11}$ (部分格子 1) と Cu 鎖 (部分格子 2) からなる複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ は, 基礎科学的には, 低次元伝導性, 金属絶縁体転移, あるいは電荷移動型相転移等の観点から研究されており, 応用的には高容量 Li 二次電池正極材料あるいは高性能熱電素材として注目されている. 本研究は, $\text{Cu}_{2.33}\text{V}_4\text{O}_{11}$ からソフト化学的に Cu を脱離させた物質系の結晶構造および物性の解明を目的として行われた. X 線四軸回折の結果, 本系では複合結晶性が消失し, b^* および c^* 方向に二倍の長周期反射を伴って, 三斜晶構造に移行することがわかった. また Cu 脱離に伴って, 本系は絶縁体的になり, 磁性および伝導を担うイオンは Cu であることが明らかになった.

4. 昇佳史, 超伝導系 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-\delta'}$ の結晶構造と物性

数理解物質科学研究科修士(理学)論文, 2012年3月

本研究は鉄系超伝導体 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-\delta'}$ の結晶構造と物性の理解を目的として行われた. $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-\delta'}$ 系は, 二元系であること, および結晶構造が FeSe の伝導層のみからなること等から, 超伝導発現機構を解明する上で最適な物質であると考えられるが, および δ' が有限であるか否かは明らかにされていない. 種々の合成方法を試み得られた結晶試料に対して物性解析を行った結果, 構造転移温度以上の領域における電気抵抗率の振舞いは 2 バンドモデルにより説明された. ここで電子バンドは温度に比例した伝導を持ち, ホールバンドは温度に依存しない伝導を示す. 一方, 構造転移温度以下では, 温度に比例する伝導のみが現れた. 磁気的にはパウリ常磁性であり, 電子相関の強い系であることが示唆された.

〈 講 演 〉

1. 石橋剛彦, 小野田雅重, オリビン型リチウム二次電池正極材料 LiVPO_4F の磁気的性質

日本物理学会 2011 年秋季大会・富山大学五福キャンパス・2011 年 9 月 21 日・21pPSB37

2. 小野田雅重, 廣瀬元, 池田聡, 稲垣誠, ポリアニオン系二次電池正極材料 III

日本物理学会 2011 年秋季大会・富山大学五福キャンパス・2011 年 9 月 22 日・22pRB7

3. 小野田雅重, 出村郷志, $\text{BaTiO}_{3-\delta/2}$ 系の結晶構造と磁性

日本物理学会 2011 年秋季大会・富山大学五福キャンパス・2011 年 9 月 24 日・24aGB5

4. 池田聡, 小野田雅重, 二次電池正極材料 Li_xVPO_5 系の結晶構造と磁性

日本物理学会第 67 回年次大会・関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス・2012 年 3 月 25 日・25pAF2

5. 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 II
日本物理学会第 67 回年次大会・関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス・2012 年 3 月 25 日・
25pAF3
6. 稲垣誠, 小野田雅重, 二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 系の開発
日本物理学会第 67 回年次大会・関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス・2012 年 3 月 25 日・
25pAF6
7. 小野田雅重, 池田聡, 石橋剛彦, 新型二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 系の結晶構造とスピンダイナミクス
日本物理学会第 67 回年次大会・関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス・2012 年 3 月 25 日・
25pAF7

〈高校生・中学生対象授業と講演〉

1. 小野田雅重, スピン科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
茨城県立水戸第一高等学校 2 年生「模擬講義」・2011 年 10 月
2. 小野田雅重, スピン科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
福島県立相馬高等学校 2 年生「若い世代のための出張講義」・2011 年 10 月
3. 小野田雅重, スピン科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
附属駒場高等学校 2 年生筑波大学研究室訪問・2011 年 11 月
4. 小野田雅重, ミクロな視点からの科学-ポテトチップスの味と電子スピン-
附属駒場中学校 3 年生筑波大学研究室訪問・2012 年 2 月

〈産学連携〉

1. 小野田雅重, 知的財産活用プロジェクト, 次世代二次電池正極材料の開発 (2011-2012)

〈特許出願〉

1. 小野田雅重, 正極活物質およびその製造方法並びにリチウムイオン二次電池, 特願 2010-285193
2. 小野田雅重, 正極活物質およびその製造方法並びにリチウムイオン二次電池, 特願 2011-215521
(特願 2010-285193 の優先権主張出願)

IX - 2. 半導体物性グループ

教授 舩本 泰章
 准教授 野村 晋太郎、池沢 道男
 助教 富本 慎一
 研究員 伊藤 宙陸
 外国人研究員 Pengtao Jing
 大学院生 (12名)

【1】 半導体量子ドットのスピン光物性 (舩本泰章, 富本慎一)

(1) 光パルスの強度・偏光による量子ドット中の電子スピンの制御
 (富本慎一, 川名啓介, 舩本泰章) [論文 5, 9, 12]

(2) 1電子ドープ量子ドットにおける共鳴励起光パルスによるスピンの偏極と緩和
 (富本慎一, 村上瑛, 舩本泰章) [論文 12, 14]

1電子をドープした半導体量子ドットはスピンを用いた固体量子ビットの候補として期待されている。

この系は、それぞれ2つのスピン状態をとりうる基底状態（電子）と光励起状態（負の荷電励起子、トリオン）の4つの準位によって記述できる（図1）。電子とトリオンの状態間に共鳴する励起光（図1のエネルギー ϵ_T ）によって電子スピンの状態を変化させることができ、それが量子ビットに求められる高速操作を可能にすると期待されている。この4準位系では、2種類の量子コヒーレンスを定義できる。一つはスピンコヒーレンスであり、2つの電子スピン状態間 ($|x\rangle$ と $|\bar{x}\rangle$ 、 x は量子化軸) またはトリオンスピン状態間 ($|Tx\rangle$ と $|T\bar{x}\rangle$) のコヒーレンスである。他の一つは光学的コヒーレンスであり、電子とトリオンの状態間（図1(a)の両矢印で結ばれた4通りの組合せがある）のコヒーレンスである。これら2種類の量子コヒーレンスは、量子ドットにおいては非常に長い寿命をもつ。我々は、1電子をドープした InP/InGaP 量子ドットにおいて、共鳴励起光パルスを照射した後のスピンダイナミクスを時間分解カー回転 (TRKR) 測定によって観察し、光学的コヒーレンスに強く影響された特異な電子スピンの振る舞いを見出した。

図2 (a) ~ (g) は TRKR の励起強度依存性の測定結果である。強励起の場合 (a) または (b) では、47ps の周期をもつ振動が 2ns 程度の長い寿命で観測された。これは、量子ドット中の電子の偏極したスピンの歳差運動による。一方、弱励起の場合 (f) また

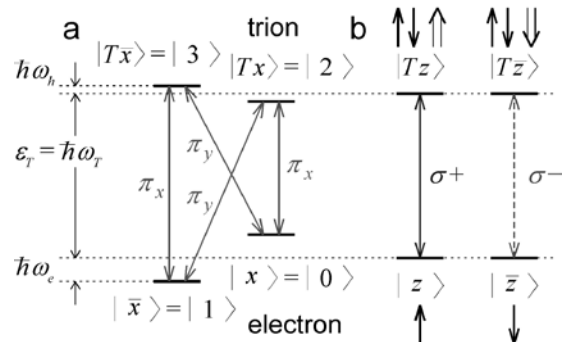


図1: 1電子ドープ量子ドットの4準位系

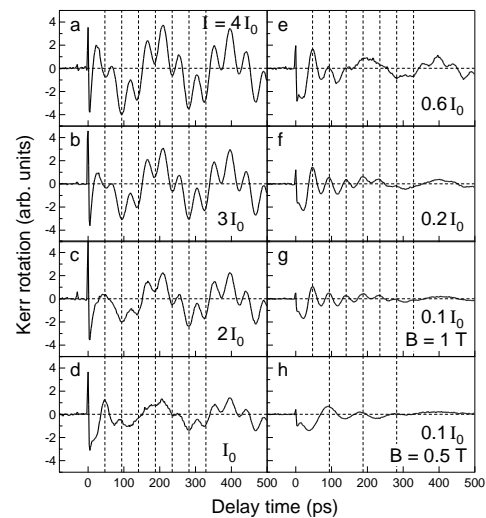


図2: 1電子ドープ InP/InGaP 量子ドットにおける TRKR の励起強度依存性の測定結果

は (g) では、同じ周期で逆位相の振動が 200ps 程度の寿命で速く減衰する様子が観測された。位相の反転はスピン偏極の方向が逆になったことを意味しており、自己形成量子ドットがもつ光学的異方性に起因するものとして説明できる。弱励起の場合に見られる速い減衰が光学的コヒーレンスによるものである。これを示すために我々は、4 準位系の密度行列を用いたモデル計算を行った。

図 3 (a) と (b) はそれぞれ弱励起と強励起の場合の計算結果である。電子スピンの観測軸 (z 軸) 方向成分の期待値 $\langle s_z \rangle$ を光パルス入射後の時間の関数としてプロットしている。図 2 の実験結果で見られた位相の反転と振動寿命の変化を再現出来た。特に、弱励起の場合 (a) での振動の速い減衰は、コヒーレントな自然放射光が 4 準位系にもたらす反作用をモデルに取り入れることによって現れる振る舞いである。この反作用がなければ、図 3 (e) のように速い減衰は現れない。したがって、図 2 の TRKR の測定結果は、光学的コヒーレンスがスピンコヒーレンスに強い影響を与えていることを示している。

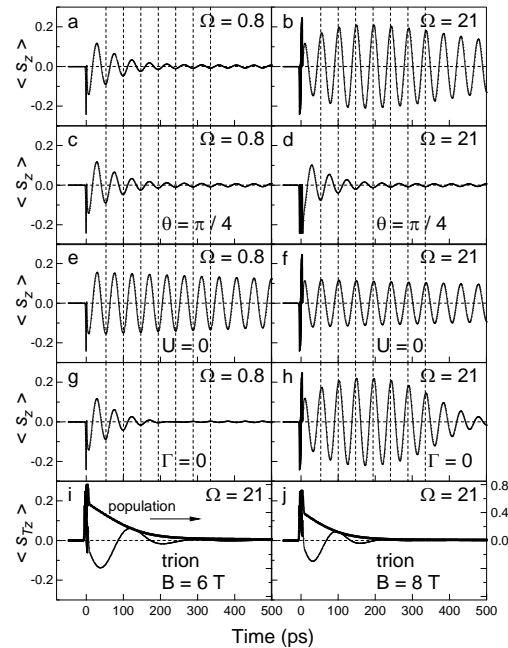


図 3 : 4 準位系の密度行列を用いたモデルによる電子スピンの期待値 $\langle s_z \rangle$ の時間発展の計算結果 (Ω は励起光強度を表すパラメータ)

(3) 時間分解カー回転法による伝導電子の g 因子の符号の決定
(富本慎一, 野澤伸介, 舛本泰章) [論文 2]

(4) ZnO 薄膜における電子スピンドायナミクス (富本慎一, 野澤伸介, 舛本泰章) [論文 6]

【2】単一量子ドットの分光研究 (池沢道男, 舛本泰章)

(1) GaAs:N 等電子トラップの単一光子発生

(池沢道男, 佐久間芳樹^A, 張遼, 曾根良則, 森達哉, 濱野毅信, 渡邊真人, 迫田和彰^A, 舛本泰章^A物質・材料研究機構) [論文 10]

(2) GaAs:N 等電子トラップに束縛された励起子の均一幅

(池沢道男, 張遼, 佐久間芳樹^A, 舛本泰章^A物質・材料研究機構)

直接遷移型のバンド構造を持つヒ化ガリウム (GaAs) 結晶に窒素をドーブすることによって形成される発光中心の中には、束縛励起子の寿命が 1ns 以下と短く、明るい単一光子源となるものがある。このような寿命の短い発光中心は、コヒーレンス時間 T_2 が発光寿命 T_1 の 2 倍で与えられる上限値に達している可能性がある。この条件は 2 光子の干渉性を利用する多くの応用にとって重要である。そこで、GaAs 中の窒素由来発光中心に束縛された励起子のコヒーレンス時間を調べ、Hong-Ou-Mandel 干渉のような、より高度な応用への可能性を検討した。

コヒーレンス時間を測定する方法としては、フォトンエコー法や共鳴発光法などいくつか考えられるが、ここでは、単一発光中心の発光線幅を干渉計を利用して高精度に求めることによって、束縛された励起子の均一幅 ($\hbar/\pi T_2$) を得る。フォノンとの相互作用によるデコヒーレンスを避けるために、試料は

極低温に冷却し、自作の安定な共焦点顕微光学系に取り付けた。これによって約一日経過してもほとんど試料のドリフトが見られない、非常に安定な観測が可能になった。単一発光中心からの発光はシングルモード光ファイバーを通して室温部分に取り出され、狭帯域のバンドパスフィルターで発光中心以外の背景光などを取り除いた後、単一光子検出器を組み込んだマッシュツェンダー干渉計で自己相関関数が測定された。図4はある発光中心の、温度 1.4K での実験結果を示している。中段が自己相関関数で、上段はその一部を拡大したものである。干渉計の片方のアームを移動させて時間遅延をつける事によって、発光波長約 830nm に対応する約 2.8fs 周期の干渉波形が見られる。この波形から干渉の鮮明度 (Visibility) を求めたものが下段にプロットしてある。鮮明度は遅延時間の増加とともに、ほぼ指数関数的に減衰し、その減衰時間から位相緩和時間 T_2 が 308ps と得られた。対応する均一幅は、 $\Gamma_h = 4.3\mu\text{eV}$ となる。この値は高品質な III-V 族半導体量子ドットに閉じ込められた励起子と同じ程度に狭い。均一幅は、発光中心によってある程度のばらつきがあるが、概ね $\Gamma_h < 20\mu\text{eV}$ であり、最も狭い均一幅としては Γ_h ($T=2\text{K}$) = $3\mu\text{eV}$ 程度のものが得られた。これは、寿命広がり 3 倍程度と、かなり近い値になっている。寿命広がりまで達していない理由としては、非共鳴なバンド間励起を行っていることにより、発光中心周りのトラップサイトに電荷が捕獲・解放されることによる発光中心位置での電場の揺らぎによるスペクトル拡散が起きているためと考えられる。今後、準共鳴励起などによってこの点を解明する必要がある。

(3) エネルギーの揃った GaAs:N 等電子トラップ発光 (池沢道男, 張遼, 佐久間芳樹^A, 舛本泰章^A物質・材料研究機構)

前述した GaAs 中の窒素等電子発光中心は、良く知られた GaP 中の NN ペアなどと比べて明るさでは優れているものの、エネルギーが揃わないという問題があった。そのため、マクロ PL スペクトルにはピークとして観測されず、不均一に広がった発光帯が現れていた。これを改善するために、有機金属気相成長法 (MOCVD) で N ドーピングのガス導入シーケンスなど、成長条件に検討を加え、フォトルミネッセンススペクトルとの相関を調べた。成長は減圧 MOCVD 法で 550 °C にて行った。基板には半絶縁性 GaAs (001) を使い、GaAs の原料ガス

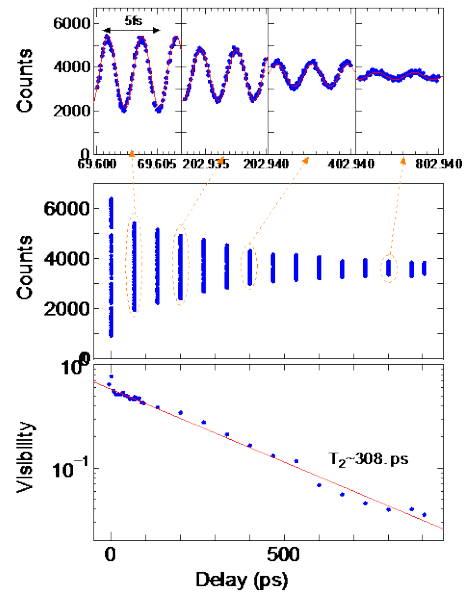


図4: GaAs 中の単一窒素由来発光中心に束縛された励起子の位相緩和時間測定。中段: 自己相関関数。上段: 自己相関関数の拡大図。830nm に対応する周期の干渉波形が見られる。信号の最大値 I_{max} と最小値 I_{min} から、 $V = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$ として明瞭度を求めたものが、下段にプロットしてある。

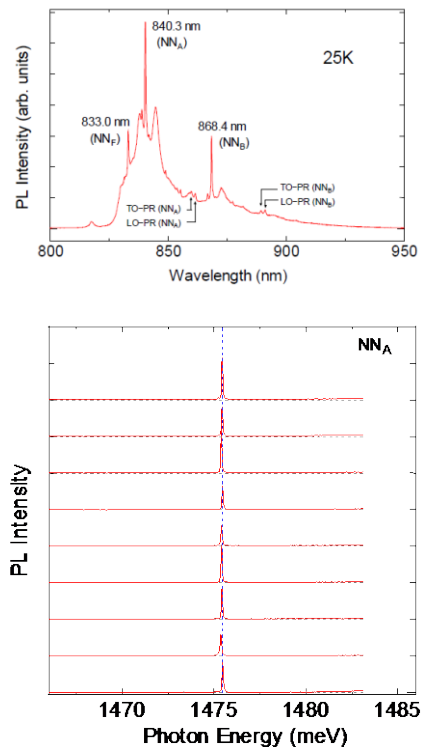


図5: 上段: δ ドープ GaAs:N 試料のマクロ PL スペクトル。成長条件を工夫した結果、マクロ PL でも輝線状スペクトルが得られるようになった。下段: より希薄な類似試料のマイクロ PL。NN_A 発光中心のエネルギーが良く揃っている事が分かる。

は TEGa と AsH₃ を用いた。N原料にはジメチルヒドラジン (DMHy) を使い、各サンプル中に δ ドープ層を 1 層のみ挿入した。DMHy の供給シーケンスとして複数の手法を試み、それによるN濃度や発光スペクトルの違いを SIMS と PL を使って調べた。図 5 上段は 200nm の GaAs バッファ層を成長後、表面に 1 原子層相当の TEGa を供給して Ga 終端面を形成し、引き続き DMHy を 2s 供給、さらに 100nm の GaAs キャップ層を積層したサンプルのマクロ PLスペクトルである。δ ドープした N の面密度 [N]_{2D} は 3.3×10¹² cm⁻² である。図 5 のように 833nm, 840nm, 868nm 付近に強い PL 輝線発光が観測された。これらは牧本らの報告の NN_F, NN_A, NN_B の発光波長と一致する。次に、NN_A の発光エネルギーの均一性を評価するため、より低濃度の試料を用いて、サンプル面内の異なる場所で顕微 PL スペクトルを取得した。図 5 下段は NN_A 中心が存在する 9 箇所スペクトルを比較したものである。異なる場所でも発光エネルギーはよく揃っており、発光エネルギーの揺らぎは 100μeV 以下と極めて小さい事がわかった。このように、GaAs:N においてもエネルギーの揃った単一光子源を得ることができると示された。

【3】新しい半導体ナノ構造 (舛本泰章, 池沢道男, 冨本慎一)

(1) コアマルチシェル量子ドットから正孔伝導性ポリマーへの高効率エネルギー移動

(Pengtao Jing^A, Xi Yuan^{AB}, Wenyu Ji^A, 池沢道男, Xueyan Liu^A, Ligong Zhang^A, Jialong Zhao^A, 舛本泰章 ^A中国科学院長春光学精密機器物理研究所 ^B中国科学院大学院) [論文4]

量子ドットでは、高いエネルギーを持つ光子から多励起子を生成する事により、劇的に量子収率の向上が期待されている。光を励起子に変換した量子ドットから電子を取り出す際のポイントとなるのが、安価でフレキシブルな特長を有する量子ドット・ポリマーハイブリッド太陽電池では、量子ドットから伝導性ポリマーへの高効率エネルギー移動の効率である。ポリマーの吸収帯の裾と量子ドットの発光帯の裾と重なるとき Förster 型のエネルギー移動が期待でき、光吸収に続く非輻射消滅が圧倒的に抑制されるシェル構造を持つコア量子ドットにおいても Förster 型のエネルギー移動が起こるかどうかが明らかにする事は重要である。3nm の厚みの CdS/ZnCdS/ZnS マルチシェルを持つ CdSe コア量子ドットを伝導性ポリマー 4,4',4''-Tris(carbazol-9-yl)-triphenylamine (TcTa) や N,N'-di(3-methylphenyl)-N,N'-di(phenyl)benzidine (TPD) 中に包含させたポリマーフィルムにおいて、図6 に示す様に TcTa や TPD ポリマーの吸収帯の裾が CdSe 量子ドットの発光帯の裾と重なるとき TcTa や TPD ポリマーから CdSe 量子ドットに Förster 型のエネルギー移動が起こっていることを量子ドットの励起スペクトルとナノ秒時間相関単一光子計数法により調べた発光減衰の時間応答に観測された。TcTa ポリマーを用いたとき最高 86% と評価される高効率エネルギー移動が起こっていることが観測された。3nm 程度の厚みのマルチシェルでも高効率のエネルギー移動が起こっていることを明らかにした。

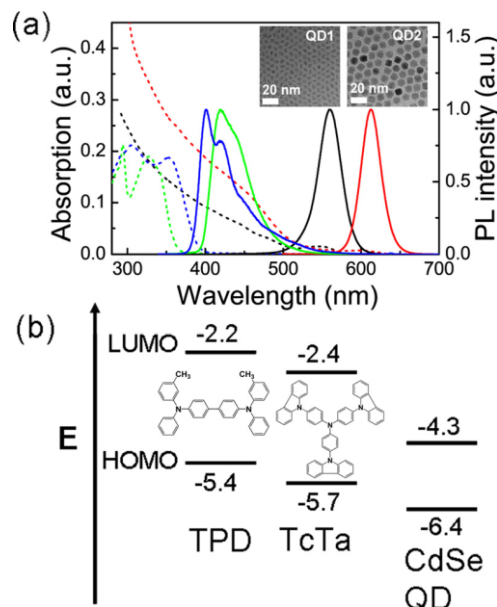


図6:(a) CdSe コア量子ドットの発光スペクトルと伝導性ポリマーの吸収スペクトルと (b) 伝導性ポリマーの HOMO, LUMO バンドのエネルギー配置

(2) 導電性ポリマーから ZnCuInS 量子ドットへのエネルギー移動

(Xi Yuan^{AB}, Jialong Zhao^A, Pengtao Jing^A, Wenjin Zhang^C, Haibo Li^D, Ligong Zhang^A, Xinhua Zhong^C, 舛本泰章^A 中国科学院長春光学精密機器物理研究所^B 中国科学院大学院^C 華東理工大学^D 長春師範大学) [論文13]

3種類の伝導性ポリマーから4種類の ZnCuInS 量子ドットへのエネルギー移動を定常および時間分解発光分光により調べた。エネルギー移動は図7に示すように量子ドットのサイズが大きくなり、Zn の濃度が減少するほど Förster 型共鳴エネルギー移動が効率的に起こり、3nm から 5nm に変化する Förster 半径を考えるとうまく説明できることが明らかになった。加えて電荷分離に起因する量子ドット発光の消光が観測された試料もあった。これらのエネルギー移動と電荷分離過程は図8に示すような ZnCuInS 量子ドットと伝導性ポリマーの間のバンド配置に基づいてうまく説明される。

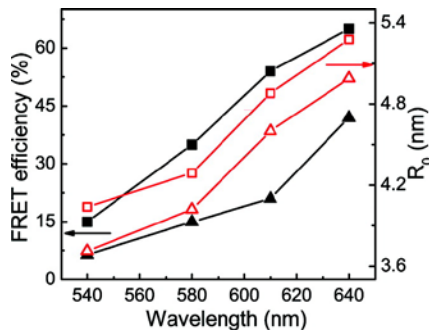


図7: 導電性ポリマー TPBI (■) と TCTA (▲) から ZCIS/ZnS 量子ドットへの高効率エネルギー移動の量子ドットの発光波長依存性。TPBI (□) と TCTA (△) 中の ZCIS/ZnS 量子ドットの Förster 半径 (R0) も示す。

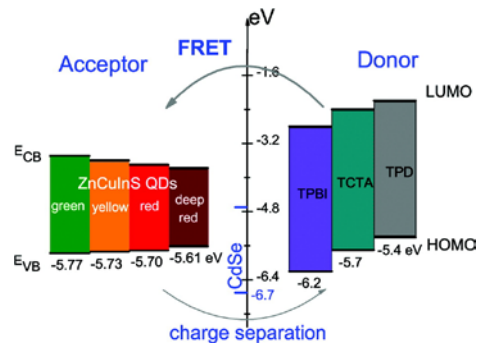


図8: 3種類の伝導性ポリマーと4種類の ZnCuInS 量子ドットの伝導帯、価電子帯のエネルギー配置とポリマー・ドット間の電荷移動とエネルギー移動

(3) 量子ドットから透明ナノ粒子への電子移動

(舛本泰章, 高木勇人, 鈴木孝行, 海野晃, 孫建輝) [論文15]

シリコン太陽電池に比べて安価な色素増感太陽電池は、研究室レベルで現在 12% の効率で発電が可能であるが、この高効率の鍵になっているのは、Grätzel により導入された色素から圧倒的大面積の界面を持つポーラス透明ナノ粒子への高速電子移動である。量子ドットでは、高いエネルギーを持つ光子から多励起子を生成する事により、劇的に量子収率の向上が期待されているが、光を励起子に変換した量子ドットから電子を取り出す際のポイントとなるのが、量子ドットから量子ドットが吸着するポーラス透明ナノ粒子への高速電子移動である。本研究では、赤外域からの光吸収や紫外域からの多励起子生成が可能な PbS や PbSe 量子ドットからポーラス TiO₂ への電子移動をサイズを変えた量子ドットを用いてポンププローブ・フェムト秒過渡吸収分光法、発光のフェムト秒アップコンバージョン分光法、発光のナノ秒時間相関単一光子計数法を動員して研究し、図9に示す様にアナターゼ型ポーラス TiO₂ フィルムの伝導帯エネルギーを超える量子化 LUMO 準位を持つ 2.7nm の直径の PbSe 量子ドットでは、電子移動が 1ps の短時間で起き、TiO₂に吸着

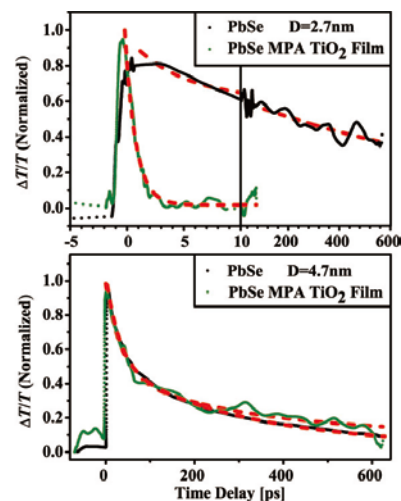


図9: PbSe 量子ドットからポーラス TiO₂ への高速電子移動に伴う減衰が直径 2.7nm のドットでは見られるが 4.7nm のドットでは見られない。

しない PbSe 量子ドット中の電子寿命に比べて 10^6 倍短く、高効率を期待できることを明らかにした。

本研究の PbS 量子ドットに関わる部分は The State University of New York at Buffalo の Diane Youker 氏、David Watson 教授との共同研究として行われた。

また、CuInS 量子ドットからポーラス TiO₂ への電子移動を量子ドット発光のナノ秒時間相関単一光子計数により研究した。

(4) 通信波長帯に近い InAs/InP 量子ドットの励起子分子の大きな束縛エネルギー

(舛本泰章, 吉田清太郎, 池沢道男, 佐久間芳樹^A, 冨本慎一^A物質・材料研究機構) [論文1, 8]

(5) 単一ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光ルミネッセンス

(舛本泰章, 平田裕基, P. Mohan^A, 本久順一^A, 福井孝志^A 北大量子集積エレクトロニクス研究センター) [論文3]

【4】半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

(1) 希釈冷凍機温度近接場光学顕微鏡を用いた量子ホール端状態空間分解測定

(伊藤宙陸, 柴田佑輔, 野村晋太郎) [論文 16, 21]

強磁場中量子ホール状態にある二次元電子系の端には電子間相互作用と閉じ込めポテンシャルにより、電子密度が一定でフェルミ面近傍にエネルギーギャップの存在する非圧縮性液体と、電子密度が空間的に滑らかに変化しエネルギーギャップのない圧縮性液体が交互に存在するとされている。この端状態中の電子は一方向にのみ運動し後方散乱がないため高い量子干渉性を示し、最近注目を集めている。しかしながら、従来、さまざまな試みにも関わらず、圧縮性液体と非圧縮性液体の空間分布は明解ではなかった。本研究では、希釈冷凍機中の近接場光学顕微鏡を用いた局所光励起により、端状態の空間分布を得ることに成功した。局所光励起により、局所的に任意の場所に電子を注入すること、共鳴励起により選択的に準位を励起すること、が可能となった。二次元電子系の端では伝導電子帯と価電子帯の双方が閉じ込めポテンシャルにより空間分布を持つ。光照射による価電子帯から伝導電子帯のフェルミ面への遷移エネルギーは、試料の外側で小さく、内側に向かうに従って大きくなる。従って、入射光の波長を選ぶことにより、端状態のみを光励起するか、または二次元電子系の領域 (バルク) と端状態の双方を光励起するかを選択することが可能である。このことを利用して、近接場光プローブを走査して光照射により試料端子間に生じる電圧のマッピングを行った。その結果、図 10 に示すように、圧縮性/非圧縮性液体の縞が磁場に応じて Chklovskii 等のモデルに従い空間変化することを見いだした。さらに、端状態のみを励起する波長を選ぶことにより、試料端に光生成された電子の行方をたどることが可能となった。試料端に光生成された電子が、端状態とバルク領域の間にあるバリアを越えて、光励起した試料端と反対の試料端まで到達する場合と、光励起した試料端にのみ留まる場合とがあることがマッピングにより明らかとなった。この結果は、端=バルク状態間結合の大きさが電子占有数 ν

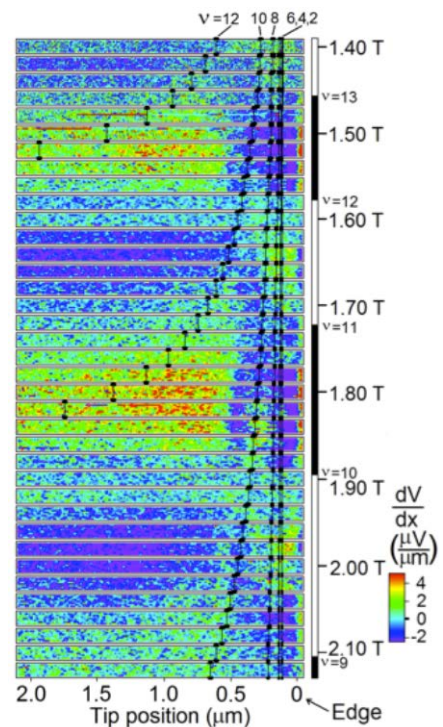


図 10: 二次元電子系試料端付近の光起電圧の空間微分のマップ図

に応じて振動していることを明確に示した。

本研究は低温物性グループの大塚教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所赤崎グループ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 (野村晋太郎) [論文 22]

半導体二次元電子-正孔系の分数量子ホール状態において、従来 $\nu=1/3$ 近傍では2つの発光ピークが観測され、低エネルギー側、高エネルギー側の発光のピークはそれぞれ一重項 (χ_s^-)、三重項 (χ_t^-) の荷電励起子からのものであると考えられてきた。私たちは、低キャリア密度領域で特に電子間相互作用と電子-正孔間相互作用の高い条件のもとで、ダブル分光器を用いた高分解能発光測定を希釈冷凍機中 5T 以下の比較的低い磁場領域で行った。その結果、 χ_s^- ピーク、 χ_t^- ピークそれぞれがさらに複数の微細構造に分かれることを見いだした。分数量子ホール状態では、分数電荷の準電子、準正孔、スピン反転した準電子からなる励起状態があることが知られ、光励起下において、これらの準粒子と価電子帯の正孔とが結合した分数荷電準励起子の存在が議論されている。私達の観測した発光の微細構造はこれらと関わるものと考えられる。私たちの設定した条件では、従来の観測例と比較して磁場が低いため、特にスピン反転した準電子からなる励起状態が観測されやすいと考えられる。そのため少数スピンを主に捉える $\sigma+$ 円偏光にも強い発光が観測され、このことが、従来、報告されていない状態の観測につながったと考えられる。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所赤崎達志氏のグループ、東北大学教授平山祥郎氏との共同研究である。

(3) 非対称二重量子井戸の発光分光 (宮城浩一, 野村晋太郎)

低電子密度領域において二次元電子+正孔系の発光における電子間相互作用と電子-正孔間相互作用に依存した興味深い現象が観測されている。本研究では非対称二重量子井戸を用いて、電子-正孔間距離と電子密度の両方を表面ゲート (V_f) と裏面ゲート (V_b) で制御することを試みた。2つの井戸は 2nm の障壁層を隔てて表面ゲート側に幅 10 nm、裏面ゲート側に幅 38nm とした。この試料における発光寿命、および発光強度の V_f 、 V_b 依存性と磁場依存性を測定した。

本研究ではピコ秒モードロックチタンサファイアレーザーからの波長 795nm の光パルスを実用スプリッターを用いて 800kHz まで間引き、励起強度 $4\text{mW}/\text{cm}^2$ で試料温度約 4K の試料に照射し、ストリークカメラを用いて時間分解測定を行った。また、最低温度 300mK の ^3He 冷凍機中に光ファイバーを導入し、定常発光分光測定を行った。

その結果、0T において、図 11 に示すように二重量子井戸特有の発光である直接励起子発光と間接励起子発光を捉えることができ、 V_f の減少、 V_b の増加に伴って電子-正孔間距離が長くなり発光寿命が長くなることが分かった。 $V_f = -0.1\text{V}$ 、 $V_b = 0\text{V}$ において発光寿命は最大で 457ns となった。発光寿命にみられる2つの成分の内、短い成分は磁場印加により減少し、長い成分の寿命は増大した。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所赤崎

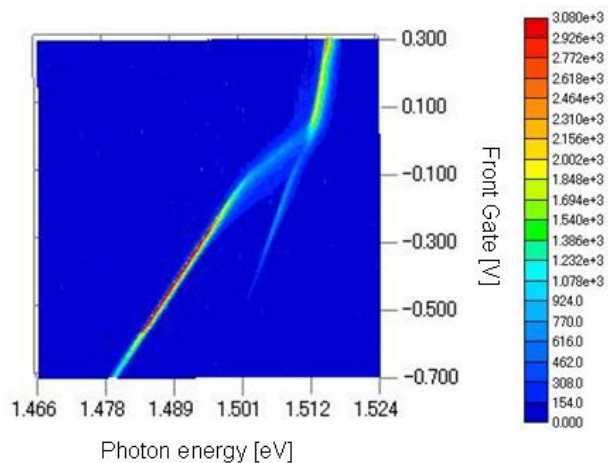


図 11: 垂直磁場 0T、温度 $T = 300\text{mK}$ 、 $V_b = 0\text{V}$ におけるゲート付き二重量子井戸構造試料からの発光スペクトルの V_f 依存性

達志氏のグループとの共同研究である

(4) 光伝導スイッチを用いた超短パルス時間分解測定 (大滝健嗣, 野村晋太郎)

光伝導スイッチは半導体に直流電圧を印加して超短パルス光を照射することにより、電気抵抗を高速に変化させるものである。これを 2 個使うことにより電気パルスのピコ秒時間分解測定が可能となる。従来から高周波信号の波形観測には高速オシロスコープが使われてきたが、時間分解を行うためにケーブルやプローブを介す必要があるため、この配線の影響を受け信号の減衰やパルス幅の広がりが生じていた。一方、光伝導スイッチを用いると 1 つの半導体チップ上に光伝導スイッチと被測定対象の電子素子を作り込んで時間分解を行うことができることから、配線を極めて短くすることができる。そのため信号の劣化を抑えた測定が可能である。以上の理由から光伝導スイッチは、高速なデバイスのピコ秒スケールの電気伝導を調べる手段として利用される。そこで本研究では、光照射による抵抗変化が大きい GaAs を基板上に光伝導スイッチを作製してピコ秒時間分解測定を行った。得られた応答信号の伝搬経路長依存性、光照射強度依存性、バイアス電圧依存性等を明らかにし、応答信号にはバリステックなプラズマ波が関与していることが示唆された。

本研究は電子・物理工学専攻大毛利健治准教授との共同研究である。

(5) 半導体中スピン観測のためのナノ SQUID の開発 (柴田佑輔, 野村晋太郎)

ナノメートルサイズの超伝導量子干渉素子 (ナノ SQUID) は、ジョセフソン接合を二つ有する量子干渉素子であり、超高感度の磁場検出素子として知られる。ナノ SQUID は単一スピンの検出のための有力な候補である。私たちは半導体ナノ構造中電子スピンの直接的な観測のために、ナノ SQUID の開発を行っている。ナノスケールでの局所磁気観察用プローブとして、SQUID と測定対象との直接的な磁気カップリングについて検討し、マッピング可能な走査型 SQUID プローブの開発中である。本年度は、走査型 SQUID プローブの改良に努めた。シリコンの深堀ドライエッチングを導入することにより、SF₆ によるシリコンのエッチングと、C₄F₆ によるエッチング面への保護膜の堆積を交互に行い、高いアスペクト比を持った深堀加工が可能となった。再現性良く、走査型 SQUID プローブを作製することに成功した。

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。

(6) Si ナノレイヤー・ナノワイヤーの発光分光 (櫻井蓉子, 野村晋太郎) [論文 18, 19]

顕微フォトルミネッセンス法は電気伝導測定では困難な半導体中のキャリア分布の空間分解・時間分解が可能であるという特徴をもつ。発光特性は一般に界面の平坦性、低濃度の不純物に非常に敏感であり、例えば、Si 中のボロンやリンの濃度の検出等に用いられる。Si ナノワイヤにおいては、特に、曲率をもった表面は界面準位が高くなるという報告がある。発光測定による界面準位密度の測定はその重要な手がかりとなる。そこで本研究では、Si ナノワイヤ FET のフォトルミネッセンスを用いたナノワイヤの界面準位評価のために、ナノワイヤを形成する前段階である Si-SOI ナノレイヤと、Si ナノワイヤの顕微フォトルミネッセンス測定を行った。

光強励起された半導体において、再結合時間が十分長い場合は光生成キャリアが熱力学的平衡状態に達して格子温度まで冷却し、電子-正孔系の量子凝縮が起こる。高温において、励起子ガスの密度が高くなり Mott 転移の密度を超えると、電子と正孔が個々に運動して金属的な状態となる電子-正孔プラズマ状態が安定となる。低温において、励起子ガスから液体と気体の共存相である電子正孔液滴相 (EHD) を経て電子-正孔液体相 (EHL) となると考えられている。これまで、バルク Si や Ge, C において、このような量子凝縮は調べられてきた。極低温では、励起子ボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) や励起子 BCS 転移が起こることが予言されている。閉じ込め効果によって、静電遮蔽効果の低減と電子-正孔間のクーロン力の増大が見込まれるため、このような量子凝縮状態は観測されやすいと考えられる。この

ような閉じ込め構造では不規則性の存在が不可避である。不規則性は量子状態を擾乱すると共に、非発光遷移の増大から量子凝縮状態の形成を阻害する。非発光遷移のレートが大きいと、同じ光励起密度であっても電子-正孔ペアの密度は減少する。従って、電子-正孔ペアの密度が大きい場合にのみ観測される量子凝縮状態の観測のためには、不規則性の少ない高品質の試料が不可欠であり、量子凝縮状態からのフォトルミネッセンス特性は試料品質を敏感に反映する。

図 12 にナノレイヤおよびナノワイヤ試料からの顕微フォトルミネッセンスピークエネルギーの光励起強度依存性を示す。ナノレイヤ試料では励起強度の減少に伴い発光のピークが低エネルギー側へシフト、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上の励起強度においてほぼ一定となった。エネルギーシフトの要因の一つであるキャリアによるクーロン遮蔽効果は、二次元系においてある密度までは増大し、一定以上キャリア数が増えると二次元系のエネルギーに対して定数である状態密度を反映して一定となる。一方、設計値 240nm のナノワイヤ試料では励起強度の増大に伴い、発光ピークエネルギーの高エネルギーシフトが見られた。ナノワイヤでは状態密度が小さいためキャリアによる位相空間の占有が効果的に起こる。その結果、発光ピークエネルギーの高エネルギーシフトが生じる。以上のように、顕微フォトルミネッセンスピークエネルギーの光励起強度依存性はナノレイヤ、ナノワイヤの構造に起因する状態密度を反映していることがわかる。このような光学的なデバイス評価は Si ナノワイヤのみならずプレーナ構造や Fin FET を含む他の Si ナノデバイスに対しても適用可能である。

本研究は白石賢二教授、山田啓作教授、大毛利健治准教授、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。

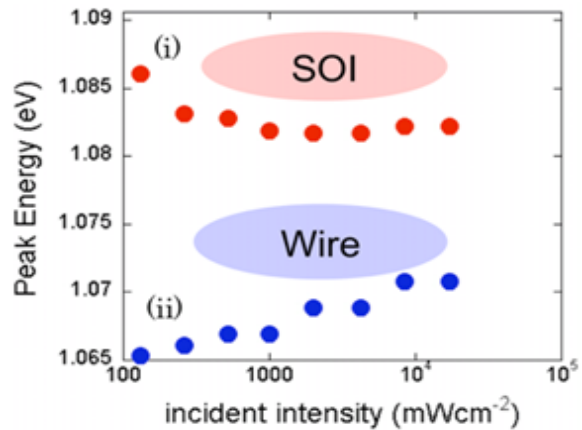


図 12 : (i) ナノレイヤおよび (ii) ナノワイヤ試料からの顕微フォトルミネッセンスエネルギーの光励起強度依存性

<論文>

1. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, S. Tomimoto, Y. Sakuma: "The enhanced binding energy for biexcitons in InAs quantum dots", *Appl. Phys. Lett.* 98, 061905 (2011).
2. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Exciton spin dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", *Phys. Stat. Sol. B* 248(2), 389 (2011).
3. Y. Masumoto, Y. Hirata, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Polarized photoluminescence from single wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Appl. Phys. Lett.* 98, 211902 (2011).
4. P. Jing, X. Yuan, W. Ji, M. Ikezawa, X. Liu, L. Zhang, J. Zhao, Y. Masumoto: "Efficient energy transfer from hole transporting materials to CdSe-core CdS/ZnCdS/ZnS-multishell quantum dots in type II aligned blend films", *Appl. Phys. Lett.* 99, 093106 (2011).
5. S. Tomimoto, K. Kawana, Y. Masumoto: "Coexistence of the fast and slow spin orientation processes of the doped electron in InP quantum dots", extended abstract (PASPS-VI 2010).
6. S. Tomimoto, S. Nozawa, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: "Optical electron spin orientation in Ga-doped and undoped ZnO films", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), proceedings.
7. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Reexamination of the atomic configurations of NN centers and observation of new infrared luminescence centers in GaP:N", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), proceedings.
8. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, Y. Sakuma: "Exciton Dephasing and Biexcitons in InAs Quantum Rhombic Disks", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), proceedings.
9. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Initialization of Electron Spins in One-Electron-Doped InP Quantum Dots", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), proceedings.
10. M. Ikezawa, Y. Sakuma, L. Zhang, Y. Sone, T. Mori, T. Hamano, M. Watanabe, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Single-photon generation from a nitrogen impurity center in GaAs", *Appl. Phys. Lett.* 100, 042106 (2012).
11. Y. Masumoto, K. Goto, S. Tomimoto, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Bimolecular interlayer scattering of electrons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", 16th International Conference on Luminescence (ICL2011), *J. Lumin.* (in press).
12. S. Tomimoto, K. Kawana, A. Murakami, Y. Masumoto: "Coherence of an electron spin in quantum dots generated by a resonant optical pulse with elliptic polarization", 16th International Conference on Luminescence (ICL2011), *J. Lumin.* (in press).
13. X. Yuan, J. Zhao, P. Jing, W. Zhang, H. Li, L. Zhang, X. Zhong, Y. Masumoto: "Size- and Composition-Dependent Energy Transfer from Charge Transporting Materials to ZnCuInS Quantum Dots", *J. Phys. Chem. C* 116, 11973 (2012).
14. S. Tomimoto, K. Kawana, A. Murakami, Y. Masumoto: "Influence of optical coherence on the electron spin in singly-charged InP quantum dots excited by resonant laser pulses", *Phys. Rev. B* 85, 235320 (2012).
15. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast electron transfer from PbSe quantum dots to TiO₂", *Appl. Phys. Lett.* 100, 252106 (2012).
16. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, S. Nomura: "Near-Field Optical Mapping of Quantum Hall Edge States", *Phys. Rev. Lett.* 107, 256803 (2011).
17. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, J. Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Tunneling Model in Charge-Trap-Type Nonvolatile Memory Cell", *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 04DD04 (2011).
18. 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: 「Si ナノワイヤー、ナノレイヤの発光と界面」, *IEICE Technical Report Vol. 111, No. 114, 35-39* (2011).

19. Y. Sakurai, K. Ohmori, K. Yamada, K. Shiraishi, K. Kakushima, H. Iwai, S. Nomura: "Photoluminescence Characterization of the Interface Properties of Si Nanolayers and Nanowires", ECS Transactions, 41, Solid State Topics (in press).
20. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, K. Makihara, M. Ikeda, S. Miyazaki, Y. Shigeta, T. Endoh: "Collective Tunneling Model between Two - Dimensional Electron Gas to Si - Nano Dot", AIP Conf. Proc. 1399, 295 (2011).
21. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Real - space mapping of compressible and incompressible strips by a near - field scanning optical microscope", AIP Conf. Proc. 1399, 603 (2011).
22. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama: "Dynamical correlation of fractionally charged excitons with a two - dimensional electron system", AIP Conf. Proc. 1399, 615 (2011).

<学位論文>

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文 (2012年3月)

1. 高木勇人: 「ポンププローブ過渡吸収測定法による PbSe, PbS 量子ドットの研究」
2. 張遼: 「Optical properties of the single nitrogen isoelectronic traps in III-V semiconductors (III-V 族半導体の窒素不純物による単一等電子トラップの光学的性質)」
3. 大古芳美: 「MoS₂ 薄膜の光伝導特性の研究」
4. 大滝健嗣: 「光伝導スイッチを用いた超短パルス時間分解測定」
5. 大野格: 「ゲート付き量子井戸のピエゾステージを用いた低温顕微発光マッピング」
6. 宮城浩一: 「ゲート付 GaAs-AlGaAs 非対称二重量子井戸の定常および時間分解発光分光」

<国際会議>

1. S. Tomimoto, K. Kawana, A. Murakami, Y. Masumoto: "Coherence of an electron spin in quantum dots generated by a resonant optical pulse with elliptic polarization", 16th International Conference on Luminescence (ICL2011) (Ann Arbor, USA, 2011.6).
2. Y. Masumoto, K. Goto, S. Tomimoto, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Bimolecular interlayer scattering of electrons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", 16th International Conference on Luminescence (ICL2011) (Ann Arbor, USA, 2011.6).
3. Y. Sakurai, K. Ohmori, K. Yamada, K. Kakushima, K. Iwai, K. Shiraishi, S. Nomura: "Photoluminescence of the electron-hole droplet phase in quantum confined Si structures", The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Tallahassee, USA, 2011.7).
4. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Ootuka, S. Nomura: "Imaging of edge states in a quantum Hall liquid by quasi-resonant near-field optical excitation", The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Tallahassee, USA, 2011.7).
5. K. Tsumura, M. Ohsugi, T. Hayashi, S. Nomura, E. Watanabe, D. Tsuya, H. Takayanagi: "Development of superconducting interference device based on graphene", 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijing, 2011.8).
6. S. Nomura, H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Imaging of Quantum Hall Edge States by Near-field Optical Microscopy", Quantum Nanostructures and Nanoelectronics 2011 (Tokyo, 2011.10).
7. K. Tsumura, M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, H. Takayanagi: "Fabrication and Transport Measurement of Graphene-based Superconducting Interference Device", Quantum Nanostructures and Nanoelectronics 2011 (Tokyo, 2011.10).

8. Y. Sakurai, K. Ohmori, K. Yamada, K. Shiraishi, K. Kakushima, H. Iwai, S. Nomura: "Photoluminescence Characterization of the Interface Properties of Si Nanolayers and Nanowires", the 220th ECS Meeting & Electrochemical Energy Summit in Boston (Boston, USA, 2011.10).
9. H. Kashiwaya, Y. Shibata, R. Ishiguro, S. Nomura, H. Takayanagi, S. Kashiwaya: "Fabrication of Weak-link NanoSQUIDS by FIB process", 24th International Symposium on Superconductivity, FD-11 (oral) (Tokyo, 2011.10).

<講演>

1. J. Sun, X. Wang, J. Zhao, Y. Masumoto: "Time-resolved photoluminescence in CuInS₂/ZnS core/shell quantum dots" 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
2. 高木勇人, 鈴木孝行, 舛本泰章: 「PbSe ナノクリスタルにおけるマルチエキシトン生成」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
3. 富本慎一, 川名啓介, 村上瑛, 舛本泰章: 「量子ドットにドーブされた電子の共鳴パルス光によるスピン偏極と緩和」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
4. 舛本泰章, 平田裕基, Mohan P., 福井孝志, 本久順一: 「単一ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光ルミネッセンス」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
5. 張遼, 森達哉, 濱野毅信, 池沢道男, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章: 「GaP:N 中の二軸異方性単一 NN ペアの磁気光学」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
6. 張遼, 池沢道男, 森達哉, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章: 「GaAs 中の窒素不純物発光中心に束縛された励起子の位相緩和時間」 第59回応用物理学関係連合講演会 (2012年3月)
7. 佐久間芳樹, 池沢道男, 森達哉, 張遼, 舛本泰章, 迫田和彰: 「MOCVD 法により窒素を δ ドープした GaAs からのエネルギーの揃った PL 輝線発光」 第59回応用物理学関係連合講演会 (2012年3月)
8. 張遼, 池沢道男, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章: 「GaAs:N 中の単一発光中心のフーリエ分光による発光均一幅の測定」 日本物理学会第67回年次大会 (2012年3月)
9. 鈴木孝行, 高木勇人, 海野晃, 舛本泰章, Diane Youker, David Watson: 「PbS 量子ドットの時間分解発光: 透明ナノ粒子への電荷移動」 日本物理学会第67回年次大会 (2012年3月)
10. 野村晋太郎: 「低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測」 新学術領域研究第5回シンポジウム, 宇治市 (2011年6月)
11. 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: 「Si ナノワイヤー、ナノレイヤーの発光と界面」 応用物理学会 Si テクノロジー研究会, 名古屋大学 (ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー) (2011年7月)
12. (招待講演) 野村晋太郎: 「二次元電子系の量子多体効果と光学応答」 最先端研究開発支援プログラム量子情報処理プロジェクト夏期研修会 2011, 京都市 (2011年8月)
13. 野村晋太郎: 「光パルス励起によるデバイスの応答特性測定」 CREST チーム内研究会 『ナノデバイスのピコ秒物理の解析による揺らぎ最小化設計指針の開発』, 東京 (2011年9月)
14. 津村公平, 大杉正樹, 林朋美, 渡辺英一郎, 津谷大樹, 野村晋太郎, 高柳英明: 「グラフェンを用いた超伝導量子干渉計の作製と輸送測定」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
15. 櫻井蓉子, 大毛利健治, 山田啓作, 白石賢二, 野村晋太郎: 「シリコンナノレイヤー中電子正孔液滴発光の膜厚依存性」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
16. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎: 「分数量子ホール領域の発光の微細構造 (2)」 日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
17. 野村晋太郎: 「二次元電子系バルクーエッジ間トンネリングの光学検出」 平成23年度東北大プロジェクト研究会, 仙台市 (2011年10月)

18. 野村晋太郎：「低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測」 新学術領域研究第6回シンポジウム，宇治市（2012年1月）
19. 山口真澄，野村晋太郎：「極低温での GaAs 量子井戸発光スペクトルの温度依存性の測定」 新学術領域研究第6回シンポジウム，宇治市（2012年1月）
20. 佐久間大輔，矢ヶ部恵弥，石黒亮輔，野村晋太郎，渡辺英一郎，津谷大樹，柴田憲治，平川一彦，高柳英明：「dc-SQUID による自己形成 InAs 量子ドット中の光励起電子スピン検出に向けた研究」第59回応用物理学関係連合講演会（2012年3月）
21. 松野美砂，石黒亮輔，柏谷裕美，柏谷聡，土屋翔吾，野村晋太郎，前野悦輝，高柳英明：“Measurement of a local magnet field by alumina tunnel junction SQUIDs for a small sample of p-wave superconductor Sr_2RuO_4 ” 第59回応用物理学関係連合講演会（2012年3月）
22. 柏谷裕美，柏谷聡，石黒亮輔，高柳英明，柴田祐輔，野村晋太郎：「微小 SQUID の開発」 第59回応用物理学関係連合講演会（2012年3月）
23. 大滝健嗣，大毛利健治，野村晋太郎：「光伝導スイッチを用いた超短パルス時間分解測定」 第59回応用物理学関係連合講演会（2012年3月）
24. 櫻井蓉子，角嶋邦之，大毛利健治，山田啓作，岩井洋，浅川潔，白石賢二，野村晋太郎：「Si ナノワイヤの発光測定」 第59回応用物理学関係連合講演会（2012年3月）
25. 山口真澄，野村晋太郎，田村浩之，赤崎達志：「ゲートつき GaAs 量子井戸の発光微細構造」日本物理学会第67回年次大会（2012年3月）
26. 野村晋太郎，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，平山祥郎：「分数量子ホール領域の発光微細構造の温度依存性」 日本物理学会第67回年次大会（2012年3月）
27. 櫻井蓉子，太野垣健，大毛利健治，山田啓作，金光義彦，白石賢二，野村晋太郎：「Si ナノレイヤーの発光寿命の膜厚依存性」 日本物理学会第67回年次大会（2012年3月）
28. 宮城浩一，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，野村晋太郎：「ゲート付き GaAs-AlGaAs 非対称二重量子井戸の磁場中発光寿命」 日本物理学会第67回年次大会（2012年3月）

<著書>

1. 舛本泰章：『物性物理学ハンドブック』（分担執筆）「8.3.2 光学的性質」朝倉書店，pp. 437-452 (2012).

IX-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	松田智行
大学院生	D3 柴田恭幸
	D3 大村彩子 (H21.6-)
	D2 五十嵐一泰
	D1 栗原佑太朗
	M2 伊藤 港
	M2 朱 徐皓
	B4 若梅一真
	B4 高地雅光
	B4 棚辺大輝
	B4 下野貴弘

【1】 高速充電・放電が可能なカラー電池材料の開発[1,7](守友、高地、栗原、松田)図1

シアノ錯体薄膜はリチウムイオン電池正極材料として、高い容量とサイクル特性を示すだけでなく、(1)色変化、(2)高速充電・放電といった既存材料にない特色を示す。特に、受電速度、放電速度に関しては 36 秒といった数字を示す。さらに、ナノサイズ化することにより、1秒といった驚異的な速度を示す。今後、我々は、関連材料を開発しナトリウムイオン電池の実現を目指す。この成果は、毎日新聞、日刊工業新聞、茨城新聞、で大きく取り上げられた。

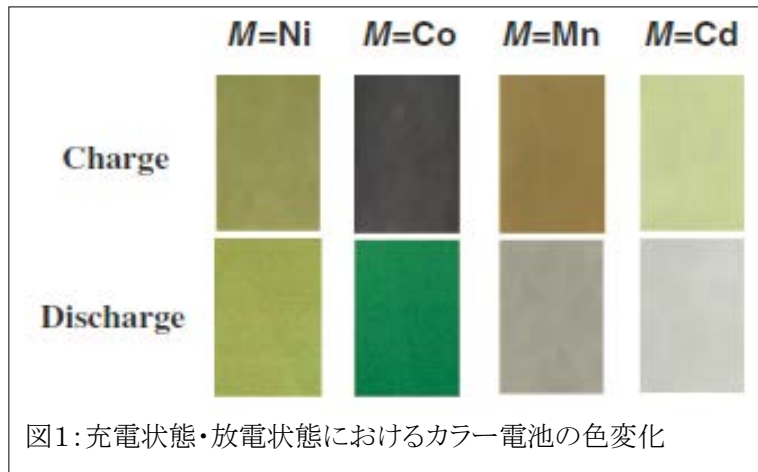
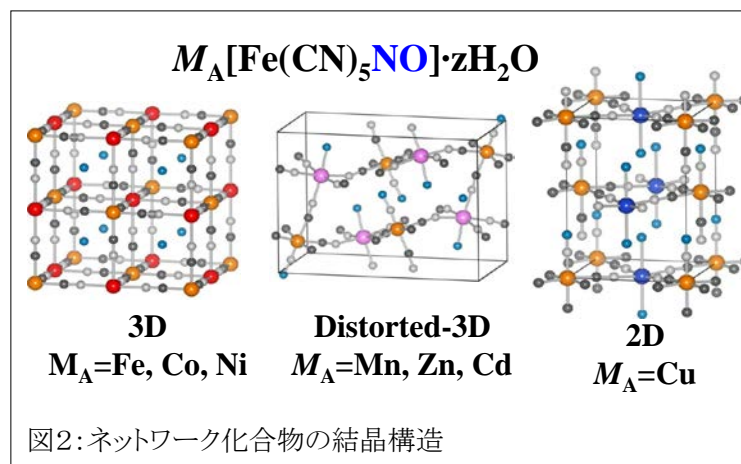


図1: 充電状態・放電状態におけるカラー電池の色変化

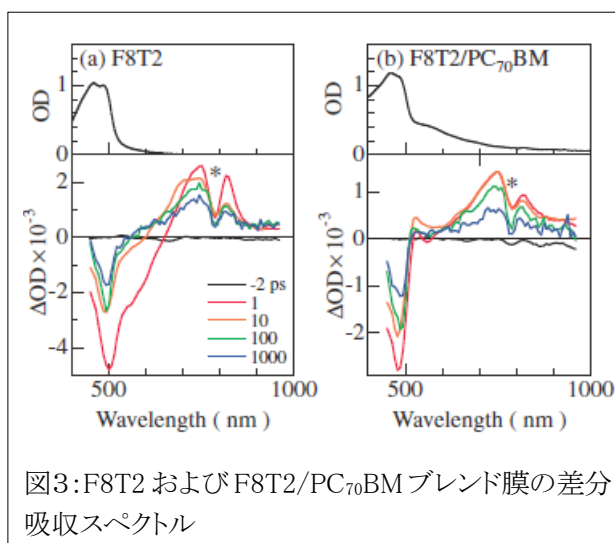
【2】 ネットワーク化合物の次元性制御と熱応答[2](守友、松田)図2

ヘキサシアノ鉄のシアノ基をニトロ基に置き換えることにより、三次元的なシアノ架橋ネットワークの次元性を制御した。化合物の異方的熱膨張係数が化合物の次元性ととも系統的に変化した。この論文では、高輝度放射光 X 線を用いて、構造の温度変化を詳細を報告している。



【3】 有機太陽電池材料の電荷生成ダイナミクスの解明[3] (米澤、伊藤、上岡、安田 (NIMS)、韓 (NIMS)、守友) 図3

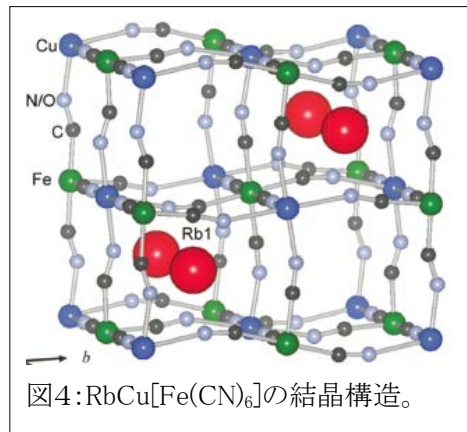
有機太陽電池は変換効率が 10%を超え、実用化の可能性が見え始めてきた。変換効率の上昇をけん引しているのは、新しい高分子化合物の合成である。我々は、こうした新しい材料に対して、主に、超高速分光により、その電荷生成ダイナミクスを系統的に研究している。その一例として、F8T2/PC₇₀BM ブレンド膜の結果を報告した。この材料では、光励起に伴い、励起子と電荷が同時に生成することが分かった。



【4】 Rb⁺の一次元配列[4] (松田、金 (JASRI)、守友) 図4

シアノ錯体薄は三次元的に配列したナノ空間を有する。このナノ空間にアルカリ金属を収容できる。アルカリ金属は電荷をもっているため、互いに避け合うように配列する。我々は、一連の化合物を合成して、アルカリ金属の配列を系統的に調べた。その結果、RbCu[Fe(CN)₆]では Rb⁺が一次元配列をすることを発見した。我々は、モデリング計算を行い、構造安定性を調べた。その結果、この特異な配列を安定化しているのが、ネットワーク格子のゆがみであることを突き止めた。

興味深いことは、CsCu[Fe(CN)₆]では、Cs⁺が三次元的な配列を示す。このように、RbとCsのイオン半径(または化学結合)の差が構造に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

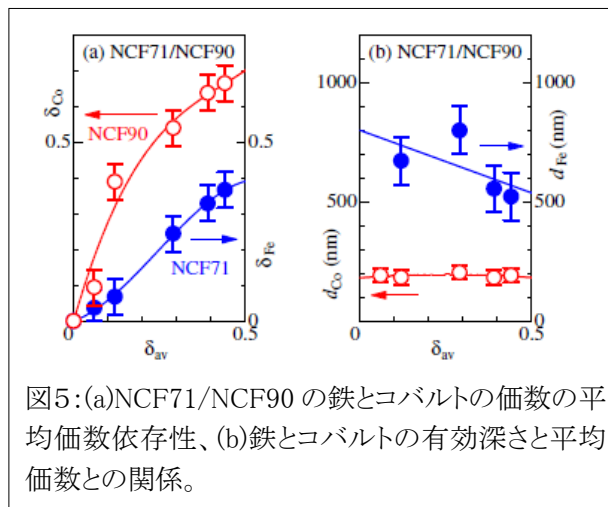


【5】 全固体イオン伝導素子の電子とイオン移動の同時測定[5] (柴田、上岡、守友)

我々のこれまでの研究により、シアノ錯体薄膜を物理的に接合し電圧を印加すると、薄膜間のイオン移動を誘起できることが分かっている。このイオン移動により高速エレクトロクロミズムや電圧誘起強磁性-常磁性スイッチを実現できる。本研究では、電子移動とイオン移動を同時測定し、イオン移動の機構解明を目指した。今回の実験結果とこれまで得られた実験結果を総合的に考慮し、『電子移動による電気的中性のやぶれを補償する形でイオン移動が起こる』と結論付けた。素子の中で起こっていることは、全固体リチウムイオン電池と同じである。違いは、(1)我々の素子は起電力が零に近いこと、と(2)シアノ錯体表面を終端している水分子層がイオン伝導部(電子絶縁体部)の役割を担っていること、である。

【6】 斜出射深さ分解 XAFS によるシアノ錯体エピタキシャル界面の酸化反応の研究[6] (大村、栗原、松田、谷田(JASRI)、宇留賀(JASRI)、守友) 図5

斜出射深さ分解 XAFS 分光法を用いると深さ方向の XAFS スペクトル情報を抽出することができる。我々は、シアノ錯体のエピタキシャル界面に適用し、薄膜の酸化に従い鉄とコバルトの価数がどのように変化するかを明らかにした。コバルトが酸化される NCF90 (厚さ 1 μm) の上に鉄が酸化される NCF71 (厚さ 200nm) をエピタキシャル成長させた。斜出射深さ分解 XAFS スペクトルを解析し、鉄とコバルトそれぞれに対する価数と有効深さを決定した。結果を図示する。興味深いのは、鉄の有効深さが、NCF71/NCF90 の界面より深いことである。これは、界面で自発的な電子移動が起こり、鉄とコバルトの価数分布が再構築されることを示している。



【7】 シアノ錯体薄膜のエピタキシャル成長法の開発 [8] (栗原、守友) 図6

電界析出法を改良してシアノ錯体薄膜のエピタキシャル成長法を開発した。この方法を利用すると、(1)製膜しにくい膜の製膜、(2)表面保護、(3)界面を利用した機能創成、が可能になると考えている。実際、エピ成長を利用して製膜しにくい膜の製膜に成功しており、シアノ錯体電池材料の容量の増大に成功している。

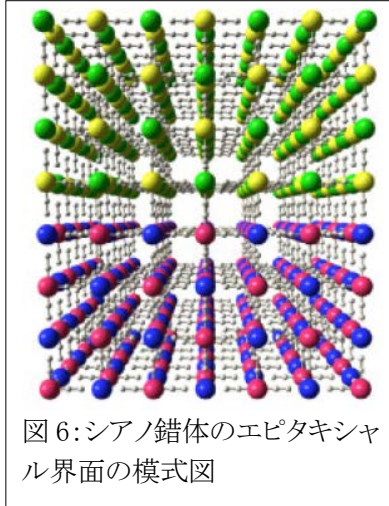


図6:シアノ錯体のエピタキシャル界面の模式図

【8】 シアノ錯体薄膜の成長プロセスの研究[9] (守友、伊藤、柴田)

Co-Feシアノ錯体の成長プロセスをAFMとSEMを用いて詳細に調べた。初期では三次元成長、後期では一次元成長を起こすことを明らかにした。こうした製膜プロセスの解明は、膜形態の制御指針を与える。

【9】 Co-Fe シアノ錯体の光誘起相転移の空間ダイナミクス解明[10] (伊藤、上岡、守友) 図7

顕微分光法により、Co-Fe シアノ錯体の光誘起相転移の時間・空間ダイナミクスを詳細に調べた。得られた動画を解析し、各地点における光誘起相転移時間とその時の高スピン濃度のヒストグラムを作成した。その結果、光誘起相転移が各地点での高スピン濃度に無関係に同時におこることが明らかとなった。これは、空間の一か所で起こった光誘起相転移が、試料全体に伝搬するためであると考えられる。実際、光誘起相転移が起こった領域では、3%程度のマクロな線膨張が確認されている。この線膨張が光誘起相転移伝搬の源であると考えられる。

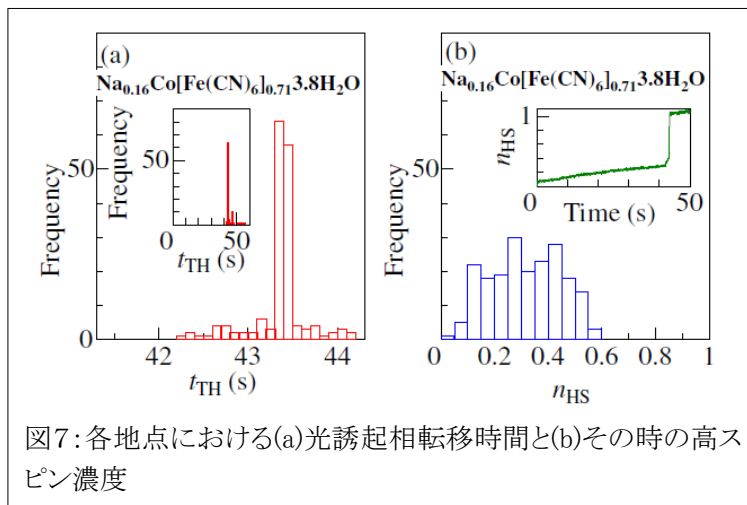
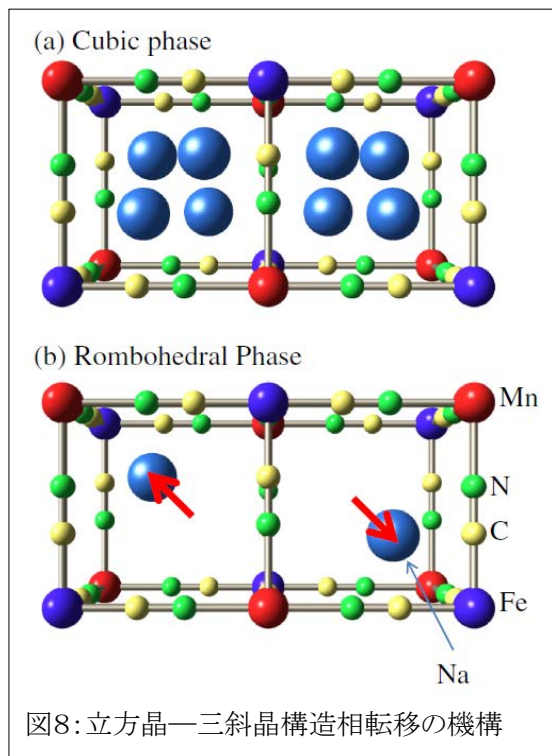


図7:各地点における(a)光誘起相転移時間と(b)その時の高スピン濃度

【10】Mn-Fe シアノ錯体の構造相図[11,12] (守友、松田、栗原、金(JASRI)) 図8

放射光 X 線粉末構造解析より、Mn-Fe シアノ錯体の構造相図を決定した。特に、この構造相図で観測される立方結—三斜晶構造相転移の機構を明らかにするために、立法晶相の精密構造解析を行った。その結果、ナノ空間内の Na^+ が中心ではなく 4 面体位置に変位していることが明らかとなった。高温の立法晶相では、 Na^+ はこの4つの位置をダイナミックに占有している。温度が低下すると、クーロン相互作用により Na^+ サイトが反強誘電的に秩序化すると考えられる。この秩序化が三斜晶歪みを誘起する。つまり、立方結—三斜晶構造相転移は Na^+ サイトの秩序無秩序転移と見なすことができる。



【11】Cr-Cr シアノ錯体のフェリ磁性転移温度の上昇[13] (守友、若梅、栗原、金(JASRI))

室温における電圧誘起磁性スイッチを実現するために、Cr-Cr シアノ錯体の磁気転移温度 (=240K) をさらに上昇させる必要がある。平均場描像では、 $\text{Cr}(\text{CN})_6$ の欠損量を減らせば、磁気転移温度が上昇すると期待される。実際、 $\text{Cr}(\text{CN})_6$ の欠損量を減らし、磁気転移温度を 263K まで上昇させることに成功した。

【12】熱整流効果[14.17] (小林、澤木(早大)、勝藤(早大)、守友、寺崎(名大)) 図9

わずかな温度差でも動作する熱整流素子を実現するために、構造相転移を示す MnV_2O_4 を用いた熱整流素子を作製し、その熱整流係数を評価した。熱整流素子は熱伝導率の温度依存性の異なる材料を接合することで得られる。 MnV_2O_4 を用いることにより 57 K においてわずか 2 K の温度差で、順方向と逆方向の熱流の比である熱整流係数は 1.14 となった。この結果は数値計算とよく一致した。

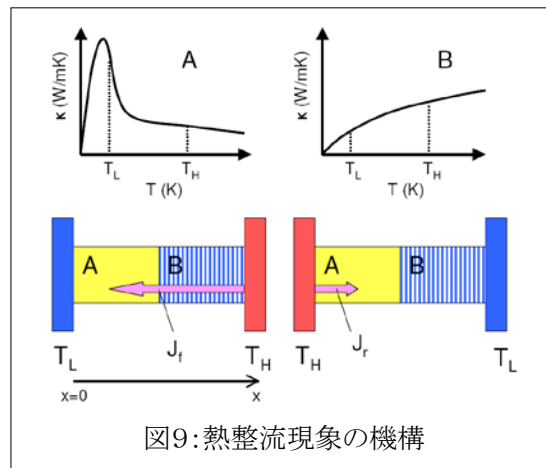


図9:熱整流現象の機構

【13】低次元物質のゼーベック係数[15,18] (小林、守友、林(早大)、寺崎(名大)、中尾(CROSS)、中尾(KEK)、村上(KEK)、Karppinen(Aalto Univ.)、山内(Aalto Univ.)、Pautrat(CRISMAT)) 図10

低次元電子系の状態密度を利用することで大きなゼーベック係数が期待される。擬1次元伝導体 $\text{SrNbO}_{3.4}$ 、 $\text{K}_2\text{Ru}_8\text{O}_{16}$ 単結晶の熱電変換特性を精密に計測することで、このゼーベック係数の増大を検証するとともに熱電変換材料としての可能性を探索した。 $\text{SrNbO}_{3.4}$ は100 K以上でb軸方向にのみ顕著なゼーベック係数の増大を示した。放射光 X 線構造解析により NbO_6 八面体がこの温度で大きく変形しており、第1原理計算との比較から、この増大は低次元電子状態と相関があることを明らかにした。

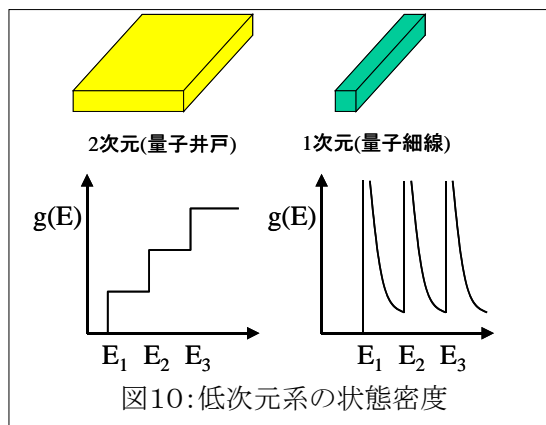


図10:低次元系の状態密度

【14】熱ホール効果[16] (小林、守友、小泉(早大)) 図11

熱ホール効果はホール効果の熱版であり、磁場によって熱流が曲がる現象である。環境エネルギー問題を考える上で、熱流それ自体の制御が必要となる。ビスマス単結晶の熱ホール係数を測定し、この材料が高移動度半導体 HgSe と同程度の最大級の熱ホール係数を示すことが明らかとなった。ホール移動度、熱伝導率の測定によりこの大きな熱ホール係数の起源が主にビスマスの大きなホール移動度にあることがわかった。

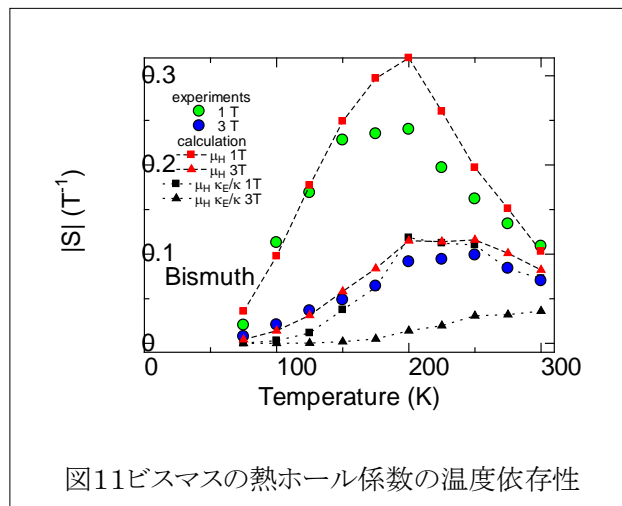


図11ビスマスの熱ホール係数の温度依存性

【15】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。

【16】KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成23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おこなった。主な事業内容は、以下のとおりである。

(1) 研究会の開催

- ◇ 第2回つくばイノベーションフォーラム【11/18-19@筑波大学】二次電池と燃料電池の科学と技術
- ◇ 第一回連携研究会【10/1@筑波大学】

(2) 筑波大学—KEK 共同研究

筑波大学とKEKの職員による共同研究を公募した。

<論文>

1. Y. Moritomo, M. Takachi, Y. Jurihara, and T. Matsuda, "Thin film electrode of Prussian blue analogue with rapid Li^+ intercalation", Appl. Phys. Express, 5, 041801 (2012).
2. T. Matsuda, J. E. Kim and Y. Moritomo, "Network dimensionalities and thermal expansion properties of metal nitroprussides", RSC Advances, 2011, 1, 1716–1720
3. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Charge-transfer state and charge dynamics in poly(9,90-dioctylfluorene-co-bithiophene) and [6,6]-phenyl C_{70} -butyric acid methyl ester blend film", Appl. Phys. Express, 4, 122601 (2011).
4. T. Matsuda, J. E. Kim, and Y. Moritomo, "Control of the alkali cation alignment in Prussian blue framework" Dalton Trans., Advance Article (2012), DOI: 10.1039/c2dt12296k

5. T. Shibata, H. Kamioka, and Y. Moritomo, "Simultaneous Measurement of Electron and Ion Transfer in All-Solid Ion-Transfer Device Made of Transition Metal Cyanide Films", *Jpn. J. Appl. Phys* 50 124101 (2011)
6. A. Omura, Y. Kurihara, T. Matsuda, H. Tanida, T. Uruga, and Y. Moritomo, "Cation Extraction Process in Bilayer Cyanide Film as Investigated by Depth-Resolved X-ray Absorption Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys* 50 125802 (2011)
7. T. Matsuda and Y. Moritomo, "Thin film electrode of Prussian blue analogue for Li-ion battery", *Appl. Phys. Express*, 4, 047101 (2011).
8. Y. Kurihara and Y. Moritomo, "Fabrication of epitaxial interface between transition metal cyanides", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 060210 (2011)
9. Y. Moritomo, M. Ito, T. Shibata, "Three-to-one dimensional crossover of growth mode in transition metal cyanide film", *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 085602 (2011).
10. M. Ito, H. Kamioka and Y. Moritomo, "Lattice-mediated propagation of photoinduced phase transition in Co-Fe cyanide", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 065002 (2011).
11. Y. Moritomo, T. Matsuda, Y. Kurihara, and J. E. Kim, "Cubic-rhombohedral structural phase transition in $\text{Ma}_{1.32}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.83} \cdot 3.6\text{H}_2\text{O}$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 074608 (2011).
12. Y. Moritomo, T. Matsuda, Y. Kurihara, and J. E. Kim, "Structural Phase Diagram of Mn-Fe Cyanide against Cation Concentration", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 10360 (2011).
13. Y. Moritomo, K. Wakaume, Y. Kurihara, J. E. Kim, "Magnetic properties of valence-controlled $\text{Na}_{3y-2}\text{Cr}[\text{Cr}(\text{CN})_6]_y\text{zH}_2\text{O}$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 07716 (2011).
14. D. Sawaki, W. Kobayashi, Y. Moritomo, and I. Terasaki, "thermal rectification in bulk materials with asymmetric shape", *Appl. Phys. Lett.* 98, 081915 (2011).
15. W. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Matsushita, H. Yamamoto, I. Terasaki, A. Nakao, H. Nakao, T. Murakami, Y. Moritomo, H. Yamauchi, and M. Karppinen, "Anisotropic thermoelectric properties of quasi-one-dimensional $\text{SrNbO}_{3.4}$ ($d \sim 0.03$)," *Phys. Rev. B* 84, 085118 (2011).
16. W. Kobayashi, Y. Koizumi, and Y. Moritomo, "Large thermal Hall coefficient in bismuth" *Appl. Phys. Lett.* 100, 011903 (2012).
17. W. Kobayashi, D. Sawaki, T. Omura, T. Katsufuji, Y. Moritomo, and I. Terasaki, "Thermal rectification in the vicinity of a structural phase transition" *Appl. Phys. Express* 5, 027302 (2012).
18. A. Pautrat, and W. Kobayashi, "Magnetoresistance, noise properties and the Koshino-Taylor effect in the quasi-1D oxide KRu_4O_8 " *Europhys. Lett.* 97, 67003 (2012).
19. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, M. Hirano, L. Skuja, and H. Hosono, "Exchange between interstitial oxygen molecules and network oxygen atoms in amorphous SiO_2 studied by ^{18}O isotope labeling and infrared photoluminescence spectroscopy", *Phys. Rev. B* 83, 064202 (2011).

<著書>

1. 守友 浩、松田智行「ネットワークポリマー化合物を用いた薄膜型電極の開発」*ファインケミカル*、40,5(2011)
2. 守友 浩、栗原佑太郎「ネットワークポリマー型電池材料の容量増大に向けて」*機能材料*、31,35 (2011)
3. 守友 浩 「リチウムイオン電池のための三次元ポリマー正極材料—カラー電池への展開—」*MATERIAL*、11,16 (2011)

<学位論文>

1. 学位論文 大村彩子、「Spectroscopic Investigation of Redox Process in Prussian Blue Analogues (プルシアンブルー類似体における酸化還元過程の分光学的研究)」
2. 修士論文 伊藤 港、「シアノ錯体とD-A分子結合系における格子・電荷ダイナミクスの分光学的研究」
3. 修士論文 朱 徐皓、「ポリマー型正極材料のリチウムイオンインターカレーションの研究」

<講演>

1. 守友 浩、上岡隼人「フェムト秒時間分解分光による有機太陽電池薄膜の初期過程の研究」第一回つくばグリーンイノベーションフォーラム@筑波、2011年11月8日
2. 守友 浩「ポリマー型正極材料とその展開」第二回つくばグリーンイノベーションフォーラム@筑波、2011年11月18-19日
3. 守友 浩「三次元ポリマー型正極材料とその先にあるもの」第二回学振研究開発「有機物の電子物性」@阪大、2012年2月18日
4. 守友 浩「ポリマー型正極材料とその先にあるもの」物性研研究会「エネルギー変換の物質科学」@柏、2012年1月14-16日
5. 守友 浩「ポリマー型正極材料とその展開」第五回東北大 G-COE 研究会@東北大、2012年1月20-22日
6. 守友 浩「ポリマー型正極材料と界面状態の計測」PF 研究会「磁性薄膜・多層膜を極める」@PF、2011年10月14-18日
7. Y. Moritomo, "Network polymer as cathode material of Li-ion secondary battery", IC of New Science and related materials with nano spaces@sendai, 2011/11/24-26
8. Y. Moritomo, "Li intercalation and structural properties of nanoporous Prussian blue", Workshop on Nanostructured Materials for Clean Energy, 2011/8/11, AIST Tsukuba
9. Y. Moritomo, "Li intercalation and structure of "Prussian blue framework", ISIC16 @Sec-Ustupky, チェコ、2011年5月23-26日
10. 小林航(筑波大数理)「遷移金属酸化物へのリチウムドーピングによる物性制御」第一回連携研究会@筑波、:2011年10月1日
11. 守友 浩「ポリマー型リチウムイオン正極材料の中性子構造解析」第一回連携研究会@筑波、:2011年10月1日
12. 上岡隼人(筑波大数理)「シアノ錯体の過渡的電子相の時間分解 XAFS 分光」第一回連携研究会@筑波、:2011年10月1日

13. 米澤宏平, 伊藤港, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元, 守友浩「F8T2/PC70BM の電荷ダイナミクス」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
14. 伊藤港, 米澤宏平, 上岡隼人, 山本洋平, 福島孝典, 相田卓三, 守友浩「分子接合されたHBC-C₆₀の電荷ダイナミクス」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
15. 松田智行, 守友浩「Mn-Fe シアノ錯体の構造と電子状態の Li 濃度依存性」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
16. 朱徐皓, 栗原佑太朗, 松田智行, 守友浩「Mn-Fe 薄膜電極の充放電特性の膜厚依存性」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
17. 高地雅光, 栗原佑太朗, 松田智行, 守友浩「ポリマー型材料を用いたカラー電池」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
18. 栗原佑太朗, 高地雅光, 守友浩「Mn-Fe 薄膜電極の Li イオン拡散係数」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
19. 小林航, 中尾朗子, 中尾裕則, 村上洋一, 守友浩, 寺崎一郎, 山内尚雄, Maarit Karppinen「擬 1 次元伝導体 SrNbO_{3.4}の異方的熱電変換特性」日本物理学会 2011 年次大会@大阪、2012 年 3 月 24—27 日
20. 伊藤港, 上岡隼人^A, 守友浩「シアノ錯体薄膜における光誘起相転移の時空間ダイナミクス」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
21. 上岡隼人, 柴田恭幸, 栗原佑太朗, 守友浩, 野澤俊介, 佐藤篤志, 足立伸一「シアノ錯体の過渡的電子相の時間分解 XAFS 分」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
22. 柴田恭幸, 上岡隼人, 守友浩「全固体シアノ錯体素子の電子移動とイオン移動の同時測定」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
23. 松田智行, 守友浩「プルシアンブルー類似体薄膜電極によるリチウムイオン電池特性」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
24. 大村彩子, 栗原佑太朗, 松田智行, 宇留賀朋哉, 守友浩「プルシアンブルー型シアノ錯体二層膜の深さ分解 XAFS 分光」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
25. 栗原佑太朗, 松田智行, 金延恩, 守友浩「Mn-Fe シアノ錯体への Li 導入」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
26. 松田智行, 栗原佑太朗, 金延恩, 守友浩「シアノ架橋型金属錯体における立方晶 菱面体晶構造相転移」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
27. 小林航, 澤木大輔, 大村翼, 勝藤拓郎, 守友浩, 寺崎一郎「MnV₂O₄/La_{1.98}Nd_{0.02}CuO₄接合系における熱整流現象」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011 年 9 月 21—24 日
28. 米澤宏平, 伊藤 港, 上岡隼人, 安田 剛, 韓 礼元, 守友 浩「BHJ 型有機太陽電池薄膜の超高速分光と電荷ダイナミクス」応用物理学会 2011 年度春季大会@東京、2012 年 3 月 15 日-18 日
29. 松田智行, 守友浩「プルシアンブルー類似体電気化学薄膜の正極特性」第52回電池討論会@東京、2011 年 10 月 17—20 日
30. 栗原佑太朗, 松田智行, 守友浩「Mn-Fe シアノ錯体薄膜の充放電特性—膜厚及びカチオン濃度依存性—」第52回電池討論会@東京、2011 年 10 月 17—20 日
31. W. Kobayashi, “Thermal rectification and large thermal Hall coefficient in correlated electron systems”, International Discussion Meeting on Thermoelectrics and Related Functional Materials, 2011/6/24, Helsinki

32. W. Kobayashi, Y. Koizumi, and Y. Moritomo, "Large thermal Hall coefficient in bismuth", The 30th International Conference on Thermoelectrics (ICT2011), 2011/7/17, Traverse City
33. 小林航、小泉雄飛、守友浩、“ビスマス単結晶の熱ホール効果”、日本熱電学会第八回学術講演会(TSJ2011)、2011/8/8、北海道大学
34. H. Nakao, T. Murata, D. Bizen, Y. Murakami, K. Ohoyama, K. Yamada, S. Ishiwata, W. Kobayashi, and I. Terasaki, "Orbital ordering of Co³⁺ intermediate-spin state in RT ferromagnet Sr₃YCo₄O_{10.5}", XXII Congress and General Assembly & International Union of Crystallography (IUCr2011), 2011/8, Madrid
35. W. Kobayashi, "Thermoelectric properties of pseudo-one-dimensional oxides", JST Japan-France joint meeting, 2011/11/9, Nagoya
36. J. Okamoto, H. Nakao, W. Kobayashi, S. Ishiwata, D. J. Huang, I. Terasaki, and Y. Murakami, "Resonant soft X-ray scattering and spectroscopic study of Co³⁺ intermediate-spin state in RT ferromagnet Sr₃YCo₄O_{10.5}", 物構研シンポジウム'11, 2011/12/6, エポカルつくば
37. W. Kobayashi, "Oxide thermal rectifier", Japan-Finland March Meeting, 2012/3/14, Nagoya

ポスター発表(主要なもの)

1. 米澤宏平, 伊藤港, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元(Liyuan Han), 守友浩「BHJ型有機太陽電池薄膜の超高速分光と電荷ダイナミクス」日本物理学会 2011 分科会@富山、2011年9月21—24日
2. Y. Morimoto, M. Ito, and H. Kamioka, "Lattice-mediated propagation of PIPT in Co-Fe cyanide", PIPT2011@ブロッツワフ、2011年6月29日-7月2日
3. Y. Kurihara「Diffusion Coefficients of Li-ion in Polymer-type Cathode Material」2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日
4. T. Matsuda「Lithiation/delithiation property of Mn-Fe Prussian blue thin film」2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日
5. M. Takachi 「Colored cathode materials for Li+ secondary battery」2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日
6. K. Wakaume「Magnetic properties of Na_xCr[Cr(CN)₆]_yzH₂O (0.67 ≤ y ≤ 0.77)」2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日
7. M. Ito 「Charge dynamics in a molecularly-connected donor-acceptor system」.2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日
8. K. Yonezawa 「Charge dynamics in F8T2/PC70BM blend film」2011 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'11)@つくば 2011年12月15~17日

<受賞>

<特許>

1. PCT/JP2012/002391, 守友 浩、小林航、「酸化還元反応を利用した熱電変換方法および熱電変換素子」、筑波大学、2012/4/5 (特願 2011-088683、特願 2011-220060)
2. PCT/JP2012/001393, 守友 浩、松田智行、「バインダーフリー電池および電池用バインダーフリー正極部材」、筑波大学、2012/3/1 (優先権主張出願)
3. 特願 2011-088683, 守友 浩、小林航、「酸化還元反応を利用した熱電変換方法および熱電変換素子」筑波大学、2011/4/12 (優先権主張出願)
4. 特願 2012-011269、守友 浩、大村彩子、「セシウムイオンの除去方法およびセシウムイオンの除去装置」筑波大学、2012/1/23
5. 特願 2012-013469、守友 浩、松田智行、「ナトリウムイオン電池」筑波大学、2012/1/25
6. 特願 2011-265920, 守友 浩、松田智行、「バインダーフリーナリチウムイオンカラー電池」筑波大学、2011/12/5
7. 特願 2011-220060, 守友 浩、小林航、「酸化還元反応を利用した熱電変換方法および熱電変換素子」筑波大学、2011/10/4
8. 特願 2011-060503 守友 浩、松田智行、「バインダーフリー電池および電池用のバインダーフリー正極材料」筑波大学、2011/3/18

<その他>

1. 新聞記事

リチウム電池に新材料

筑波大が開発
充放電効率 8 倍

筑波大の研究者は、従来のリチウム電池の正極材料に、ナリチウムイオンを効果的に受け止めることができる新材料を開発した。この新材料は、従来の正極材料に比べて、充放電効率が約 8 倍向上し、電池の寿命が大幅に延びると見込まれている。また、この新材料は、環境に優しい材料であり、大規模な生産が可能である。筑波大は、この新材料の応用範囲を拡大し、高性能なリチウム電池の実用化を目指すとしている。

筑波大 リチウムイオン電池の正極材 最速 1 秒で放電

筑波大の研究者は、従来のリチウムイオン電池の正極材料に、ナリチウムイオンを効果的に受け止めることができる新材料を開発した。この新材料は、従来の正極材料に比べて、充放電効率が約 8 倍向上し、電池の寿命が大幅に延びると見込まれている。また、この新材料は、環境に優しい材料であり、大規模な生産が可能である。筑波大は、この新材料の応用範囲を拡大し、高性能なリチウム電池の実用化を目指すとしている。

毎日新聞 2012/3/15

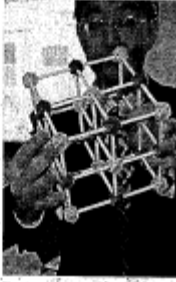
日刊工業新聞 2012/3/15

リチウムイオン電池

1秒で充放電

電気の蓄積に不可欠なリチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。

PCや携帯、応用可能



リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。

リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。

リチウムイオン電池の充放電速度を従来の10分の1にまで短縮する技術を開発した。

IX-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助教	森下將史、斎藤政通
大学院生	友利ひかり（数理物質科学研究科博士課程1年）、 豊田行紀、樋川和哉（同修士課程2年） 幸坂健史、貫井洋佑、松下慎平（同修士課程1年）
卒業研究	稲垣匠哉、大賀和人、軽部大雅、仁平慎太郎（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ソスコピックな導体系の電気伝導、微小ジョセフソン接合を利用した局所磁気計測および吸着ヘリウム薄膜の研究を行っている。

学際物質科学研究センター（TIMS）の改組に伴い大塚は2011年3月末で担当から離れた。一方物質創成分野の担当として神田が再びTIMS構成メンバーに加わった。斎藤政通助教はアルバッククライオ株式会社職を得、2012年3月末をもって退職した。なお、前年度まで在籍した後藤秀徳研究員は2011年3月末日付けで岡山大学研究員に異動している。

【1】単分子伝導の研究：C₆₀分子架橋の電気伝導（幸坂、稲垣、大塚）

機械破断接合（MBJ）用ステージを組み込んだクライオスタットを使ってフラレンC₆₀の単分子超伝導架橋の電気伝導の研究をすすめている。Sn-MBJ及びAl-C₆₀MBJの微分コンダクタンス曲線に超伝導ギャップに由来するものとは異なる明瞭な構造を見つけた。この構造が生じる電圧はコンダクタンスの平方根に比例すること、また構造の低電圧側で存在する過剰電流が高電圧側では消失することなどから、ジュール熱による局所的な超伝導・常伝導転移であることがわかった。単分子接合系における過熱（over heating）効果についてはこれまで接合の安定性やテレグラフ雑音をプローブとした研究がなされてきたが、これらはいずれも格子系温度であった。今回の過熱は電子系温度をプローブするものであり、ナノ接合におけるエネルギー輸送の研究に新しい手段を与える。このほか、有限温度における超伝導ポイントコンタクトIV特性の実験と数値計算をおこなった。また、ゲート電極をもつ単分子接合実現のための新しい実験方法の開発にも取り組んだ。

【2】グラフェンの電気伝導

（1）グラフェンの歪み効果（友利、軽部、神田）

グラフェンでは、格子に歪みがあるとゲージ場が生じ、歪みが空間的に非一様な場合には実効的に磁場が印加されたのと同じ効果があらわれることが知られている。理論では、歪みの空間分布・大きさを制御することによって、エネルギーギャップや1次元細線の形成、電子の閉じこめなどが可能であることが予測され、新しいタイプのグラフェンエレクトロニクスが提唱されているが、実験ではこれまで、グラフェンの歪みを制御する有効な方法がなかった。我々は、グラフェンと基板の間に制御性良く電子線レジストのナノ構造を挿入することによってグラフェン内の歪みの大きさや位置を制御する方法を開発した。

歪みの確認は、物質材料研究機構ナノテクノロジー融合ステーションのレーザーラマン顕微鏡を用いた顕微ラマン分光と、グラフェン上に歪み検出用のマーカーを配置することによって行った。両者を組み合わせることで、歪み量とラマン信号の変調を対応づけた。この結果から、ラマン分光による歪み量の定量的な評価が可能になった。

また、歪みを導入したグラフェンの電気伝導測定を行い、格子歪みによる電気伝導の変調を示唆するデータを得た。現在、解析を進めている。

(2) 非接触トップゲートを用いた多層グラフェンの上面/下面移動度の評価 (貫井、神田)

グラフェンは $20 \text{ 万 cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度を実現できる電子材料として注目を集めているが、通常良く用いられる Si/SiO₂ 基板上に置かれたグラフェンでは移動度は $1 \text{ 万 cm}^2/\text{Vs}$ 前後まで低下する。移動度低下の原因としては、グラフェン下面での基板との接触、グラフェン上面にあるレジスト等の付着物・吸着分子の影響等が挙げられるが、いずれが主要因であるかは自明ではない。我々は、グラフェン上面と下面からの影響を分離して評価することを目的として、Si/SiO₂ 基板上に形成された多層グラフェン素子に、非接触トップゲートを形成し、室温真空中においてコンダクタンスのトップゲート電圧、バックゲート電圧依存性を測定した。これより、簡易なモデルを用いて上面/下面移動度を評価した結果、十分に厚い試料では、常に上面移動度が下面移動度よりも 3 倍程度大きくなることを見出した。これは SiO₂ がグラフェンの移動度を低下させる主要因であることを示唆している。

(3) 金属電極に接続したグラフェンの電界効果 (仁平、友利、神田)

グラフェンでは、低エネルギーにおける線形のエネルギー分散に起因して、様々な「相対論的」効果の発現が期待されている。グラフェンを中間常伝導体とするジョセフソン接合における相対論的効果の観測には、グラフェン中を電子が無散乱 (バリステック) に伝導することが必要である。これまで行われてきた研究では相対論的効果は観測されていないが、その主な原因はバリステック伝導が実現していないからであると考えられている。一方、我々は昨年度までの研究で、極めて短いグラフェンジョセフソン接合の作製方法を開発し、長さ 50 nm のアルミニウム/グラフェン/アルミニウム接合においてバリステックなジョセフソン電流の観測に成功した。さらに、短い接合ではゲート電界効果が弱まり、特にジョセフソン電流のゲート電圧依存性は完全に消失することを見出した。その原因の一つとして挙げられるのは、仕事関数の違いによる電極からグラフェンへの電荷注入である。本年度は電極からの電荷注入効果を検証するために、単一グラフェン上に長さの異なるアルミニウム/グラフェン/アルミニウム接合を多数作製し、そのゲート電界効果を比較した。その結果、接合長が短くなるほど、ゲート電界効果が弱まる傾向を観測し、電極からの電荷注入の影響を支持する結果が得られた。

【 4 】 広帯域トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体磁化過程の研究 (大賀、斎藤、大塚)

分子磁性体は高スピン基底の多核錯体であり、強い一軸異方性をもつ一方、分子間の磁氣的相互作用は弱い。このため個々の分子を孤立した高スピン磁性体として近似することができ、巨視的量子トンネル現象を調べる上で重要な研究対象となっている。我々が開発したトンネル接合型マイクロ SQUID は臨界電流が非常に小さいため、測定に伴う発熱が従来型のマイクロ SQUID の 10^{-7} 倍以下と極めて小さく、極低温での量子トンネル現象を調べる上で理想的なプローブである。しかし、ジョセフソン接合が高抵抗であるため応答速度が限られ、より高速な磁場掃引速度でトンネル現象の本質に迫るためには、より広帯域で動作するトンネル接合型マイクロ SQUID の開発が必要であった。

今回、これまでより低い接合抵抗のトンネル接合型マイクロ SQUID を作製し、 20 kHz 以上の高速な応答が可能な磁力計としての動作を確認することができた。このマイクロ SQUID を用い、 60 mK の極低温で Mn7 分子磁性体の磁化測定を行った。Mn7 はスピン $19/2$ の分子磁性体であるが、これまでに 500 mK までしか実験が行われておらず、極低温域での磁化の詳細な検証が必要となっていた。実験の結果、観測された微分磁化率のピーク位置を、スピンハミルトニアンにおける印加磁場方向と結晶容易軸との相対角度を考慮することで説明することができた。なお、本研究では数理物質科学研究科物質創成先端化学専攻大塩寛紀教授の協力をいただいた。

【 5 】 スピンホール効果の磁氣的観測 (松下、斎藤、大塚)

金属中でのスピンホール効果はスピン注入などによる電氣的測定により確認されている。しかし、この測定は間接的な検証であるため、実験結果の定量的な一致が見られないなど依然として不明な点が多い。スピンホール効果によりスピン流が生じると、試料エッジ付近にスピンが蓄積し、エッジスピン磁化として磁氣的測定で検出される可能性が考えられる。一方で、スピンは(電荷と異なり)保存量ではないため、スピンの流れと蓄積の対応関係は自明ではなく、エッジスピン磁化の有無についてもさまざまな議論があり未解決の問題である。そこで、本研究ではトンネル接合型マイクロ SQUID を用い、エッジスピン磁化の有無を磁氣的信号として定量的に検証することを目指し実験を行った。

エッジスピン磁化を捕捉するための試料は、Pt 細線のエッジ上に長さ 100 μm 、幅 2 μm の非常に細長いループを持ったトンネル接合型マイクロ SQUID を配置した構造となっている。実験の結果、Pt 細線への印加電流にほぼ比例する磁束を観測することができた。電流から直接生じる磁場の分布を考慮した結果、さらに 12%程度の余剰な磁束を捕捉していることが分かった。この余剰磁束はエッジスピンに由来していると考えられ、エッジからスピン拡散長である 10 nm の領域にスピン蓄積しているとした場合、スピン偏極率は 60 μA で 0.7%程度と、従来の電氣的測定から予測される 10^{-6} 程度と比較し非常に大きな値であることが分かった。磁氣的測定ではスピン注入に伴うスピン抵抗の影響が無いため、エッジスピンの本質に迫る知見であると期待されるが、今後のより詳細な実験による検証が必要と考えられる。本研究は試料作製にあたり山口尚秀氏(物質・材料研究機構)の協力をいただいた。

【 6 】 鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ のトンネル分光 (樋川、斎藤、大塚)

鉄系超伝導体は Fe-Pn からなる正方格子層に広がる Fe3d バンドが伝導を担うとともに、そのフェルミ面は複数の電子及び正孔ポケットからなる。理論によれば、超伝導発現機構はスピン揺らぎを媒介とした相互作用であり、特異なバンド構造のため、超伝導状態は複数のオーダーパラメータを持ち、かつ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。しかし、実験的な検証は未だ十分ではない。このことを調べるために小野田研究室の協力を得て、鉄系超伝導体の中で最も単純な構造を有し 14K の臨界温度を持つ鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ に対して Au あるいは Pt 探針を用いたポイントコンタクトスペクトロスコピーを液体ヘリウム温度で行った。

微分コンダクタンス曲線には低バイアス電圧領域にピークがあり、温度依存性を調べることでこれが超伝導に起因することを確認した。低バイアスでのピーク構造には複数の肩があり、これはこの物質が複数の超伝導ギャップを持つことを示唆している。コンダクタンスのピーク構造を Blonder-Tinkham-Klapwijk 理論に準拠して解析した結果、ギャップパラメータの出現頻度ヒストグラムに 0.7meV と 1.4meV、2.6meV にピークが確認された。さらにこれらの値であらわされる 3つの肩のある微分コンダクタンス特性をもつ接合も確認された。これまでに FeSeTe については、角度分解光電子分光や STM を使った超伝導ギャップの報告があり、1.4meV と 2.6meV については類似の数値が報告されている。しかし、0.7meV のギャップはこれまで報告なく、今回新しく見つけたものである。

【 7 】 グラファイト上吸着ヘリウム 4 薄膜の固化 (森下)

バルクな固体ヘリウムには基底状態としての空孔子(零点空孔子)が存在し、これがバンド構造をとることにより固体でありながら超流動性を示すことが Andreev と Lifshitz により理論予測され、長年その探索が行われてきた。零点空孔子の存在には否定的な結果しか得られていなかったが、近年、力学的応答観測により、固体の超流動性の可能性が Kim と Chan により指摘され、非常に活発な研究、議論が再燃している。

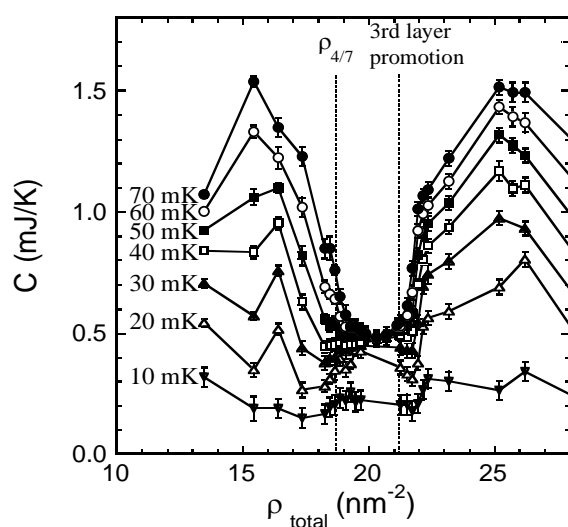
グラファイト上に吸着したヘリウム薄膜は理想的な 2次元系のモデル物質と考えられている。ヘリウム 3(^3He)の場合、吸着第 2 原子層は、1 原子層目に対し 4/7 の面密度をもつ整合固相(以下、“4/7 相”と呼ぶ)を形成し、3次元系では否定された零点空孔子が存在することを強く示唆する結果が得られて

いる。直接的な観測はないが、ヘリウム4 (^4He)も 4/7 相に固化し、零点空孔子が存在すると考えられ、2次元版の超流動固体の可能性も期待される。実際、超流動性を示唆する観測が為されている。その一方、 ^4He は4/7相には固化しないとの理論計算が最近報告され、議論になっている。

^4He 薄膜の状態を確定することを目的として、少量の ^3He を含む ^4He 薄膜の熱容量測定を行った。これは、純粋な ^4He は低温でフォノンに由来する微少な熱容量しか持たず、その状態に関する知見を得ることが困難であるが、少量の ^3He は2次元面内を自由に運動していると大きな熱容量を持つのに対し、局在すると熱容量はほぼ消失することを利用して状態を知ることができるためである。

図1に ^3He の面密度 (ρ) を 0.2 nm^{-2} に保ったまま ^4He の面密度を増していった際の熱容量の等温曲線を示す。横軸は合計の面密度を示す。4/7相に相当する面密度 19 nm^{-2} に近づくと、高温域での熱容量は減少し、3層目が生成する 21 nm^{-2} 近傍で回復している。これは一見、4/7相に固化していることを示している。しかし、低温での熱容量はほとんど変化せず、固化では説明できない。 ^3He が ^4He に先だって3層目に上っていることも考えられるが、 $19 \sim 21 \text{ nm}^{-2}$ の広い面密度領域で熱容量はほとんど変化しておらず、この可能性も否定される。観測結果は ^3He - ^4He 薄膜が ^3He の濃度の異なる2相に相分離し、 ^3He の濃い ^3He 濃厚相のみ固化し、 ^3He 希薄相は流体相のままであるとして良く説明される。 ^3He 希薄相が固化しないことは、純粋な ^4He 薄膜が4/7相には固化しないことを強く示唆する。これは、上記理論予測と一致する結果である。

^4He 薄膜で4/7相近傍の面密度で超流動を示唆する観測は、2次元固体の超流動に由来するものでは無さそうである。しかしながら、超流動性が出現する数100 mKよりずっと高い1 K近傍に熱容量のピークがあり、何らかの秩序状態に陥っていると考えられる。固相でも超流動相でも無いこの状態が如何なるものであるのか、残された問題である。



<学位論文>

- ・ 豊田行紀：グラフェン/強磁性接合における電気伝導特性 (数理物質科学研究科、修士論文、2012年3月)
- ・ 樋川和哉：鉄系超伝導体 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ のポイントコンタクトスペクトロスコピー (数理物質科学研究科、修士論文、2012年3月)
- ・ 稲垣匠哉：有限温度における多重アンドレーエフ反射 (物理学類 卒業論文、2012年3月)
- ・ 大賀和人：広帯域トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体研究 (物理学類 卒業論文、2012年3月)

- ・ 軽部大雅: グラフェンの歪み導入による物性制御に向けた歪み評価法の開発 (物理学類 卒業論文、2012年3月)
- ・ 仁平慎太郎: 金属電極に接続したグラフェンの電界効果 (物理学類 卒業論文、2012年3月)

<論文>

1. M. Morishita: "Surface Observation and Magnetization Measurements of Grafoil Substrate", *J. Low Temp. Phys.*, 162, 638-644 (2011).
2. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura, Near-Field Optical Mapping of Quantum Hall Edge States, *Phys. Rev. Lett.* 107, 256803 (2011).
3. Hikari Tomori, Akinobu Kanda, Hidenori Goto, Youiti Ootuka, Kazuhito Tsukagoshi, Satoshi Moriyama, Eiichiro Watanabe, Daiju Tsuya, Introducing Nonuniform Strain to Graphene Using Dielectric Nanopillars, *Appl. Phys. Express* 4, 075102 (2011).
4. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope, *AIP Conference Proceedings* 1399 pp. 603-604 (2011).
5. H. Miyazaki, M. V. Lee, S.-L. Lee, H. Hiura, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Observation of Tunneling Current in Semiconducting Graphene p-n Junctions, *J. Phys. Soc. Jpn.* 81, 014708 (2012) (7 pages) .

<解説>

1. Akinobu Kanda, Experimental approaches to graphene electron transport for device applications, in "Physics and Chemistry of Graphene: Nanographene to Graphene" (edited by T. Enoki), Chapter 3, Pan Stanford Publishing, in press. (87 pages)
2. K. Tsukagoshi, H. Miyazaki, S.-L. Li, A. Kumatani, H. Hiura, A. Kanda, Gate-Voltage Modulation in Graphene, in "Graphene and its Fascinating Attributes" (edited by S. K. Pati, T. Enoki, & C. N. R. Rao), Chapter 11, World Scientific Publishing (2012). (ISBN 978-981-4329-35-4) .
3. 神田晶申, 塚越一仁, 磁気特性, 「炭素学」 13章 6.5節 (pp. 376 - 380) (田中一義、東原秀和、篠原久典 編), 化学同人 (ISBN 9784759814118) 2011年10月15日。
4. 神田晶申, 電子輸送, 「カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック」 12章 2-2節 (pp. 315-317), (フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会編), コロナ社 (ISBN978-4-339-06621-0) 2011年9月12日。
5. 神田晶申, グラフェンの磁性とスピントロニクス応用, 第49回応用物理学会スクールテキスト「グラフェンの基礎から応用まで」、応用物理学会 (ISBN978-4-86348-199-2) 2011年8月30日。
6. 神田晶申, グラフェンの電気伝導の実験とデバイス応用の可能性, 2011年数学・物理学・情報科学の研究交流シンポジウム報告書, pp. 53-63, 奈良女子大学大学院人間文化研究科複合現象科学専攻, 2012年3月。

<講演>

国際会議

1. H. Tomori, H. Goto, Y. Toyota, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, and A. Kanda, Ballistic graphene Josephson junctions, Graphene Week 2011, Obergurg (Austria), Apr. 24 - 29, 2011.
2. H. Tomori, A. Kanda, H. Goto, Y. Toyota, Y. Nukui, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, Fabrication of graphene devices with designed strain, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), Tallahassee (USA), July 25-29, 2011.
3. H. Tomori, A. Kanda, H. Goto, Y. Toyota, Y. Nukui, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, Fabrication and transport measurement of ballistic graphene Josephson junctions, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), Tallahassee (USA), July 25-29,

2011.

4. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka: Observation of magnetization steps of single-molecule magnet by tunnel junction micro-SQUID, 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6), 2011. 7. 31-8. 5
5. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka: Development of Tunnel Junction Micro-SQUID Magnetometer for Investigation of Single-Molecule Magnets, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011. 8. 10-17.
6. M. Morishita, "Solidification of Second Atomic Layer of ^4He Film Adsorbed on Graphite", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Beijing, August 15, 2011)
7. H. Miyazaki, M. Lee, S. -L. Li, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Electric field induced p-n tunnel junction in bilayer graphene, The 37th leading conference in Europe for Micro- and Nano Engineering (MNE2011), Berlin, Germany, September 19 - 23, 2011.
8. Y. Nukui, H. Tomori, H. Goto, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, and A. Kanda, Evaluation of Mobilities at the Top and Bottom Surfaces of Multilayer Graphene Placed on a SiO₂ Substrate, International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Oct. 3-4, 2011.
9. H. Tomori, A. Kanda, Y. Nukui, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, S. Moriyama, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Hayashi and H. Yoshioka, Introducing designed nonuniform strain to graphene using dielectric nanopillars: sample fabrication, characterization and transport measurement, Recent Progress in Graphene Research (RPGR2011), Suwon (Korea), Oct. 3-6, 2011.
10. H. Tomori, A. Kanda, H. Goto, Y. Nukui, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi and H. Yoshioka, Fabrication and transport measurement of ballistic graphene Josephson junctions, Recent Progress in Graphene Research (RPGR2011), Suwon (Korea), Oct. 3-6, 2011.
11. Y. Nukui, H. Tomori, H. Karube, S. Nihei, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, and A. Kanda, Mobilities at the Top and Bottom Surfaces of Multilayer Graphene Placed on a SiO₂ Substrate, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN 2011), Kaanapali (USA), Dec. 4-9, 2011.
12. A. Kanda, H. Tomori, H. Goto, Y. Nukui, Y. Toyota, S. Nihei, H. Karube, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi and H. Yoshioka, Observability of relativistic Josephson effects in graphene, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN 2011), Kaanapali (USA), Dec. 4-9, 2011.
13. A. Kanda, H. Tomori, H. Goto, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, and H. Yoshioka, Introducing strain in graphene, Graphene Week 2011, Obergurgl (Austria), Apr. 24 - 29, 2011.
14. Y. Nukui, H. Tomori, H. Goto, Y. i Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, and A. Kanda, Mobility Difference in Top and Bottom Surfaces of Multilayer Graphene Placed on Silicon Dioxide, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, Sep. 29, 2011.
15. H. Tomori, H. Goto, Y. Nukui, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, S. Moriyama, E. Watanabe, D. Tsuya, A. Kanda, Introducing Nonuniform Strain to Graphene: Toward Strain Engineering, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, Sep. 29, 2011.
16. H. Miyazaki, M. V. Lee, S. -L. Li, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Electron tunneling in bilayer graphene p-n junction controlled by gate electric field, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Nagoya, Sep. 29, 2011.
17. H. Tomori, Y. Nukui, Y. Toyota, H. Karube, S. Nihei, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi and H. Yoshioka, A. Kanda, Introducing designed local strain to graphene using dielectric nanostructures: sample fabrication, characterization and transport measurement, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN 2011), Kaanapali (USA), Dec. 4-9, 2011.
18. H. Tomori, A. Kanda, Y. Nukui, Y. Toyota, H. Karube, S. Nihei, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, Introducing designed local strain to graphene using dielectric nanostructures, American Physical Society March Meeting 2012, Boston, Feb. 27 - Mar. 2, 2012.
19. A. Kanda, H. Tomori, Y. Nukui, Y. Toyota, H. Karube, S. Nihei, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, Electron transport measurement of graphene under one-dimensional local strain, American Physical Society March Meeting 2012, Boston, Feb. 27 - Mar. 2, 2012.

国内会議

1. 友利 ひかり, 後藤 秀徳, 豊田 行紀, 大塚 洋一, 神田 晶申, 塚越 一仁, 森山 悟士, 渡辺 英一郎, 津谷 大樹, グラフェンへの局所歪みの導入と電気伝導測定: グラフェンのバンドギャップエンジニアリングを目指して, 飯綱・サイエンスサマー道場, 長野県飯綱高原「ホテルアルカディア」, 2011年8月17日~19日.
2. (依頼講演) 神田晶申, グラフェンの磁性とスピントロニクス応用, 第49回応用物理学会スクール「グラフェンの基礎から応用まで」, 山形大学, 2011年8月30日.
3. 友利ひかり, 後藤秀徳, 豊田行紀, 大塚洋一, 塚越一仁, 森山悟士, 渡辺英一郎, 津谷大樹, 神田晶申, バンドギャップ形成を目指したグラフェンへの非一様歪みの導入方法の開発, 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 2011年8月29日-9月2日.
4. 貫井洋佑, 後藤秀徳, 友利ひかり, 豊田行紀, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申, SiO₂上に置かれた多層グラフェンの上面移動度と下面移動度の評価, 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 2011年8月29日-9月2日.
5. 森下将史, 「2次元量子固体ヘリウム3におけるフラストレートした量子スピン系」, 物理学セミナー (筑波大学, 2011年9月14日).
6. 神田晶申, 単層グラフェンにおける超伝導近接効果の実験の現状と今後の研究予定, 新学術領域「トポロジカル量子現象」第7回集中連携研究会「奇周波数クーパ対」, 名古屋大学, 2011年9月8~10日
7. 神田晶申, グラフェンでできた超伝導/強磁性/超伝導接合における磁性と超伝導の競合, 新学術領域「トポロジカル量子現象」公募研究キックオフミーティング, カナルパークホテル富山, 2011年9月20日
8. (招待講演) 神田晶申, グラフェンにおけるジョセフソン電流, 日本物理学会2011年秋季大会シンポジウム「多彩な表面系における電子輸送現象」, 富山大学, 2011年9月22日.
9. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: トンネル接合型マイクロ SQUID による Fe8 クラスターの磁化測定 日本物理学会2011年秋季大会, 富山大学, 2011年9月21-24日
10. 幸坂健史, 浦野敬太, 斎藤政通, 大塚洋一: 超伝導原子ポイントコンタクトの高バイアス電圧域における非線形コンダクタンス 日本物理学会2011年秋季大会, 富山大学, 2011年9月21-24日
11. 樋川和哉, 斎藤政通, 坪川雅, 小野田雅重, 大塚洋一: FeSe_{1-x}Te_x 破断接合の電気伝導 日本物理学会2011年秋季大会, 富山大学, 2011年9月21-24日
12. 友利ひかり, 後藤秀徳, 豊田行紀, 大塚洋一, 塚越一仁, 森山悟士, 渡辺英一郎, 津谷大樹, 神田晶申, 非一様歪みのあるグラフェンの形成と電気伝導測定, 日本物理学会2011年秋季大会, 富山大学, 2011年9月21-24日.
13. 貫井洋佑, 後藤秀徳, 友利ひかり, 豊田行紀, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申, 非接触トッピングを用いた多層グラフェンの上面/下面移動度の評価, 日本物理学会2011年秋季大会, 富山大学, 2011年9月21-24日.
14. 森下将史, 「グラファイト上吸着 ³He-⁴He 薄膜の固化」, 日本物理学会2011年秋季大会 (富山大学, 2011年9月23日).
15. (依頼講演) 神田晶申, 友利ひかり, 後藤秀徳, 豊田行紀, 貫井洋佑, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生, グラフェンの超伝導近接効果, 研究会「グラフェン・ナノ構造の物理」, 秋田大学, 2011年11月12日.
16. (依頼講演) 友利ひかり, 神田晶申, 後藤秀徳, 豊田行紀, 貫井洋佑, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生, グラフェンの歪み効果, 研究会「グラフェン・ナノ構造の物理」, 秋田大学, 2011年11月12日.
17. (依頼講演) 神田晶申, グラフェンの電気伝導の実験とデバイス応用の可能性, 「2011年度 数学・物理学・情報科学の研究交流シンポジウム」, 奈良女子大学, 2011年12月3日.
18. 神田晶申, 友利ひかり, 仁平慎太郎, 軽部大雅, 貫井洋佑, 豊田行紀, 大塚洋一, グラフェン接合系におけるゲート電界効果, 新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第2回領域研究会, 岡山大学, 2011年12月17日~19日.
19. 森下将史, “Does the 4/7 phase exist in ⁴He Film Adsorbed on Graphite?”, 物性研短期研究会「量子凝縮系における defects と topology」 (東京大学物性研究所, 2012年1月5日)
20. 友利ひかり, 後藤秀徳, 豊田行紀, 貫井洋佑, 軽部大雅, 仁平慎太郎, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生, 神田晶申, 局所歪みのあるグラフェンの電気伝導測定, 日本物理学会第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年

3月24日～27日(24pSB-4).

21. 樋川和哉, 斎藤政通, 坪川雅, 小野田雅重, 大塚洋一: 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日本物理学会第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年3月24-27日
22. 斎藤政通, 松下慎平, 大賀和人, 山口尚秀, 大塚洋一: スピンホール効果における蓄積スピンの磁氣的検出, 日本物理学会第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年3月24-27日

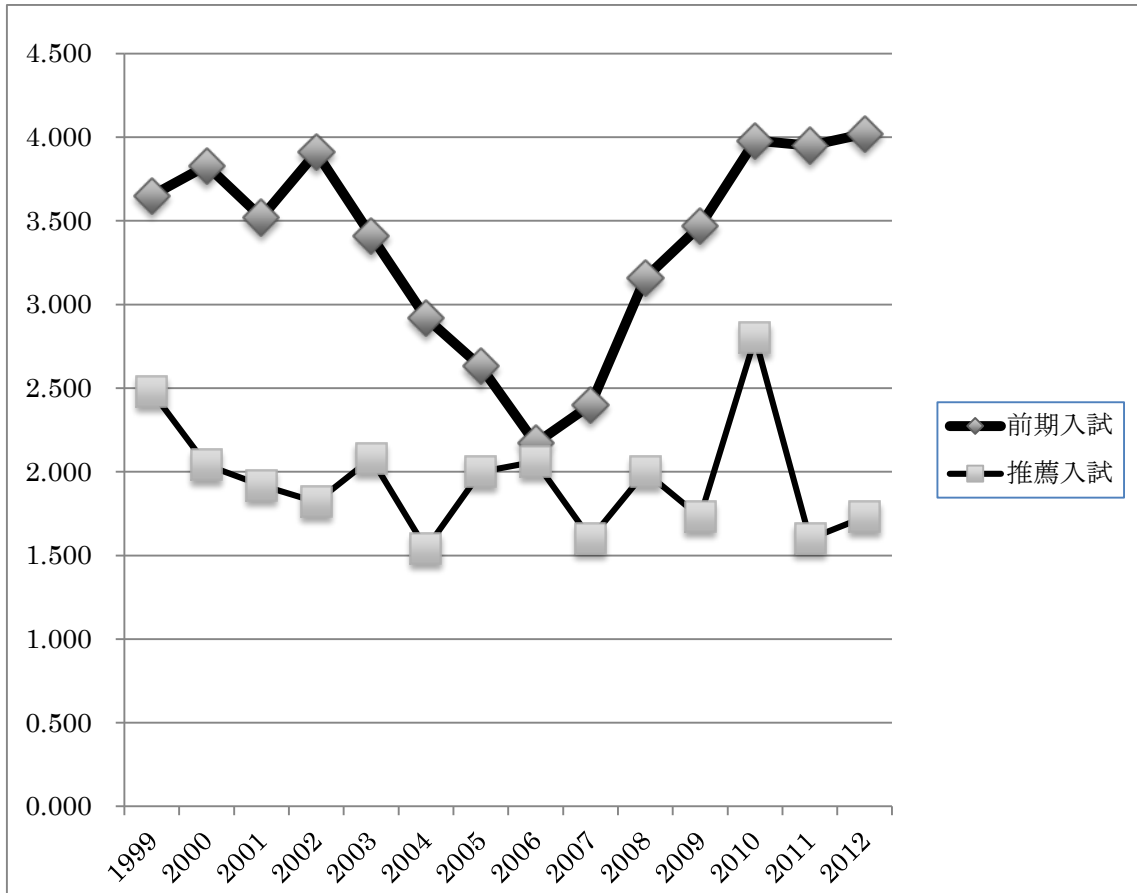
XI 物理教育および物理教育の研究

【1】物理教育（初貝安弘）

本年平成23年度は、筑波大学開学以来の特徴であった入学時に専門を特定しない形の自然学類が発展的に改組し、物理学類としての学生を受け入れることになり早5年目である。伴って、物理学類所属の65名が物理学類として第2期の卒業研究として研究室に配属され、3月には物理学類としての初の卒業生61名を送り出した。自然学類に関しては卒業研究に1名配属され、1名が卒業した。物理学類卒業生61名の進路は55名が大学院進学、就職は4名（民間企業3、教員1）、2名が進学準備等となっている。

物理学類の教育に関しては、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。この数年行っている学生による主体的学習活動を目標とする課題探究実習は正式科目として設置され、本年も有志の教員を中心に実施された。これに関しては、カリキュラム委員会にて、今後の展開の方法等を審議しているところである。また、教員、学生双方の意見に基づいて効率的な演習の形態を模索してきたが、基本的な科目に関しては講義と演習の一体化する方針が決定され、年時進行にて、講義と演習の改革を進めている。具体的には物理学類1年次の物理学A,Bに関しては本年度から一体化した形で講義と演習を実施しており学生教員ともに前向きに評価する意見を聞くことができた。また、来年度からはこれも又筑波大学開学以来の特徴であった3学期制を2学期制に変更することが決定されており、そのための準備も行っているところである。

物理学類の現状は、上記の卒論生65名の他1年生67名、2年生71名、3年生86名の構成である。本年度の入学試験に関しては、時期の早い順に、編入試験（志望者15名、合格者2名内1名2年次編入）、2学期推薦入試（志望なし）、AC（アドミッションセンター）入試（志望6名合格者2名）、オリンピック特別入試（志望者1名、合格者1名）、推薦入試（志望者26名、合格者15名）、2月期の前期入試（志望者173名、合格者46名）を行った。3月の後期入試は行っていない。以下の図に、この数年の前期入試、推薦入試の推移をグラフに示す。2007年度に自然学類から物理学類に改組して以来、前期試験に関しては物理学類の倍率は増加の一途となっており、特にこの3年間は続けてほぼ4倍という高い倍率を保っており、物理学類の人气が安定して高いことを裏付けている。



【2】体験学習（受川史彦）

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23年度は、震災による夏期節電の影響で、例年とは異なり8月26日（金）に実施した。65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2件を開講し、午後は、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	
9:50-10:10	物理学類説明，実験内容説明，アンケート	
10:20-11:00	【講義1】 素粒子とはどのようなものか	（受川史彦）
11:10-11:50	【講義2】 相対性理論と宇宙の進化	（梅村雅之）
11:50-12:50	昼食	
12:50-13:00	実験の組み分け	
13:00-15:30	【物理実験】	
	① 演算増幅器	（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	（池沢道男）
15:35-16:00	質疑応答・在学生との懇談	
16:05-16:20	修了式	（受川史彦）
16:30-17:10	プラズマセンター見学	（平田真史）
17:20-18:00	計算科学研究センター見学	（矢部あずさ・吉戸智明）

（ ）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（受川史彦）

平成 23 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. 教育の改善：学生が主体となった授業評価アンケートを実施し、その結果をもとに学生と教員の意見交換を行い、問題点等の把握・分析と今後の改善に向けての方策を議論した。

2. 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。平成 23 年度には、計 18 名の学生が、「パソコンで物理現象を計算してみよう」、「光学望遠鏡で宇宙を観測する」、「ナノへの入り口」、「プラズマでダイヤモンドを作ろう」について実習を行った。

(イ) 物理学の教育では、歴史的に、講義による知識の吸収と、学生が自ら手を動かして問題を解き、知識をさらに深く理解するための演習形式の学習が取り入れられてきた。それぞれの形式での教育の有効性をさらに向上させる目的で、両者を統合した形の授業を平成 23 年度から年次進行で実施している。

(ウ) 平成 25 年度からの 2 学期制移行にそなえ、開講方式の変更や、科目の再編などの検討を行った。

(エ) 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。

(オ) 「理数学生応援プロジェクト」に専任教員を派遣している。

(カ) 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。

3. 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 A」「基礎力学 A」「電磁気学 A」「基礎電磁気学 A」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23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	1	6	2	1	3	13	3	2	{ 1 }	[6]	18 { 1 } [6]
宇宙理論	4	2	2	0	0	8	7	0	{ 0 }	[5]	15 { 0 } [5]
原子核理論	4	3	2	1	0	10	1	0	{ 0 }	[7]	11 { 0 } [7]
非平衡統計物理	1	1	1	0	3	6	2	0	{ 0 }	[6]	8 { 0 } [6]
量子物性理論	0	1	0	1	0	2	2	0	{ 0 }	[1]	4 { 0 } [1]
ナノ量子物性	1	1	0	0	0	2	0	0	{ 0 }	[2]	2 { 0 } [2]
ソフトマター理論	0	1	1	1	0	3	2	0	{ 0 }	[3]	5 { 0 } [3]
半導体ナノ物性 (創)	1	3	2	0	1	7	4	0	{ 1 }	[2]	11 { 1 } [2]
ナノ構造物性 (創)	1	0	0	0	1	2	2	0	{ 0 }	[2]	4 { 0 } [2]
生命物理	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[0]	0 { 0 } [0]
素粒子実験	5	7	2	2	2	18	0	0	{ 0 }	[11]	18 { 0 } [11]
宇宙観測	5	4	3	0	2	14	6	0	{ 0 }	[10]	20 { 0 } [10]
原子核高エネ	4	5	1	2	3	15	2	0	{ 1 }	[8]	17 { 1 } [8]
原子核低エネ	4	4	1	1	2	12	4	0	{ 0 }	[6]	16 { 0 } [6]
磁性物性	4	4	0	0	0	8	2	0	{ 0 }	[3]	10 { 0 } [3]
半導体物性 (創)	4	6	1	1	1	13	4	0	{ 1 }	[8]	17 { 1 } [8]
強相関物性	4	4	1	1	2	12	4	0	{ 2 }	[5]	16 { 2 } [5]
表面物性	0	0	0	0	0	0	0	0	{ 0 }	[0]	0 { 0 } [0]
低温物性	3	2	1	0	0	6	4	0	{ 0 }	[6]	10 { 0 } [6]
プラズマ	5	11	1	1	1	19	14	0	{ 0 }	[9]	33 { 0 } [9]
ナノ材料先端科 学 (創)	0	1	0	0	0	1	0	0	{ 0 }	[0]	1 { 0 } [0]
合計	51	66	21	12	21	171	63	2	{ 6 }	[99]	236 { 6 } [99]
(創)	6	10	3	1	3	23	10	0	{ 2 }	[11]	33 { 2 } [11]

*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) 姜 志始 [青木 慎也]
Computational analyses of electronic structures in catalytic reactions of biological macromolecules
(生体高分子の触媒反応における電子構造の計算科学的解析)
- 2) 西村 建徳 [青木 慎也]
Steady state responses of biochemical reaction networks
(定常状態における細胞応答)
- 3) 須藤 裕司 [受川 史彦]
Search for the Standard Model Higgs Boson in $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ Channel in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions
(1.96TeV陽子反陽子衝突における $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ 崩壊過程を用いた標準模型ヒッグス粒子の探索)
- 4) 武政 健一 [金 信弘]
Measurement of the Spin Correlation in the Top Quark Pair Production using the Dilepton Events in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions
(1.96TeV陽子反陽子衝突におけるダイレプトン事象を用いたトップクォーク対生成事象のスピン偏極度相関の測定)
- 5) 扇野 光俊 [中井 直正]
Study of Interstellar Ammonia and Star Formation in the Orion Molecular Clouds
(オリオン分子雲のアンモニアと星形成に関する研究)
- 6) 森口 哲朗 [小沢 顕]
Density Distributions for Two Neutron Halo Nuclei ^{11}Li and ^{14}Be deduced by the Reaction Cross Section Measurements
(反応断面積実験によって導出した2中性子ハロー核 ^{11}Li と ^{14}Be の密度分布)
- 7) 大村 彩子 [守友 浩]
Spectroscopic Investigation of Redox Process in Prussian Blue Analogues
(プルシアンブルー類似体における酸化還元過程の分光学的研究)

【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) アバウレ エリック クワビナ チエ [岡田 晋]
First-principle study of atomic and electronic structures of 3C-SiC(111)/Si(110) interfaces
(第一原理計算による3C-SiC(111)/Si(110) 界面の原子構造と電子状態)

2) 高田 幸宏〔白石 賢二〕

Theoretical Study of Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Nano-Structures
(ナノ構造体中における多電子波束ダイナミクスの理論的研究)

【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) 趙 栄貴〔藏増 嘉伸〕

格子ゲージ理論におけるオーバーラップ・フェルミオンの局所性について

2) 仲木 竜〔青木 慎也〕

Development and application of a novel algorithm for identification of functional patterns in high-dimensional DNA sequence spaces using probability distribution functions

(確率密度関数を用いた DNA 塩基配列空間における機能的配列パターン同定アルゴリズムの開発とその応用)

3) 山田 真徳〔石塚 成人〕

Lattice QCD による di- Ω state の存在可能性の探求

4) 遠藤 圭介〔梅村 雅之〕

銀河中心ブラックホールからの輻射力による星間ダストガス雲の力学進化

5) 田中 賢〔梅村 雅之〕

GPU を用いた輻射輸送方程式数値シミュレーション
輻射輸送コード CART の開発

6) 杉山 健〔矢花 一浩〕

Maxwell+TDDFT マルチスケールシミュレーションによる高強度パルス光伝搬の記述

7) 関澤 一之〔矢花 一浩〕

Time-Dependent Mean Field Theory for Multi-Nucleon Transfer Reaction
(時間依存平均場理論による多核子移行反応の研究)

8) 藤縄 直也〔初貝 安弘〕

超伝導における反転対称性の研究

9) 尾澤 岬〔宮崎 州正〕

A Unified Picture of Glass and Jamming Transition
(ガラス転移とジャミング転移の統一的理解)

10) 根元 太郎〔谷口 伸彦〕

非平衡近藤領域における量子ドット系のスピン制御と電荷揺らぎ

11) 小池 憲一郎〔受川 史彦〕

Z \rightarrow $\mu\mu$ 事象を用いた LHC-ATLAS 内部飛跡検出器における横方向運動量測定精度の研究

- 12) 新庄 康平〔受川 史彦〕
高エネルギー荷電粒子検出用 SOI ピクセル検出器の開発研究
- 13) 高橋 優〔金 信弘〕
Performance of p-Bulk Silicon Microstrip Sensors in HL-LHC Radiation Environment
(p型シリコンマイクロストリップセンサーの HL-LHC 高放射線環境下での性能)
- 14) 望月 一也〔金 信弘〕
Study of $Z \rightarrow \tau \tau \rightarrow ll$ for the Higgs Boson Search with the ATLAS experiment at the LHC
(LHC ATLAS 実験におけるヒッグス粒子探索のための $Z \rightarrow \tau \tau \rightarrow ll$ の研究)
- 15) 大倉 裕樹〔中井 直正〕
南極テラヘルツ望遠鏡駆動部の低温対策
- 16) 寺部 佑基〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡におけるポインティングシステムの開発
- 17) 二瓶 亮太〔中井 直正〕
2 重量子井戸構造を用いた遠赤外線検出器の開発
- 18) 二本松 佳樹〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡受信機の安定化と大質量星形成領域 W51 のアンモニア輝線観測
- 19) 窪田 晋太郎〔三明 康郎〕
LHC-ALICE $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 陽子陽子衝突実験におけるジェットエネルギーバランスの粒子多重度依存性の研究
- 20) 近藤 祐樹〔三明 康郎〕
LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛+鉛衝突における多粒子相関の研究
- 21) 仲里 仁〔江角 晋一〕
LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛+鉛衝突における高次方位角異方性の研究
- 22) 水野 三四郎〔江角 晋一〕
RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における高次方位角異方性の粒子依存性の研究
- 23) 阿部 康志〔小沢 顕〕
炭素薄膜からの二次電子放出を利用した RI ビーム飛行時間検出器の開発
- 24) 奥村 公威〔小沢 顕〕
48Ca ビームによる Al 同位体の生成断面積測定
- 25) 福岡 翔太〔小沢 顕〕
J-PARC 主リングのインピーダンス整合集中定数型キッカー電磁石の開発

- 26) 中村 聡佑 [和田 道治]
質量校正の為の RF カーペットを用いた高効率 ESI の開発
- 27) 池田 聡 [小野田 雅重]
二次電池正極材料系 LiVPO_5 および関連物質の結晶構造と磁性
- 28) 渋谷 龍太 [小野田 雅重]
三角格子系 Li_xCoO_2 ($x \sim 0.7$) の磁気異常と NMR
- 29) 田村 麻人 [小野田 雅重]
複合結晶系 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ の Cu 脱離効果
- 30) 昇 佳史 [小野田 雅重]
超伝導系 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-\delta}$ の結晶構造と物性
- 31) 伊藤 港 [守友 浩]
シアノ錯体と D-A 分子結合系における格子・電荷ダイナミクスの分光学的研究
- 32) 服部 竜己 [守友 浩]
伝搬型 Ag 表面プラズモン波束のフェムト秒時間分解蛍光顕微観察
- 33) 朱 徐皓 [守友 浩]
ポリマー型正極材料のリチウムイオンインターカレーションの研究
- 34) 豊田 行紀 [大塚 洋一]
グラフェン/強磁性接合における電気伝導特性
- 35) 樋川 和哉 [大塚 洋一]
鉄系超伝導体 $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ のポイントコンタクトスペクトロスコピー
- 36) 青木 瞳 [今井 剛]
GAMMA 10 セントラル部 ECRH アンテナ特性の改良研究
- 37) 飯泉 英昭 [今井 剛]
X 線計測による GAMMA 10 セントラル部 ECRH 加熱特性の研究
- 38) 岩井 透 [今井 剛]
GAMMA10 セントラル部における周辺部浮遊電位を用いたプラズマの軸対称性評価
- 39) 青山 真士 [坂本 瑞樹]
金中性粒子ビームプローブの空間 2 点同時電位測定による GAMMA10 プラズマの局所電場計測
- 40) 石井 貴 [中嶋 洋輔]
荷電交換中性粒子分析器を用いた GAMMA10 セントラル部イオンエネルギーバランスの研究
- 41) 市村 和也 [中嶋 洋輔]
GAMMA10 ダイバータ模擬実験に向けた端損失イオン流の分析

- 42) 武田 寿人〔中嶋 洋輔〕
GAMMA10 ダイバータ模擬実験におけるターゲット近傍のプラズマ挙動解析
- 43) 森川 裕亮〔吉川 正志〕
フ라운ホーファー回折法を用いた GAMMA10 プラズマの電子密度揺動計測
- 44) 森本 真人〔吉川 正志〕
ガンマ 10 におけるトムソン散乱計測システムを用いた電子温度・電子密度測定
- 45) 山田 智博〔吉川 正志〕
位相イメージング法を用いた 2 次元電子密度計測、及び FDTD 法による計測精度改善

【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 物質創成先端科学専攻

- 1) 海老原 康裕〔白石 賢二〕
熱酸化で形成された SiC/SiO₂ 界面の負の固定電荷に関する理論的検討
- 2) 佐藤 皓允〔白石 賢二〕
星間空間における光誘起 L 型アミノ酸過剰の理論的研究
- 3) 高木 勇人〔舛本 泰章〕
ポンププローブ過渡吸収測定法による PbSe, PbS 量子ドットの研究
- 4) 張 遼〔舛本 泰章〕
Optical properties of the single nitrogen isoelectronic traps in III-V semiconductors
(III-V 族半導体中の窒素不純物による単一等電子トラップの光学的性質)
- 5) 大古 芳美〔野村 晋太郎〕
MoS₂ 薄膜の光伝導特性の研究
- 6) 大滝 健嗣〔野村 晋太郎〕
光伝導スイッチを用いた超短パルス時間分解測定
- 7) 大野 格〔野村 晋太郎〕
ゲート付き量子井戸のピエゾステージを用いた低温顕微発光マッピング
- 8) 宮城 浩一〔野村 晋太郎〕
ゲート付 GaAs-AlGaAs 非対称 2 重量子井戸の定常および時間分解発光分光
- 9) 申 星宇〔迫田 和彰〕
Fluorescence emission of colloid crystals enhanced by modified photon density of states
(光の状態密度の変調によって増強されたコロイド結晶の蛍光発光)

物理学セミナー

平成23年度

	開催日	講師	題目
第1回	9月14日	森下 将史 (物性実験)	2次元量子固体ヘリウム 3 (^3He) におけるフラストレートした量子スピン系
第2回	9月28日	吉川 耕司 (宇宙理論)	大規模銀河探査で迫るニュートリノ質量
第3回	10月 5日	濱本 雄治 (物性理論)	グラフェンの電子物性
第4回	10月12日	中嶋 洋輔 (プラズマ)	高温プラズマにおける中性粒子の挙動
第5回	10月19日	Pierre Petroff (素粒子実験) 受託研究員	New Physics Results from ATLAS Experiment at LHC
第6回	10月26日	丸山 敏毅 (原子核理論) 連携大学院	原子核物質の一次相転移と非一様構造
第7回	11月 2日	中條 達也 (原子核実験)	クォーク・グルーオン・プラズマ ー加速器実験で探るビッグバンから数10 マイクロ秒後の宇宙
第8回	11月 9日	中井 直正 (宇宙観測)	太陽系外の惑星の探査
第9回	11月16日	藏増 嘉伸 (素粒子理論)	格子量子色力学 (格子 QCD) で原子核を 作る

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 4,972,300 円
2. TA経費 数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻(物理学分野)分
525,550 円

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額(千円)
特定領域研究 計	教授	金 信弘	18071002	陽子反陽子衝突実験CDFによるトップとボトム・フレーバーの物理	14,600
" 公	教授	初貝 安弘	22014002	フラストレートした磁性体におけるベリー位相とその展開	700
" 公	教授	守友 浩	22013003	光励起によるナノポーラスシアノ錯体の物質移動と物性制御	1,900
" 計	准教授	岡田 晋	19054002	ナノチューブ複合構造体の物性解明と物質設計	1,100
新学術領域研究 総	教授	青木 慎也	20105001	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	3,800
" 公	教授	矢花 一浩	23104503	高強度パルス光の伝播を記述するマルチスケール・シミュレータの開発	1,500
" 公	准教授	神田 晶申	23103503	グラフェンでできた超伝導/強磁性/超伝導接合における磁性と超伝導の競合	2,300
" 計	准教授	野村晋太郎	20104005	低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測	16,900
" 公	講師	谷口 裕介	23105701	格子QCDに対する電磁相互作用の導入	1,000
基盤研究(S)	教授	梅村 雅之	20224002	第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明	9,600
"	教授	三明 康郎	20224014	ジェット識別測定によるクォーク・グルーオンプラズマ物性の研究	8,800
基盤基盤(A) 一般	教授	中井 直正	20244011	天の川のアンモニア掃天観測	4,100
" "	教授	守友 浩	21244052	シアノ架橋金属錯体界面を通じた物質移動と電圧誘起機能	5,400
" "	准教授	藏増 嘉伸	22244018	強い相互作用が織り成す物質形態のQCDによる統一的な研究	11,500
" "	准教授	森 正夫	21244013	理論と観測の融合による銀河発生学の探究	5,600
" "	講師	瀬田 益道	22244011	南極から探る銀河系の星間ダストの姿	15,500
基盤研究(B) 一般	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
" "	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	6,000
" "	教授	舛本 泰章	23340084	人工原子の新機能性の開拓	6,600
" "	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	7,200
" "	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	4,100
" "	准教授	笹 公和	21310004	加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確率	1,700
" "	准教授	野村 晋太郎	21340076	光ゲート法による過渡的量子輸送現象の解明	1,700
基盤研究(C) 一般	教授	石橋 延幸	20540247	D-ブレーンと閉じた弦の場の理論	600
" "	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	2,100
" "	教授	受川 史彦	22540305	ハドロン衝突におけるクォークオニウム生成機構の解明	1,100
" "	准教授	谷口 伸彦	22540324	スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子の有効理論の研究	500
" "	准教授	宮崎 州正	21540416	過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性	1,100
" "	講師	小松原哲郎	21540295	銀河系ガンマ線A1-26の天体起源の解明	700
" "	講師	谷口 裕介	22540265	格子上の非摂動的な繰り込みの実践	500
" "	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ィック熱伝導	1,800

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額(千円)
挑戦的萌芽研究	教授	坂本 瑞樹	21656235	分光学的手法を用いた動的酸素リテンション実時間計測法の開発	700
"	教授	初貝 安弘	23654128	クラマース多重項による四元数的バリー接続の理論と物理的応用への挑戦	1,500
"	教授	舛本 泰章	23656009	オリゴマー室温ポラリトンレーザーの実現	1,700
"	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	1,300
"	講師	吉川 耕司	21654026	6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション	1,000
若手研究(A)	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	8,400
若手研究(B)	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
"	助教	久保 敦	23760044	二光子蛍光顕微鏡法によるフェムト秒プラズモン波束の映像化	2,600
"	助教	佐藤 勇二	21740158	可解構造に基づいた重力理論/ゲージ理論双対性の研究	500
"	準研	船木 靖郎	23740167	原子核クラスターによる量子凝縮状態の研究	900
"	研究員	三宅 秀樹	22740139	二体ミュー粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いたbクォーク電弱希崩壊の精密測定	1,400
研究活動スタート支援	准教授	寺崎 順	23840005	Skyrme-QRPAを用いた二重ベータ崩壊の遷移行列要素の計算	1,100
"	助教	川勝 望	22840007	多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明	1,030
				合計	165,830

※ 網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

平成23年度 受託研究

NO	職名	氏名	委託者名	研究題目	金額 (円)
1	准教授	神田 晶申	(独)科学技術振興機構	面内伝導システム基礎伝導	7,800,000
2	准教授	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	22,360,000
3	准教授	池沢 道男	(独)科学技術振興機構	単一不純物を利用した光機能的半導体量子素子の創出	4,550,000
4	助教	小林 航	(独)科学技術振興機構	サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発	4,680,000
5	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構	大学間連携VLBI観測事業に係る研究「先端的天文学研究の推進— 高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明—」	5,984,000
6	教授	守友 浩	(独)科学技術振興機構	カラー電池素子の開発	1,700,000
7	助教	小林 航	(独)科学技術振興機構	酸化還元反応を利用した熱電変換素子の開発	1,700,000
合計					48,774,000

平成23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	「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):自作の望遠鏡で宇宙を見よう	349,000
合計					349,000

平成23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	白石 賢二	株式会社日立製作所	SiC-MOSFETのゲート絶縁膜物理の研究	800,000
2	教授	白石 賢二	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	2,000,000
合計					2,800,000

平成23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	助教	濱本 雄治	濱本雄治:(原寄附者)財団法人 湯川記念財団	「Chiral Symmetry and Electron-Electron Interaction in Many-Body Gap Formation in Graphene」に対する研究助成	130,000
合計					130,000

平成23年度 その他

NO	職名	氏名	機関等名	研究題目	金額 (円)
1	教授	中井 直正	(独)日本学術振興会	世界最高望遠鏡群を用いた宇宙観測	14,462,000
2	教授	金 信弘	大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構	筑波大学とKEKとの連携による融合教育研究拠点の構築に向けて	5,000,000
3	教授	三明 康郎	〃	〃	2,200,000
4	教授	守友 浩	〃	〃	7,200,000
合計					28,862,000

平成23年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	名誉教授	岩崎 洋一	2011年度素粒子メダル功労賞	計算素粒子物理学の開拓	9月
2	准教授	新井 一郎	2011 BEST FACULTY MEMBER	大学教員業績評価において、活動内容が特に優れたものであったことが認定された教員に対する表彰	2月
4	教授	中井 直正	平成23年度日本天文学会欧文研究報告論文賞	Nobeyama CO Atlas of Nearby Spiral Galaxies: Distribution of Molecular Gas in Barred and Nonbarred Spiral Galaxies	3月
3	教授	青木 慎也	日本物理学会第17回論文賞	Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations	3月
5	准教授	石井 理修	日本物理学会第17回論文賞	Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations	3月

役 務 分 担

平成23年度

数理物質科学研究科物理学専攻長 物理学系長	青木慎也
数理物質科学研究科学務委員（物理学専攻）	守友浩
数理物質科学研究科運営委員（物理学専攻）	青木慎也， 守友浩
物理学類長	初貝安弘
物理学類学務委員	受川史彦
自然学類運営委員	初貝安弘， 受川史彦
物理学関係自己評価委員	青木慎也（委員長）， 有光敏彦， 今井剛， 受川史彦， 梅村雅之， 大塚洋一， 白石賢二， 中井直正， 舛本泰章， 三明康郎， 矢花一浩
図書係	谷口裕介
カリキュラム委員	受川史彦（委員長）， 青木慎也， 梅村雅之， 小沢顕， 金谷和至， 坂本瑞樹， 中井直正， 初貝安弘， 守友浩， 橋本幸男
学類クラス担任（1年）	石橋延幸， 中嶋洋輔
（2年）	宮崎州正， 池沢道男
（3年）	小沢顕、吉川耕司
（4年）	吉江友照、武内勇司
学類就職委員	小沢顕， 吉江友照
自然学類学生委員会（学生生活審議会委員） （学生担当教員）	1年クラス担任：石橋延幸， 中嶋洋輔
学類学生委員会	学類長、学類学務委員・クラス担任・学生担 当教員
ハラスメント委員/学生相談室員	神田晶申
実験廃棄物取扱責任者	東山和幸

物理学系人事異動

(平23. 4. 1～平24. 3. 31)

【物理学系に來られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
岡本崇	准教授	H23. 4. 1	計算科学研究センター・主任研究員
石井理修	准教授	H23. 4. 1	計算科学研究センター・主任研究員
神谷克政	助教	H23. 4. 1	電子・物理工学専攻・助教
寺崎順	准教授	H23. 7. 16	計算科学研究センター・主任研究員
根村英克	准教授	H23. 8. 16	東北大学大学院理学研究科・助教
長江大輔	助教	H24. 1. 1	物理学専攻・準研究員

【物理学系を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
岩田潤一	助教	H23. 7. 31	東京大学物理工学科・特任講師
船木靖郎	準研究員	H23. 7. 31	理化学研究所仁科加速器研究センター・協力研究員
斎藤政通	助教	H24. 3. 31	アルバック・クライオ株式会社

物理学系構成員

2011. 4. 1～2012. 3. 31

		教授	准教授	講師	助教	準研	技術
理 論	素粒子	青木(慎) [計七] 石橋 金谷	石井 [計七] 石塚 [計七] 藏増 [計七] 根村 [計七] 吉江 [計七]	谷口(裕) [計七]	佐藤(勇) 毛利 八田		
	宇宙物理	梅村 [計七]	森 [計七] 岡本 [計七]	吉川(耕) [計七]	川勝		
	原子核	矢花 [計七]	寺崎 [計七] 丸山 [連携・物理]	橋本 [計七]		船木	
	物性	有光 白石 [計七] 初貝 [学際七]	岡田 [計七] 谷口(伸) 宮崎 河合 [連携・物質創成]		岩田 [計七] 神谷 庄司 [計七] 濱本 吉田		
実 験	素粒子	受川 金 新井 [客員・物理] 浦川 [客員・物理] 幅 [客員・物理]	原	佐藤(構) 武内			
	宇宙観測	中井		瀬田		宮本	
	原子核	三明 小沢 新井 [客員・物理] 浦川 [客員・物理] 宮武 [客員・物理]	新井(一) 江角 笹 [研究基盤七] 和田 [連携・物理] 田中 [客員・物理]	小松原 [研究基盤七] Schury 中條	長江		加藤
	磁性物性		小野田				
	半導体物性	舛本 蔡 [連携・物質創成] 西川 [連携・物質創成] 山下 [連携・物質創成]	池沢 野村 後藤 [連携・物質創成]		富本		
	強相関物性	守友 [学際七]	川本 [連携・物理]		上岡 [学際七] 小林		
	表面物性			東山	久保		
	低温物性	大塚	神田		斎藤 [学際七] 森下		
	プラズマ	今井 [フセ長] 坂本 [フセ] 中嶋 坂本 [連携・物理] 藤田 [連携・物理]	假家 吉川(正) 濱松 [連携・物理]	小波蔵 [フセ] 沼倉 [フセ] 平田 [フセ] 南 [フセ]			大川
事務室	岡野, 中川, 中井						

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2011（平成23）年度

発行 2012年9月

発行者 筑波大学数理物質系物理学域

〒305-8571 茨城県つくば市天王台1-1-1

TEL 029-853-4033

FAX 029-853-6618

ISSN 0915-5317