

ISSN 2187-4824

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2012 (平成24) 年度

筑波大学数理物質系物理学域

目 次

— 研究活動 —

I	素粒子理論グループ	1
II	素粒子実験グループ	30
III	宇宙物理理論グループ	61
IV	宇宙観測グループ	83
V	原子核理論グループ	91
VI	原子核実験グループ	107
VII	物性理論グループ	
VII-1	非平衡統計物理グループ	137
VII-2	量子物性理論グループ	143
VII-3	ナノ量子物性グループ	150
VII-4	ソフトマター理論グループ	154
VII-5	半導体ナノ物性グループ	158
VII-6	ナノ構造物性グループ	165
VII-7	量子輸送研究グループ	170
VIII	生命物理グループ	175
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	183
IX-2	半導体物性グループ	189
IX-3	強相関物性グループ	204
IX-4	表面物性グループ	217
IX-5	低温物性グループ	225
X	プラズマ研究グループ	232

— 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	273
	【1】 物理教育	
	(1) 学類教育	
	(2) 大学院教育	
	【2】 体験学習	
	【3】 カリキュラム関係	

— 補足資料 —

大学院資料	277
物理学域資料	285

I. 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、八田 佳孝、吉江 友照、石井 理修、
根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、毛利 健司

研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介、吉田 信介

大学院生 (7名)

【人事異動】

吉田信介氏(新潟大学研究員)が研究員として着任した(2012年4月1日)。

青木慎也教授が京都大学基礎物理学研究所教授として転出した(2013年3月31日)。八田佳孝准教授が京都大学基礎物理学研究所准教授として転出した(2013年3月31日)。

藏増嘉伸准教授が教授に昇任した(2013年4月1日)。吉田信介研究員が理化学研究所仁科加速器研究センター研究員として転出した(2013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てきた。更に発展的課題として、up、downクォーク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原子核の研究なども推進した。PACS-CS Collaborationは2011年9月末のPACS-CS機シャットダウンに伴って解散したが、これまで取り組んできた研究課題はHPCI戦略プログラム分野5(後述)における研究開発課題として発展的に引き継がれている。さらに、これと並行して、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同してカイラルフェルミオンを用いた研究を推進しているJLQCD Collaborationや、核子間ポテンシャルやハドロン間相互作用の研究に取り組んでいる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などで、

活発な研究を行った。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを共有する為のデータグリッド ILDG/JLDG の構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、「京」コンピュータを中核とした革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築を主導するために、「High Performance Computing Infrastructure(HPCI)戦略プログラム」が文部科学省により推進されている。その HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、青木が統括責任者を努める分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2011 年度から本格的に活動が始まり、2012 年度は、秋から一般利用が開始された「京」コンピュータを中心に、その研究活動が活発化している。詳しい活動内容は、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/> を参照していただきたい。また、分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木が拠点長を努める「計算基礎科学連携拠点」であるが、その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp/> に詳しい。

超弦理論の分野では弦の場の理論、超弦理論とゲージ理論との対応という 2 つの関連するテーマを中心として研究が行われた。最近この分野においては、D-ブレーンと呼ばれるソリトン解の研究を通じて、弦理論の非摂動的定式化としての弦の場の理論や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされる等の大きな発展があった。この状況の下で、弦の場の理論におけるゲージ不変な観測量、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅/ウィルソンループ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、相対論的重イオン衝突後の膨張する系での熱平衡化の研究、核子スピンのツイスト解析の研究、 $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論において期待されるジェット構造の研究、さらに、LHC の陽子衝突実験で測定されたジェット抑制イベントの断面積に対する理論計算を行った。

【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、佐々木 健志、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、筑波大学物理学域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。その後、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションの開発に取り組み、up、down クォークの質量差と電磁相互作用を reweighting 法によって取り入れることに成功し、平成 24 年度にその成果を論文として発表した。

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

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られる。その際、変形 block BiCGSTAB アルゴリズムの開発を行うことによって、reweighting 法の高効率実行を可能とした (論文 1)。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^+ メソン質量、 K^0 メソン質量、 K^+ メソン質量、 Ω バリオン質量を採用した。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 (論文 2)。図 1 は電磁相互作用と up と down クォークの質量差を取り入れた K^0 メソンと K^+ メソンの伝播関数の比を時間の関数としてプロットしたものである。赤線は K^0 - K^+ 質量差の実験値 (K^0 と K^+ の平均質量の 1% 未満) から期待される傾きであり、計算結果は誤差の範囲で実験値を再現している ($t=0$ の近傍は励起状態の寄与のため実験からずれている)。なお、本計算では PACS-CS 機の他に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) も利用している。

チャームバリオンの研究

物理点直上の極めて現実に近いシミュレーションにより、チャームクォークを含むバリオンの検証及び予言を与えた (論文 3,4)。

チャームクォーク 1 つを含むバリオンは実験的に高精度で調べられている。他方、チャームクォークを 2 つ含むバリオンは、 $\Xi_{cc}(3520)$ のみが実験的発見を報告されている。ただし、この発見を報告している実験グループは 1 つのみであり、他の実験グループからは否定的な結果が報告されている。 Ξ_{cc} の存在は未だ確定していない。

本計算により、まず、チャームクォーク 1 つを含むバリオン質量スペクトルは実験値を再現する事が分かった。次に、 Ξ_{cc} の質量値を求め、3603(15)(16) MeV を得た。この値は、報告されている実験値 3520 MeV と有意に異なる。

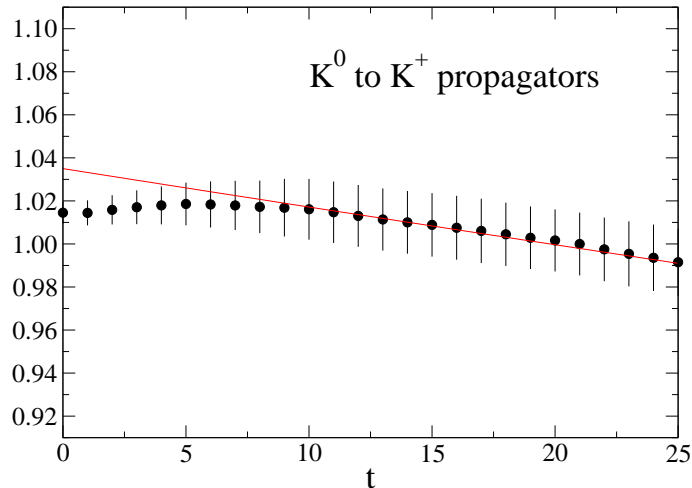


図 1: K^0 メソンと K^+ メソンの伝播関数の比。赤線は実験から期待される傾き。

本研究は、既存の実験報告値 3520 MeV が誤りであり、真の値は 100 MeV 程度高いと示唆する。また、 Ξ_{cc} に加え、チャームクォークを 2 つ及び 3 つ含む他の未発見バリオンに対する質量予言値を 2% の精度で決定した。

(2) HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題

分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して 4 つの研究開発課題が設定されており、そのうちの一つである「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」の責任者を蔵増が務めている。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、電磁相互作用や up と down クォークの質量差を取り入れた大規模シミュレーションの実現を意味する。これにより、QCD の基本パラメータであるクォーク質量を高精度で決定することが可能になる。他方、マルチスケール化とは QCD を用いて核子を複数作ることによって核子間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチであり、後者は蔵増、宇川を中心としたグループによって推進されている（後述）。

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

平成 24 年 9 月 28 日に「京」コンピュータの共用が開始されて以降、ゲージ配位生成の本格計算を開始した。 96^4 の格子サイズ、0.1 fm の格子間隔を採用し、DDHMC(Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) アルゴリズムを用いて 2+1 フレーバー ($m_u = m_d \neq m_s$) QCD のシミュレーションを実行している。HMC アルゴリズムは人為的に導入された擬時間に対する分子動力学法を組み入れたモンテカルロ法の一つであり、格子 QCD シミュレーションにおいて広く採用されている。DDHMC 法では、4 次元時空間格子を小領域に分割し、擬

時間に対するハミルトン方程式を階層的に積分することによってアルゴリズムの効率化を図っている。熱平衡状態に達したことを確認した後、5分子動力学時間(擬時間の単位)毎にゲージ配位を保存し、そのゲージ配位を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を並行して行っている。図2はこれまで得られた安定な(強い相互作用で崩壊しない)ハドロンの質量の計算結果を実験値と比較したものである。既に1%程度の統計誤差に到達していることがわかる。ここでは、クォーク質量($m_u = m_d \neq m_s$)と格子間隔を決めるための3つの物理量として、 π メソン質量(m_π)、 K メソン質量(m_K)、 Ω バリオン質量(m_Ω)を採用している。そのため、 m_π と m_K に対しては更に数%程度の実験値へのチューニングが必要であることが見てとれるが、その補正は今後 reweighting 法と呼ばれる計算手法を用いて行う。

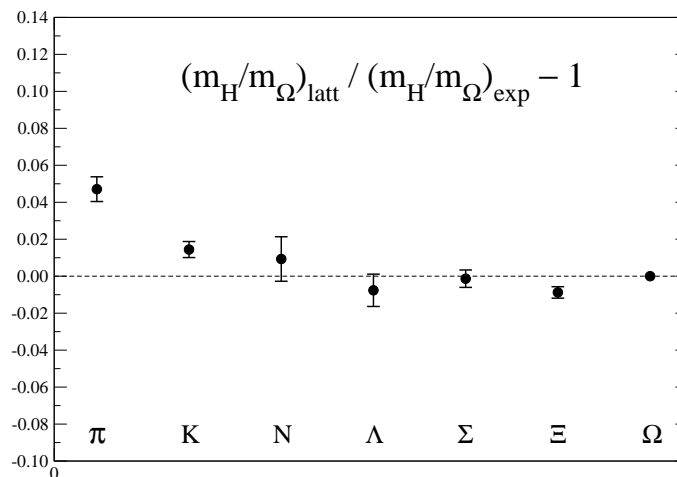


図 2: ハドロン質量と実験値との比較。

改良係数の決定

上記研究開発課題では、クォーク作用として smeared link を用いた Wilson-clover 作用を用いている。谷口は、clover 項の改良係数 c_{SW} を非摂動的に決定した(論文5)。

(3) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、宇川らは2010年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功した後(論文6)、2核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した(論文7)。ただし、これらは計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ物理的な値よりも重いクォーク質量で行った計算であるため、次のステップとしてクォークの真空偏極効果を取り入れた2+1フレーバー格子 QCD 計算への拡張を行った。その結果、クエンチ近似だけでなく2+1フレーバー QCD においてもヘリウム原子核と重陽子が束縛することが確認された(論文8)。ただし、クォーク質量は依然として物理的な値よりも重く、 $m_\pi = 0.51$ GeV 相当である。図3左は ${}^4\text{He}$ 原子核のエネルギーシフト $\Delta E_L({}^4\text{He})$ の空間体積依存性を表している。ここで、エネルギーシフトは ${}^4\text{He}$ 原子核の基底状態と自由な4個

の核子の質量との差 $\Delta E_L(^4\text{He}) = E_{^4\text{He}} - 4m_N$ で定義される。有限の空間体積 (L^3) では、4 個の核子同士の散乱の効果も $\Delta E_L(^4\text{He})$ に含まれるため、束縛エネルギーのみを取り出すためには、空間体積無限大極限 ($1/L^3 \rightarrow 0$) への外挿が必要となる。星印は束縛エネルギーの実験結果を表しており、我々の計算結果も同程度の値を再現していることがわかる。図 3 右は重陽子のエネルギーシフト $\Delta E_L(^3S_1) = E_{^3S_1} - 2m_N$ の空間体積依存性を表している。重陽子の場合、束縛エネルギーの計算結果が実験結果よりも 5 倍程度大きい。また、我々の計算では、実験的には束縛していないスピン一重項 (1S_0) チャネルにおいても束縛状態が確認されており、これらはクォーク質量が物理的な値よりも重いためではないかと推察している。今後クォーク質量を更に軽くして現実の値に近づけていくことが重要である。

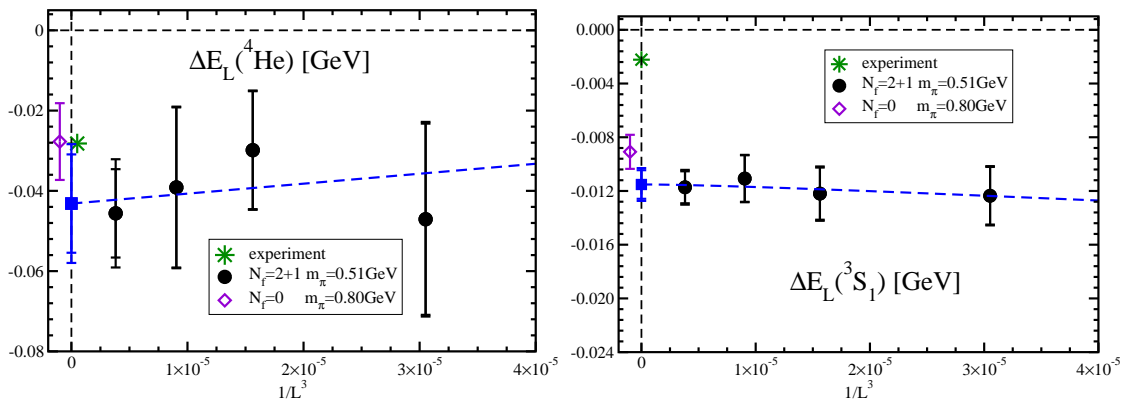


図 3: L^3 空間格子サイズにおける ^4He 原子核 (左図) と重陽子 (右図) のエネルギーシフト ΔE_L の空間体積依存性。四角に空間体積無限大極限 ($1/L^3 \rightarrow 0$) への外挿値、星印は束縛エネルギーの実験結果、白抜きダイヤはクエンチ近似の計算結果を表す。

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

2 つの核子間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に斥力芯と呼ばれる近距離での斥力、を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の 1 つである。青木、石井、根村、佐々木は、理化学研究所の初田らと HAL QCD Collaboration を結成し、2 核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子 QCD の数値シミュレーションで計算してきた。その一連の研究成果をレビューしたものが、論文 9 である。また、論文 10,11 では、斥力芯の起源を演算子積展開と摂動論的 QCD の繰り込み群という解析的な手法で研究し、格子 QCD の計算結果と比較している。論文 12 は、HAL QCD が用いてきた方法を非弾性散乱に拡張する方法を提案したものである。以下では、石井、根村、佐々木、及び青木の学生である山田の 2012 年度の研究成果を紹介する。

負パリティセクタのハイペロン力・対称および反対称 LS 力

かねてよりの懸案であった flavor SU(3) 極限におけるハイペロン力の一般形について、二核子系の Okubo-Marshak の方法を拡張する事によって求める事に成功した。Octet-baryon の二体系は、flavor 規約表現で、8 表現が 2 度現れ、二粒子の交換に対して、対称な物 (s) と反対称な物 (a) に分類される。この二つをつなぐ、反対称 LS 力が二核子系との唯一の違いであった。同様に、flavor SU(3) が破れた世界での一般形を求めた。ここでは、ハイペロンの結合チャンネルの off-diagonal 部分に二核子系では排除されていた形の項がたくさん生き残り、ポテンシャル逆構成の際にどのくらいまじめに取り扱うべきか悩んでいる。とりあえず、最初はこれらを無視して計算を進めるつもりである。これらの計算を実行するため、新型の contraction code の開発を行った。平成 25 年度の早期の段階で結果を出して、現実的な計算につなげていきたい。

2+1 flavor QCD による核力

平成 22 年度から 23 年度にかけて開発した "時間依存型" Schrödinger-like eq. の方法は、バリオン 4 点関数の ground state saturation を必要としないため、小さな t でも安定してバリオン間ポテンシャルを計算できる方法である。PACS-CS のゲージ配位を用いた 2+1 flavor QCD の核力のデータに対して、統計を上げてこの方法を適用して再解析を行った。長距離における one pion exchange 極限を考慮するため、AV18 型の関数形を用いて、二つの中心力と一つのテンソル力の同時フィットを行った。ここでは実験的に周期境界の影響を取り込めるようなフィットを試してみた。滑らかにパラメトライズされたポテンシャルを使って求めた位相差は、引力的だが絶対値が実験値よりも遥かに小さかった (束縛状態は存在していない)。 $m(\text{pion})=700, 570, 411 \text{ MeV}$ と変化させたが、この領域ではまだ実験値に向かって引力が強くなる傾向は見られていない (図 4、論文 13, 14, 15)。

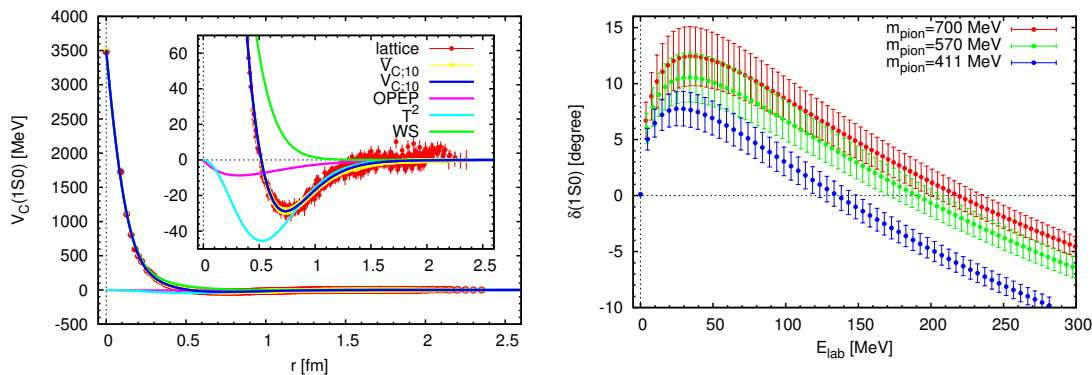


図 4: (左) 2+1 flavor 格子 QCD で計算された核力 (spin-singlet 中心力) のフィットの結果 ($m_\pi \simeq 570 \text{ MeV}$) (右) これを使った 1S_0 の散乱位相差 ($m_\pi \simeq 411, 570, 700 \text{ MeV}$)。

格子 QCD で得られた核力ポテンシャルによる少数核子多体系の研究

物理点での格子QCDによる(一般化)核力ポテンシャルの導出に備えて、Nambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数から得られた(一般化)核力ポテンシャルを用いて散乱位相などの物理量を導出するための各種方法の確立および軽い原子核構造への適用のための準備を進めた。より具体的には、フレーバSU(3)対称点で得られた核力ポテンシャルの偶パリティ成分(1S_0 および $^3S_1 - ^3D_1$ 状態に働く中心力およびテンソル力)を用いた ^4He 原子核の少数多体問題を精密に解き、束縛状態が存在することを確認した(図5、論文17)。この束縛状態の結合エネルギーは約4.4 MeV(陽子間のクーロン力も同時に考慮して4体問題を解いた場合)もしくは約5.1 MeV(クーロン力を考慮せず4体問題を解いた場合)であり、現実の ^4He に比べて非常に小さい。この結果は、既に行われているテンソル力を繰り込んだ中心力のみで4体問題を解いた近似計算と定性的に良く似た結果である。今回用いた核力ポテンシャルは π 中間子に対応するハドロンの質量が約469 MeVであり、クォーク質量は現実よりも重く、得られた核力ポテンシャルのテンソル力成分は現実の場合に比べて非常に弱いと考えられる。4体問題を解いて得られた ^4He の基底状態における全軌道角運動量($L=2$)の状態の期待値はわずか1.3%(クーロン力有り)ないしは1.4%(クーロン力無し)である。これまでの現象論的に決められた現実的核力に基づいて計算された ^4He の基底状態の $L=2$ 状態の期待値が10%程度であることが知られているので、物理点上での核力ポテンシャルの計算が極めて重要であることを示している。

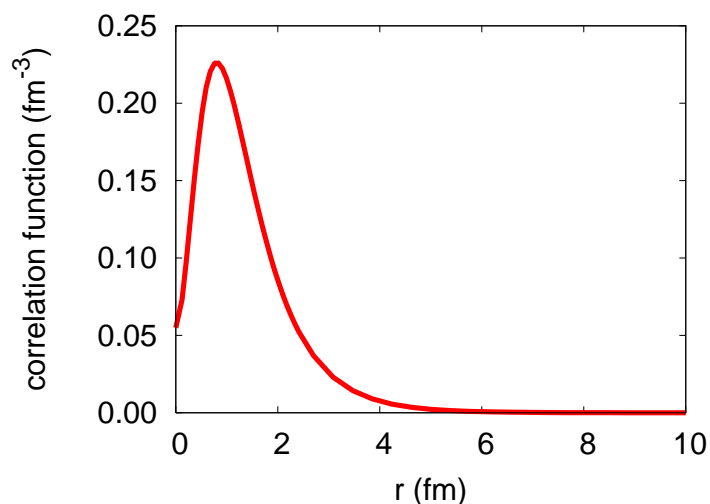


図 5: フレーバSU(3)対称点での格子QCD計算から得られた核力ポテンシャルを用いて得られた ^4He の基底状態における核子間距離 $r(\text{fm})$ に対する相関関数。陽子間のクーロンポテンシャルも考慮されている。

結合チャンネル手法を用いたバリオン間相互作用の研究

ストレンジネス(S)を含むバリオン間相互作用の研究は、バリオン間の近距離斥力の起源を明らかにする上で重要である。佐々木らは、HAL QCD Collaboration

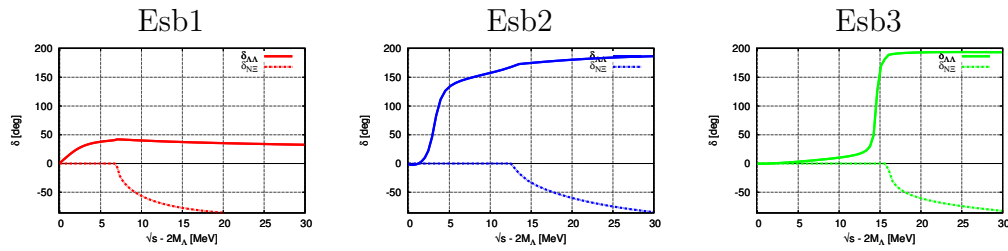


図 6: Esb1, 2, 3 における $\Lambda\Lambda$ と $N\Xi$ の散乱位相差

によるポテンシャルの導出方法を結合チャンネル Schrödinger 方程式に拡張しストレンジネスを含むバリオン 2 体系のポテンシャル行列を系統的に調べてきた。本年度は、バリオン間の近距離斥力の消失に伴い現れると期待されている H-dibaryon 状態に着目し、 $S = -2$ のバリオン間ポテンシャルを用いてこの状態に関する研究を行った (論文 18, 19)。

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

図 6 は、準備段階ではあるが、Esb1, 2, 3 のゲージ配位により得られたポテンシャルから計算された $\Lambda\Lambda$ と $N\Xi$ の散乱位相差を示している。この図から、クォーク質量が軽くなり、SU(3) の破れが大きくなるにつれて束縛状態にあった H-dibaryon が共鳴状態に移り変わっていく様子を確認する事が出来た。今後はこの散乱位相差の誤差を評価し、H-dibaryon の様子を詳細に調べることを計画している。また、他の系についても解析をすすめ、束縛状態の有無などを調べようと考えている。

Ω - Ω バリオン間相互作用の研究

Ω バリオンは、クォーク模型の分類におけるフレーバー 10 重項のなかで唯一強い相互作用で安定なバリオンである。ストレンジネス $S = -6$ にあたる Ω - Ω 間のポテンシャルを HAL QCD Collaboration による核力ポテンシャルの導出方法を用いて計算した。フレーバー 10 重項の粒子間のポテンシャルの計算は今回が初めてである。今回は、クォーク模型の計算で強い引力があると予想されるトータルスピン $J = 0$ の状態を計算した。計算には CP-PACS Collaboration が生成した 2+1 フレーバーの現実より重いクォーク質量 (パイオン質量 875[MeV] に対応) のゲージ配位を用いた。結果は中心には斥力芯があり、中距離には引力ポケットがあり、束縛状態とは断言できないものの強い引力があることを示唆している (図 7)。

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

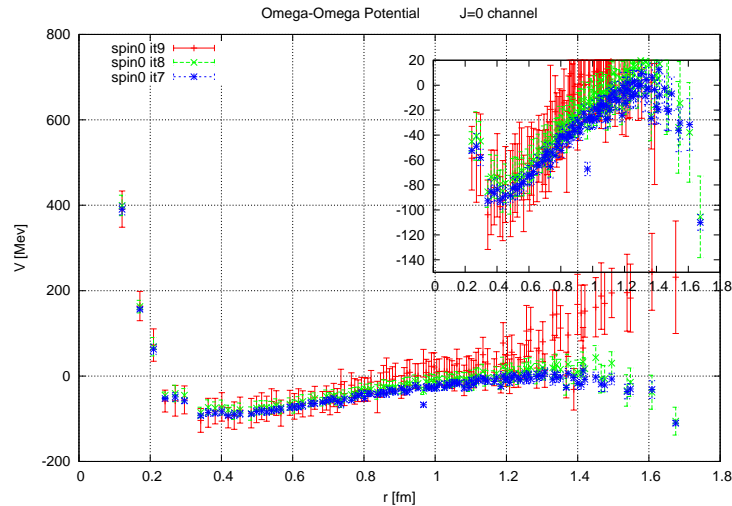


図 7: $J = 0$ である Ω - Ω 間のポテンシャル V [MeV]。横軸はバリオン間の距離 r [fm]。

金谷、青木らは、理化学研究所初田主任研究員、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田准教授らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。WHOT-QCD Collaboration のこれまでの主要成果をまとめて、論文 20 を発表した。

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ある。特に、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り、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いる。

第一段階として、 $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度シミュレーションを実行し、 u, d クォーク質量が現実より重い点ではあるが、Wilson 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。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 8、論文 21)。また、固定格子間隔アプローチで生成された $N_f = 2 + 1$ QCD の配位、及び平成 20 年度の試験研究で生成されたクエンチ近似の配位を使って、固定格子間隔アプローチによる静的クォークの自由エネルギーを計算し、固定格子間隔法が自由エネルギーの研究においても利点があることを示した (図 9、論文 22)。

現在、 u, d クォーク質量を物理点まで下げた PACS-CS グループのゼロ温度配位を利用した、物理点での有限温度シミュレーションに向けて、準備を進めている (論文 23)。

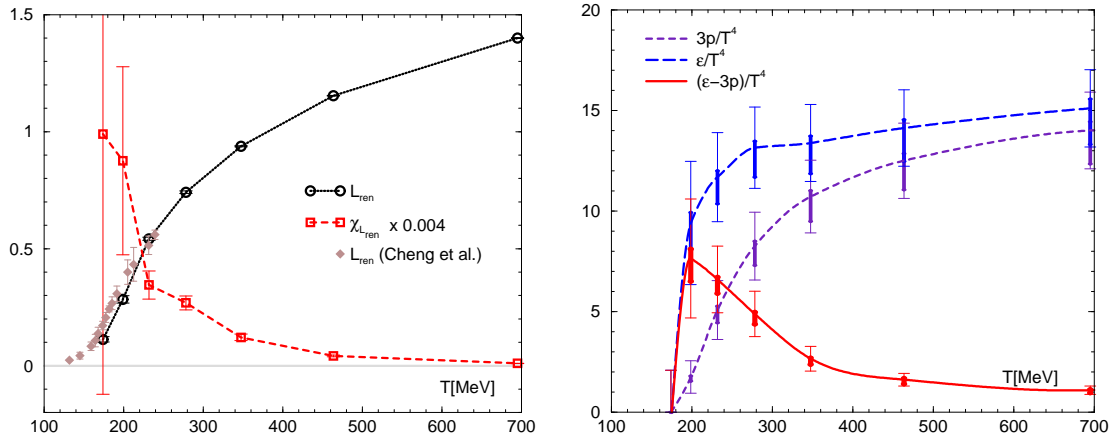


図 8: 固定格子間隔アプローチによるウィルソン型クォークを用いた有限温度 $N_f = 2 + 1$ QCD の研究 (論文 21)。 (左図) くりこまれたポリアコフループとその感受率。u,d クォークは現実より重く、 $T \sim 200$ MeV あたりが有限温度クロスオーバー温度に相当する。比較のため、スタガード型クォークを用いた固定 N_t アプローチの結果も示した。 (右図) 状態方程式。 p はクォーク物質の圧力、 ϵ はエネルギー密度、 $\epsilon - 3p$ はトレース・アノマリを表す。

ヒストグラム法による QCD 有限温度・有限密度相転移の研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の性質や次数を判定するうえで、観測量のヒストグラムや、その対数として定義される有効ポテンシャルは、最も直感的な情報を含んでいる。他方、系のパラメータ依存性を調べる上で強力な手法である reweighting 法では、系の作用に現れる物理量に関するヒストグラムを必ず計算する。我々は、これらの物理量のヒストグラムと reweighting 法を組み合わせることにより、相転移次数を容易に判定する解析方法 (「ヒストグラム法」) を開発した (論文 20,24)。

最初に、方法のテストとして、クォークが重い領域の QCD の相構造を、ポリアコフループなどの有効ポテンシャルの振る舞いから相構造を研究した。純ゲージ理論の有限温度 1 次相転移が、動的クォーク効果によりクロスオーバーに変わる臨界点の位置を、一般の化学ポテンシャルの場合に計算した。クォークの有限密度位相項がどう振る舞うかを評価した結果、臨界点の位置に関しては極めて小さいことを示した。これにより、臨界点の位置を、クォーク質量と化学ポテンシャルの関数として計算した (図 10 左、論文 25)。

この成果を受けて、クォークが軽い領域における QCD の有限密度相構造の解明に向けて、研究を進めている。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。 $N_F = 2$ QCD の場合に位相項を無視した phase-quenched QCD シミュレーションを実行し、位相の効果を再重み付け法により評価した。まだプレリミナリだが、化学ポテンシャルを大きくしてゆくと、クロスオーバー転移が 1 次転移に変わる点を示唆する結果を得た (図 10 右、論文 26)。

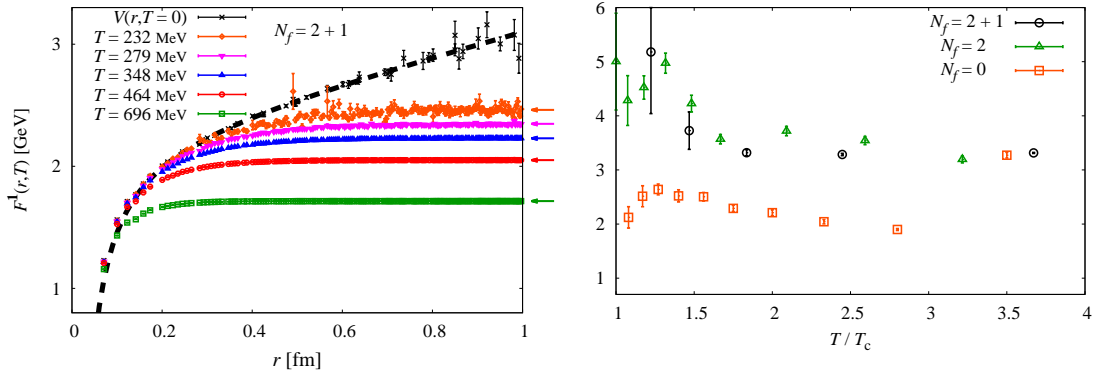


図 9: 固定格子間隔アプローチによる静的クォークの自由エネルギーの研究 (論文 22)。 (左図) $N_f = 2+1$ QCD における $Q\bar{Q}$ カラー 1 重項チャンネルの静的クォーク自由エネルギー。ゼロ温度 ($T = 0$) の自由エネルギーはウィルソン・ループの測定により、有限温度の自由エネルギーは 2 個のポリアコフ・ループの相関から評価した。固定格子間隔アプローチでは、定数くりこみの調整無しに、自由エネルギーが短距離で温度に依らないことを直接示すことが出来る。右端の矢印は、ポリアコフ・ループ 1 個の期待値から期待される自由エネルギーの遠距離極限の漸近値。(右図) デバイ遮蔽質量 $m_D(T)$ のフレーバー数依存性。縦軸は $m_D(T)/T$ 、横軸は T/T_c 。 T_c は相転移温度で、 $N_f = 2+1$ では 190MeV を仮定した。

(6) 有限密度 QCD

有限密度 QCD 研究のためには、非ゼロ化学ポテンシャル領域での格子 QCD 計算が必要となる。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。我々は先ず小さな格子サイズを用いたテスト計算によってこの解析的結果を検証し、論文に取り纏めた (論文 27)。その後、次のステップとして数値的に 4 フレーバー QCD に対して有限サイズスケール解析を行った。4 フレーバー QCD はあるクォーク質量領域において一次相転移を起こすことが期待されており、それを示せるか否かは我々の計算手法の良いベンチマークテストとなる。図 11 は「時間方向」の格子サイズを 4 に固定し、空間格子サイズを $V = 6^3 \sim 10^3$ まで変化させた場合の様々な物理量に対する感受率のピークの高さの V 依存性を表している。その依存性が線形であることから、一次相転移と結論することができる。これは世界で初めての有限密度 QCD に対する有限サイズスケール解析の応用であり、その有効性を実証できた意義は大きい。現在結果を論文に取り纏めている。

(7) 有限温度における $U(1)_A$ 対称性

谷口は、2 個のクォークを含む $N_f = 2$ QCD において、 $SU(2) \times SU(2)$ のカイ

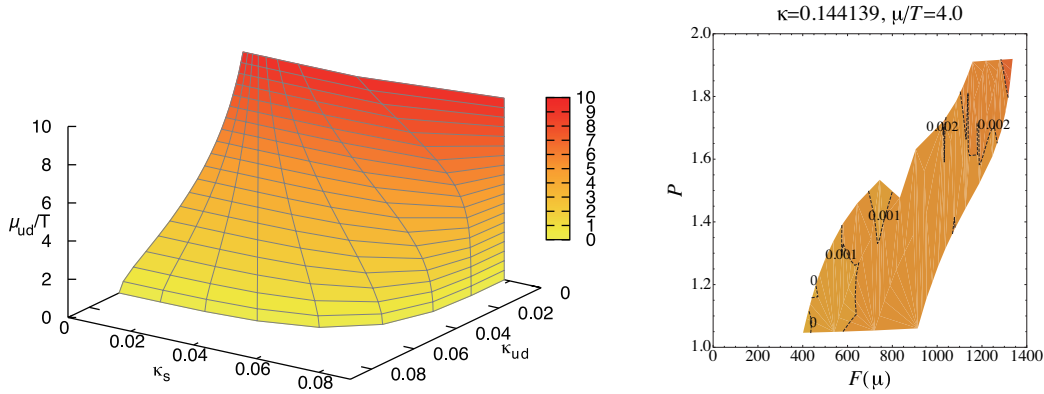


図 10: ヒストグラム法による QCD の有限温度相構造の研究。(左) 重クォーク領域における $N_f = 2+1$ QCD の臨界面 (論文 25)。 u, d クォークにだけ化学ポテンシャル μ_{ud} がかり、 s クォークにはかかっていない場合の結果。ホッピングパラメータ κ はクォーク質量の逆数にほぼ比例する量で、 $\kappa_s = 0$ は $m_s = \infty$ 、 $\kappa_{ud} = 0$ は $m_u = m_d = \infty$ に対応する。図の臨界面の向こう側は有限温度 QCD 転移が 1 次相転移で、手前はクロスオーバーになっている。(右) クォークが軽い $N_f = 2$ QCD の相構造の研究 (論文 26)。有効ポテンシャルの 2 階微分を、物理量 P (ブラケット) と F (クォークの自由エネルギーに関する量) の関数として示す (プレリナリ)。この量がゼロになる点で、クロスオーバーが 1 次相転移になる。

ラル対称性の他にアノマリーで破れていた $U(1)_A$ 対称性も有限温度で回復する可能性が高いことを青木、深谷 (大阪大学) 両氏と共に示した。具体的には、 $SU(2) \times SU(2)$ のカイラル対称性が高温で回復することを前提として、その対称性の回復した Ward-Takahashi 恒等式をインプットとして、 $U(1)_A$ 対称性の Ward-Takahashi 恒等式を調査し、 $U(1)_A$ 対称性も熱力学的極限を正しく取れば、回復することを示した。有限温度において回復する対称性の種類は有限温度相転移の次数に強い影響を与えることから、今回の結果は $N_f = 2$ QCD の相転移の次数が一次であることを強く示唆している (論文 28)。

(8) Conformal 理論の研究

Conformal 理論は、素粒子標準模型を越えた理論の候補であるテクニカラー理論との関連で、興味深く、近年、多くの研究がなされている。吉江は、岩崎筑波大名誉教授、中山 Caltech 教授、石川広島大准教授との共同研究で、格子数値シミュレーションによる conformal 理論の研究を行い、 $SU(N)$ ゲージ理論に N_f 個のフェルミオンが結合した系で、 N_f が conformal window 内にある場合の、理論の dynamics に関する新しい知見を得た。つまり、infrared cutoff を持つ”conformal 理論”では、1) フェルミオン質量の大小によって、閉じ込め相と”conformal 相”に分離されること、2) 2 相間の転移は、1 次転移であること、3) ”conformal 相”でのメソン伝搬関数 $G(t)$ は、閉じ込め相での時間 t に関する指数関数型 decay form $c \exp(-mt)$ とは異なり、指数補正のある湯川型の decay form $\tilde{c} \exp(-\tilde{m}t)/t^\alpha$ であること、を示した (論文 29)。

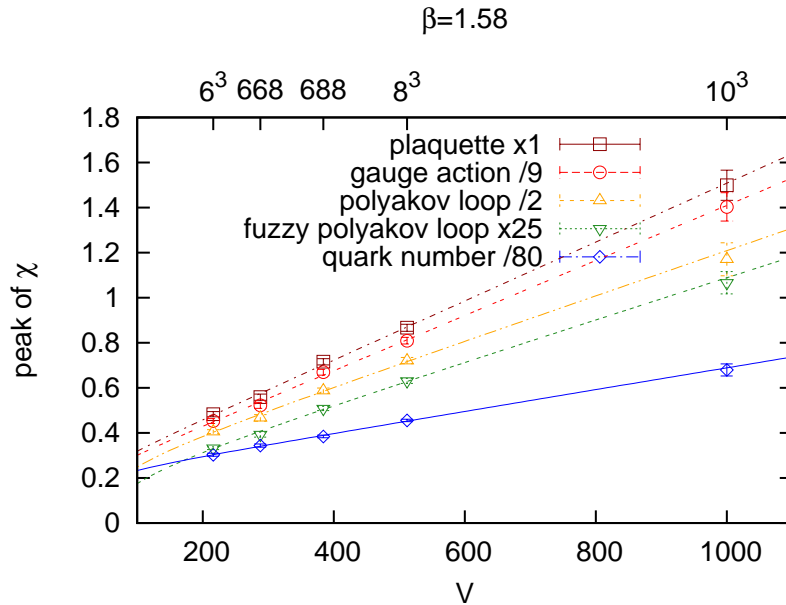


図 11: 様々な物理量に対する感受率のピークの高さの空間格子サイズ (V) 依存性。

(9) JLDG の改良と運用

国内の格子 QCD 研究者の為のデータグリッド Japan Lattice Data Grid (JLDG) の利便性・可用性の向上のため、吉江は、建部筑波大准教授、天笠筑波大准教授、及び、JLDG 他拠点担当者と、以下の改良等をおこなった。1) 東京大学、名古屋大学拠点の立ち上げ、2) メタデータサーバと gfarm の更新、3) 筑波大 HA-PACS FE, WG 群への JLDG クライアント機能の組み込み、4) KEK スパコンシステム A FE への JLDG クライアント機能の組み込み、5) 管理・運用・保守支援業務の外部委託開始。また、HPCI 共用ストレージと JLDG の連携システム構築の為の、技術検討・システム設計をおこなった。

【 2 】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論

弦の場の理論は、弦理論を第二量子化することにより非摂動的な定義を与えようという試みである。石橋は村上(岡山光量子研)とともに、この理論について解説する教科書を著した(著書 1)。

(2) 弦の場の理論におけるゲージ不変な観測量

Witten 型の弦の場の理論においては、近年様々な古典解が見つかっており、それらの性質に関する研究が活発に行われている。古典解の性質を調べる際に最も有効なのは、ゲージ不変な観測量であるエネルギーと”gauge invariant observable”と呼ばれる量を計算することである。エネルギーの計算は弦の場 3 個の積の計

算を含んだ一般には複雑なものになるが、”gauge invariant observable”の計算は多くの場合非常に容易である。

馬場と石橋は、弦の場の理論のエネルギーが”gauge invariant observable”の一種を用いて表されることを示した。また、この関係を用いてこれまでエネルギーが計算されていなかった古典解のエネルギーを求めた（論文 30）。

(3) 重力理論 / ゲージ理論双対性と強結合グルーオン散乱振幅 / ウィルソンループ

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合での maximally helicity violating (MHV) 散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この MHV 散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。これまでの研究により佐藤らは、このような極小曲面が等質サイン・ゴールドン模型と呼ばれる 2 次元可積分模型の熱力学的ベータ仮説方程式で記述されることを示した。また、その結果および g -関数（境界エントロピー）と Y -関数（スペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比）の関係を用いることにより、運動量が 2 次元空間に制限される場合に散乱振幅 / ウィルソンループを正多角形ウィルソンループ周りで解析的に評価する方法を定式化した。

佐藤は初田（東京工業大学 / DESY）、伊藤（東京工業大学）と共に、境界のある minimal 戸田理論の反射因子や W minimal 模型の相関関数を用いることにより、運動量が 3 次元空間に制限される場合にも、このような強結合散乱振幅 / ウィルソンループが正多角形ウィルソンループ周りで解析的に評価できることを示した。また、この結果に基づき 6・7 点振幅の主要次数の展開式を具体的に導いた（論文 31,32）。

【 3 】 高エネルギー・ハドロン物理

（八田 佳孝、吉田 信介）

(1) 場の理論の非平衡現象

相対論的重イオン衝突で作られた膨張する系がいかにして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 1 つである。八田と西山は $O(N)$ スカラー理論に対して 2 粒子既約ポテンシャルを large- N_c の Next-to-leading order までとりいれて計算し、これをもとに系の膨張する座標系での非平衡発展を背景場を取り入れて議論した。これにより、強結合領域では熱平衡分布（指数分布）が実現されることが初めて膨張形で示された（論文 33）。

(2) 核子スピンのツイスト解析

近年の理論発展により、核子のスピン 2 分の 1 をクォークとグルオンのヘリシティと軌道角運動量にゲージ不変に完全分解することが可能になった。八田と吉田はこの分解がツイスト 3 の一般化されたパートン分布関数と関係していることを示し、正準な軌道角運動量密度のツイスト構造を明らかにした（論文

34)。また、横偏極のスピンの対するグルオンヘリシティの寄与を解析し、ツイスト解析を行うとともに、横偏極に対してはローレンツ系に依存しない分解が不可能であることを示した(論文 35)。

(3) AdS/CFT によるジェットの解析

八田らは $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論において、結合定数が小さい領域から大きい領域に移行する際にジェットの構造がどう変化するかを考察した(論文 36)。弱結合では摂動論を用い、破碎関数を調べることでジェット内のエネルギー分布を議論した。強結合では AdS/CFT 対応を用い、ジェットに対する深非弾性散乱を解析することによりジェットの内部構造を調べた。

(4) LHC でのジェットの抑制

LHC の ATLAS 実験で前方と後方でジェットを測定し、かつそれらの間に 20 GeV 以上のジェットがないという制約を課したイベントの断面積が測られた。このような事象を解析するためには摂動論をもちいたエネルギーの流れの計算が重要である。八田らは nonglobal logarithm の効果を取り入れてこの条件のもとで断面積を計算し、実験結果をよく再現することに成功した(論文 37)。

論文

1. Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, T. Sakurai, H. Tadano, Modified block BiCGSTAB for lattice QCD, *Comp. Phys. Commun.* 183, No.1 (2012) 34-37
2. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, and T. Yoshié, 1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point, *Phys. Rev. D* 86, No.3 (2012) ref.034507, pp.1-6
3. Y. Namekawa for PACS-CS collaboration, Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, *PoS (LATTICE 2012)* (2012) ref.139, pp.1-7
4. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Charmed baryons at the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, arXiv:1301.4743
5. Y. Taniguchi, Non-perturbative evaluation of c_{sw} for smeared link clover fermion with Iwasaki gauge action, *PoS (LATTICE 2012)* (2012) ref.236, pp.1-7

6. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Helium nuclei in quenched lattice QCD, *Phys. Rev. D* 81, No.11 (2010) ref.111504(R), pp.1-4
7. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Two-nucleon bound states in quenched lattice QCD, *Phys. Rev. D* 84, No.5 (2011) ref.054506, pp.1-14
8. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Helium nuclei, deuteron, and dineutron in 2+1 Flavor lattice QCD, *Phys. Rev. D* 86, No.7 (2012) ref.074514, pp.1-9
9. Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Lattice QCD approach to Nuclear Physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2012, No.1 (2012) ref.01A105, pp.1-38
10. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Toward an understanding of short distance repulsions among baryons in QCD – NBS wave functions and operator product expansion – , *Prog. Theor. Phys.* 128, No.6 (2012) 1269-1282
11. S. Aoki, J. Balog, T. Doi, T. Inoue, P. Weisz, Short Distance Repulsion Among Baryons, *Int. J. Mod. Phys. E* 22, No.5 (2013) ref.1330012, pp.1-16
12. Sinya Aoki, Bruno Charron, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Construction of energy-independent potentials above inelastic thresholds in quantum field theories, *Phys. Rev. D* 87, No.3 (2013) ref.34512, pp.1-10
13. N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), Hadron-Hadron Interactions from Imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter Wave Function on the Lattice, *Phys. Lett. B* 712 (2012) 437-441
14. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, 2+1 flavor QCD result of nuclear forces, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems in press
15. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD, PoS (CD12) ref.025, to be appeared
16. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, Lambda N and Sigma N interactions from lattice QCD, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems in press

17. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, Lattice calculation of baryon-baryon interaction and few-body systems, Proceedings of the International Workshop on Strangeness Nuclear Physics, to be published in Genshikaku Kenkyu Suppl.
18. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.157, pp.1-7
19. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to S-wave hyperonic interactions from lattice QCD, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems in press
20. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, and Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, Ab initio study of the thermodynamics of quantum chromodynamics on the lattice at zero and finite densities, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, No.1 (2012) ref.01A104, pp.1-35
21. T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Equation of state in $2 + 1$ flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Phys. Rev. D 85, No.9 (2012) ref.094508, pp.1-11
22. Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya and H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Application of fixed scale approach to static quark free energies in quenched and $2 + 1$ flavor lattice QCD with improved Wilson quark action, Prog. Theor. Phys. 128, No.5 (2012) 955-970
23. T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Thermodynamics in $2 + 1$ flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.074, pp.1-7
24. S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method, Cent. Eur. J. Phys. 10, No.6 (2012) 1322-1325
25. S. Ejiri, Y. Nakagawa, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, T. Hatsuda, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Probability distribution functions in the finite density lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.089, pp.1-7
26. Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, H. Ohno, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Phase structure of finite density QCD with a histogram method, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.092, pp.1-7

27. Shinji Takeda, Yoshinobu Kuramashi, and Akira Ukawa, Phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential, Phys. Rev. D85 No.9 (2012) ref.096008, pp.1-12
28. S. Aoki, H. Fukaya and Y. Taniguchi, Chiral symmetry restoration, the eigenvalue density of the Dirac operator, and the axial U(1) anomaly at finite temperature, Phys. Rev. D 86, No.11 (2012) ref.114512, pp.1-18.
29. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama and T. Yoshie, Conformal theories with an infrared cutoff, Phys.Rev. D87, No.7 (2013) ref.071503(R), pp.1-5
30. T. Baba and N. Ishibashi, Energy from the gauge invariant observables, JHEP 1304 (2013) 050
31. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito and Yuji Satoh, Null-polygonal minimal surfaces in AdS_4 from perturbed W minimal models, JHEP 1302 (2013) 067
32. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, International Journal of Modern Physics: Conference Series 21 (2013) pp.1-21
33. Y. Hatta and A. Nishiyama, Nonequilibrium 2PI evolution of the $O(N)$ model with longitudinal expansion, Phys. Rev. D86 (2012) 076002, pp.1-8
34. Y. Hatta and S. Yoshida, Twist analysis of the nucleon spin in QCD, JHEP1210 (2012) 080, pp.1-15
35. Y. Hatta, K. Tanaka and S. Yoshida, Twist-three relations of gluonic correlators for the transversely polarized nucleon, JHEP1302 (2013) 003, pp.1-15
36. Y. Hatta, E. Iancu, A.H.Mueller, and D.N. Triantafyllopoulos, Jet evolution at weak and strong coupling, JHEP1212 (2012) 114, pp.1-52
37. Y. Hatta, C. Marquet, C. Royon, G. Soyez, T. Ueda and D. Werder, A QCD description of the ATLAS jet veto measurement Phys. Rev. D87 (2013) 054016, pp.1-9
38. Y. Hatta, Hard processes in AdS/CFT, Int. J. Mod. Phys. A3&4, (2013) 1340003, pp.1-12

著書・総説等

1. 石橋延幸、村上公一
「弦の場の理論-弦理論のより深い理解のために」 サイエンス社

2. 藏増嘉伸
「スーパーコンピュータ京と量子論の数値計算」 パリティ2013年1月号 丸善出版
3. 青木慎也、石井理修、初田哲男、根村英克
「QCDによる核力研究とその展開」 日本物理学会誌 2012年 67巻 11号
4. 青木慎也
「2012年ゴートン・ベル賞：石山智明氏、似鳥啓吾氏、牧野淳一郎氏」 日本物理学会誌 2013年 68巻 3号
5. 山田信博監修、「科学の芽」賞実行委員会編（岩崎 洋一, 白川 秀樹, 金谷 和至他 著）
「もっと知りたい!『科学の芽』の世界 part 3」 筑波大学出版会 (2012)

学位論文

[博士論文]

1. 齋藤 華
「Finite density QCD in the heavy quark region (クォーク質量が大きい領域での有限密度 QCD)」

[修士論文]

1. 崔 在敦
「Phase diagram at finite temperature and chemical potential in strong coupling limit of lattice QCD (有限温度および化学ポテンシャルにおける格子 QCD の相図の強結合極限)」

非常勤講師・集中講義

1. 青木 慎也、東京大学 大学院総合文化研究科客員教授 2012年4月から 2014年3月まで。(2年間) 2012年度は「格子ゲージ理論の基礎と応用」に関する講義を行った。
2. 青木 慎也、集中広義「格子ゲージ理論入門」立教大学 理学部、2012年6月7-9日

研究成果発表（講演）

[国際会議]

1. Y. Hatta, 「Hard processes in AdS/CFT」(招待講演),
Progress in quantum field theory and string theory (Osaka City University, Osaka, Japan, Apr. 3-7, 2012)
2. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability」(招待講演),
International conference on Progress in Quantum Field Theory and String Theory (Osaka City University, Osaka, Japan, Apr. 3 - 7, 2012)
3. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature」(招待講演),
Workshop 'New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions' (BNL, Upton, NY, USA, May 14-16, 2012)
4. Yoshinobu Kuramashi 「1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point」(招待講演),
Workshop 'New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions', (BNL, Upton, NY, USA, May 14-16, 2012)
5. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD」(招待講演),
International Workshop on heavy quark hadrons at J-PARC of Technology 2012 (Tokyo, Japan, Jun. 18-22, 2012)
6. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature」,
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Cairns Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
7. Y. Taniguchi 「Non-perturbative evaluation of c_{SW} for smeared link clover fermion with Iwasaki gauge action」,
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) (Cairns Convention Centre, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
8. N. Ishii for HAL QCD Collaboration 「2+1 flavor QCD results of nuclear forces」,
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) (Cairns Convention Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
9. Y. Namekawa 「Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」,
The XXX International Symposium on Lattice Field Theory (Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)

10. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD」,
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2013)
(Cairns Convention Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
11. Yuji Satoh 「Conformal/supersymmetric interfaces in string theory」(招待講演),
CQeST-IEU Focus program on Finite-size Technology in Low Dimensional
Quantum System (VI) (Seoul, South Korea, Jun. 24-Jul. 9, 2012)
12. Sinya Aoki 「Hadron interactions in lattice QCD」(招待講演),
Lattice Hadron Physics IV (CSSM, University of Adelaide, Adelaide, Aus-
tralia, Jul. 2-4, 2012)
13. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable sys-
tems」(招待講演),
APCTP-CQeST-IEU Workshop on Quantum Integrability and its Applica-
tions (Seogwipo, Jeju Island, South Korea, Jul. 7-13, 2012)
14. Yoshinobu Kuramashi 「Lattice QCD – From quarks to nuclei –」(招待講
演),
10th International Meeting on High-Performance Computing for Computa-
tional Science (VECPAR2012) (Kobe University, Kobe, Jul. 17-20, 2012)
15. Sinya Aoki 「Hadron interactions from lattice QCD」(招待講演),
INT Program 'Lattice QCD studies of excited resonances and multi-hadron
systems' (INT, Seattle, USA, Jul. 30-Aug. 31, 2012)
16. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, 「Baryon-baryon interaction from lattice
QCD」(招待講演),
The 7th International Workshop on Chiral Dynamics (CD12) (Thomas Jeffer-
son National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA, Aug. 6-10,
2012)
17. N. Ishii for HAL QCD Collaboration 「2+1 flavor QCD results of nuclear
forces」,
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics
(Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012)
18. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lambda N and Sigma N interactions
from lattice QCD」,
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics
(Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012)
19. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to S-wave
hyperonic interactions from lattice QCD」,

The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, JAPAN, Aug. 20-25, 2012)

20. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lattice calculation of baryon-baryon interaction and few-body systems」, The International Workshop on Strangeness Nuclear Physics (Osaka, Japan, Aug. 27-29, 2012)
21. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration, eigenvalue density of Dirac operator and axial U(1) anomaly at finite temperature」(招待講演), Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory' (GGI, Florence, Italy, Aug. 27-Sep. 28, 2012)
22. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Strangeness S=-2 baryon-baryon systems from Lattice QCD」(招待講演), Tours2012, VIII Tours symposium on Nuclear physics and Astrophysics on Black Forest (Lenzkirch-Saig, Germany, Sep. 2-7, 2012)
23. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lattice Calculation of Hyperon Potential and Few-Body System」, The 2nd Korea-Japan Workshop on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC (Busan, Seoul, Sep. 24-25, 2012)
24. Sinya Aoki 「Hadron interactions from lattice QCD」(招待講演), Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory' (GGI, Florence, Italy, Aug. 27-Sep. 28, 2012)
25. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to hyperonic interactions from lattice QCD」, HYP2012-XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Barcelona, Spain, Oct. 1-5, 2012)
26. Sinya Aoki 「Computing Nuclear Force in Lattice Gauge Theory」(招待講演), QCD Structure I (Central China Normal University, Wuhan, China, Oct. 7-20, 2012)
27. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems」(招待講演), Yukawa International Seminar (YKIS) 2012 "From Gravity to Strong Coupling Physics" (YITP, Kyoto, Japan, Oct. 15-19, 2012)
28. Nobuyuki Ishibashi 「Energy from the Gauge Invariant Observables」(招待講演), String Field Theory and Related Aspects V, SFT 2012 (The Israel Institute for Advanced Studies, Jerusalem, Israel, Oct. 28-Nov. 1, 2012)

29. K. Kanaya 「Finite density QCD with Wilson quarks using the histogram method」(招待講演),
International workshop "QCD Structure I" (Wuhan, China, Oct. 7-20, 2012)
30. Y. Hatta, 「Fragmentation in AdS/CFT」,
Workshop on fragmentation functions and QCD 2012 (RIKEN, Wako, Nov. 9-11, 2012)
31. Y. Namekawa 「Charmed baryons from lattice QCD」,
Hadron Structure and Interactions 2012 (Osaka, Japan, Nov. 16-17, 2012)
32. Sinya Aoki 「Hadron interaction from lattice QCD」(招待講演),
KMI workshop on "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective",
(Sakata-Hirata Hall, Nagoya University, Nagoya, Japan, Dec. 4-7, 2012)
33. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability」(招待講演),
Light-Cone Physics: Hadronic and Particle Physics (University of Delhi, Delhi, India, Dec. 10-15, 2012)
34. Sinya Aoki 「Quarks to Universe in computational science」(招待講演),
Symposium "Quarks to Universe in Computational Science" (QUCS2012) (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec. 13-16, 2012)
35. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to S=-2 baryon-baryon system in Lattice QCD」,
International Symposium on "Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012)" (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec. 13-16, 2012)
36. M. Yamada 「Omega-Omega interaction on the Lattice」,
Symposium:Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012) (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec.13-16, 2012)
37. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Hyperonic nuclear forces from lattice QCD and toward an application to few-body systems」,
YITP workshop Nuclear equation of state and hypernuclear physics (Kyoto, Japan, Jan. 4-31, 2013)
38. Sinya Aoki 「Nuclear force in lattice QCD」(招待講演),
KEK theory center workshop on 'Hadron physics with high-momentum hadron beams at J-PARC in 2013' (KEK Tsukuba Campus, Japan, Jan. 15-18, 2013)
39. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD at the physical point」,
Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics (Ibaraki, Japan, Feb. 11-13, 2013)

40. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Baryon-baryon interactions in strangeness sector from lattice QCD」(招待講演),
Workshop on Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics in 2013 (Tokai, Japan, Feb. 11-13, 2013)
41. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Hyperonic potentials from lattice QCD and toward an application to few-body problems」,
The 5th GCOE International Symposium on "Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy (Sendai, Japan, Mar. 4-6, 2013)
42. K. Kanaya 「Finite density QCD on the lattice with a histogram method」(招待講演),
International workshop on "Quarks, Gluons, and Hadronic Matter under Extreme Conditions" (St. Goar, Germany, Mar. 18, 2013)
43. Y. Hatta, 「Resummation of nonglobal logarithms at finite N_c 」,
Kick-off meeting of 'Brain circulation program' (Brookhaven National Laboratory, New York, USA, Mar. 21, 2013)
44. K. Kanaya 「Finite density QCD with a histogram method」(招待講演),
School and workshop "New Horizons in Lattice Field Theory" (Natal, Brazil, Mar. 25, 2013)

[国内学会、研究会]

1. 青木 慎也 「はじめに」(招待講演),
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 (名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
2. 石塚 成人 「Resonance on the lattice」,
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 (名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
3. 滑川 裕介 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」(招待講演),
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 (名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
4. 佐々木 健志 for HAL QCD collaboration 「Coupled Channel Approach to Baryon-Baryon Interactions in 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 (名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
5. 佐藤 勇二 「On supersymmetric interfaces in string theory」,
基礎研究会「場の理論と弦理論」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, Jul. 23-27, 2012)

6. 馬場 隆行 「Relevant deformation 解のエネルギーの計算」,
基研研究会「場の理論と弦理論」(京都大学基礎物理学研究所, 京都, Jul. 23-27, 2012)
7. 金谷 和至 「Lattice QCD at finite T and μ – updates from Lattice 2012」(招待講演),
基研研究会「熱場の量子論とその応用 2012」(京都大学基礎物理学研究所, 京都, Aug. 22-24, 2012)
8. 藏増 嘉伸 「京コンピュータと HPCI 戦略プログラム分野 5」(招待講演),
日本物理学会 2012 年秋季大会 理論核物理領域-素粒子論領域-宇宙線・宇宙物理領域合同シンポジウム「動き出した京コンピュータと素粒子・原子核・宇宙の計算物理」(京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
9. 八田 佳孝 「核子スピンのツイスト解析」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
10. 石井 理修 for HAL QCD Collaboration 「PACS-CS ゲージ配位を用いた 2+1 flavor QCD による核力ポテンシャル」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
11. 佐藤 勇二 「On supersymmetric interfaces in string theory」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
12. 滑川 裕介 「物理点における 2 + 1 フレーバー格子フル QCD シミュレーションによるチャームバリオンの研究」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
13. 佐々木 健志 for HAL QCD collaboration 「格子 QCD によるハイペロン間相互作用のクォーク質量依存性の研究」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
14. 馬場 隆行 「Relevant deformation 解を用いたエネルギーの計算」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
15. 青木 慎也 「HAL QCD」(招待講演),
第 25 回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」(つくば国際会議場 中ホール 300, つくば, Dec. 22-24, 2012)
16. 佐藤 勇二 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems」(招待講演),
研究集会「場の数理とトポロジー」(信州大学, 松本, Feb. 6-8, 2013)
17. 吉江 友照 「HEPnet-J/sc 報告」,
HEPnet-J ユーザー会 (九州大学, 福岡, Feb. 20-21, 2013)

18. 吉江 友照 「JLDG の現状と計画」,
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, 東京, Mar. 5-6, 2013)
19. 佐々木 健志 for HAL QCD collaboration 「格子 QCD による $S=-2$ バリオン間相互作用のクォーク質量依存性の研究」,
HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」シンポジウム(秋葉原, 東京, Mar. 5-6, 2013)
20. 吉江 友照 「HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携」,
HPCI システム利用研究課題中間報告会(内幸町, 東京, Mar. 15-16, 2013)
21. 佐藤 勇二 「Analytic expansion of MHV amplitude at strong coupling」,
日露共同研究ミニワークショップ(ヴィアーレ大阪・大阪科学技術センター, 大阪, Mar. 23-25, 2013)
22. 藏増 嘉伸 「計算素粒子物理学のフロンティア」(招待講演),
日本物理学会第 68 回年次大会 素粒子論領域-理論核物理領域-領域 3-9-領域 11-12 合同シンポジウム 「エクサスケールに向けて歩み出す計算物理学」(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)
23. 佐藤 勇二 「Null-polygonal minimal surfaces in AdS_4 from perturbed W minimal models」,
日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)
24. 吉田 信介 「シングルスピン非対称性における 3 グルーオン相関関数の研究」(招待講演),
日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)
25. 齋藤 華 「格子 QCD シミュレーションにおける 関数の計算に関する研究」,
日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)
26. 馬場 隆行 「Modified cubic theory におけるエネルギーとゲージ不変量の関係」,
日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)

受賞

1. 青木慎也、初田哲男、石井理修：
「格子量子色力学による核力の研究」、第 23 回つくば賞(2012 年 10 月 17 日)
茨城県科学技術振興財団

2. 青木慎也、初田哲男、石井理修：
「格子量子色力学に基づく核力の導出」、2012年度仁科記念賞(2012年12月6日)、仁科記念財団
3. 吉田 信介：
「シングルスピンの非対称性における3グルーオン相関関数の研究」、第7回(2013年)日本物理学会若手奨励賞(理論核物理領域)/第14回核理論新人論文賞

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」×「新ハドロン」、HPCI戦略プログラム分野5 共催クロスオーバー研究会-多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的件研究-共催
2012年7月12、13日、名古屋大学 坂田・平田ホール、名古屋(参加者75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」/HPCI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-
2012年7月27日-31日、京都大学 基礎物理学研究所、京都(参加者61名)
3. 八田 佳孝 他、
研究会「強相関量子多体系としてのハドロンクォーク物質」
2012年9月15日、京都大学時計台国際交流ホール、京都(参加者84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」/HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」Symposium: 'Quarks to Universe in Computational Sciences (QUCS 2012)', 主催
2012年12月13日-16日、奈良新公会堂、奈良(参加者101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
大学院生	13 名
学群 4 年次生	3 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。本年度もそれぞれの研究活動で数多くの成果を得たが, その中でも特筆すべき成果は ATLAS 実験において質量起源のヒッグス粒子を発見したことである。他の研究活動としては, 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。また今年度より, ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視の研究を開始した。

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は, 米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり, 日本をはじめアジア, 北米, 欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれている。1996 年の物理実験 Run I の終了後 CDF 検出器およびテバトロン加速器の増強を経て, 2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが, 2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約 10 fb^{-1} である。

以下には, 2012 年度の成果について主なものを記す。

(1) 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 20 年近くが経過し, Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いて, その様々な性質が詳細に研究されている。テバトロンでのトップクォーク生成は, クォーク・反クォーク対を始状態とする対生成が主である。

その質量は多くの終状態を用いて測定されている。トップクォーク対が 1 つの荷電レプトンと 4 つのジェットを含む終状態に崩壊するチャンネル (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, $m_{\text{top}} = 172.85 \pm 0.71 \pm 0.84 \text{ GeV}/c^2$ という最終結果を得た。D0 実験の測定と総合した平均値は $173.20 \pm 0.51 \pm 0.71 \text{ GeV}/c^2$ である (図 1)。

また, トップクォーク対生成機構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, 前後方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

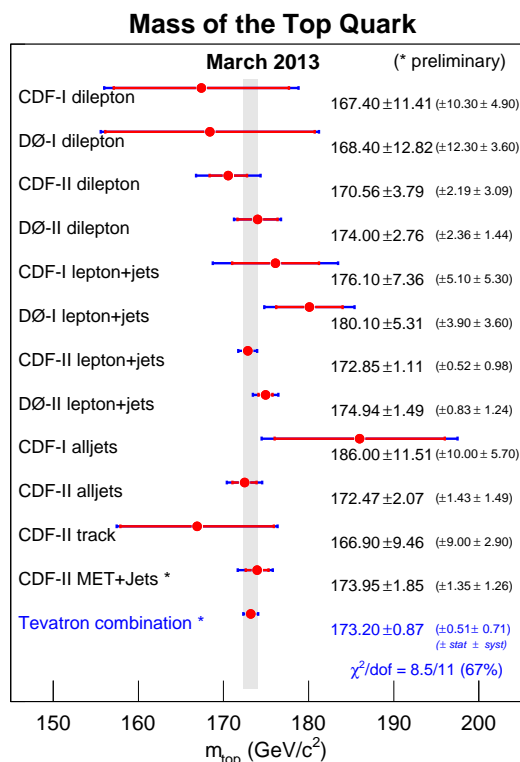


図 1: トップクォークの質量の測定 .

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%程度の前後方非対称度が現れることが予言される．標準理論を超える物理で軸性ベクトル結合を含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．新たな物理の兆候を示すものとして興味深い．2012 年度には、全データを用いた dilepton チャンネルの解析を継続し、結果の公表に向けた調整を行っている．

(2) 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 $b \rightarrow sl^+l^-$ 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 実験ではこれまでこの解析を行ってきたが、2012 年度には、Run-II 実験の全データ (9.6 fb^{-1}) を用いて新たな結果を得た．図 2 に示すように、崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ および $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ などの信号が高統計で再構成された．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が新物理の探索に感度を持つ．図 3 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．

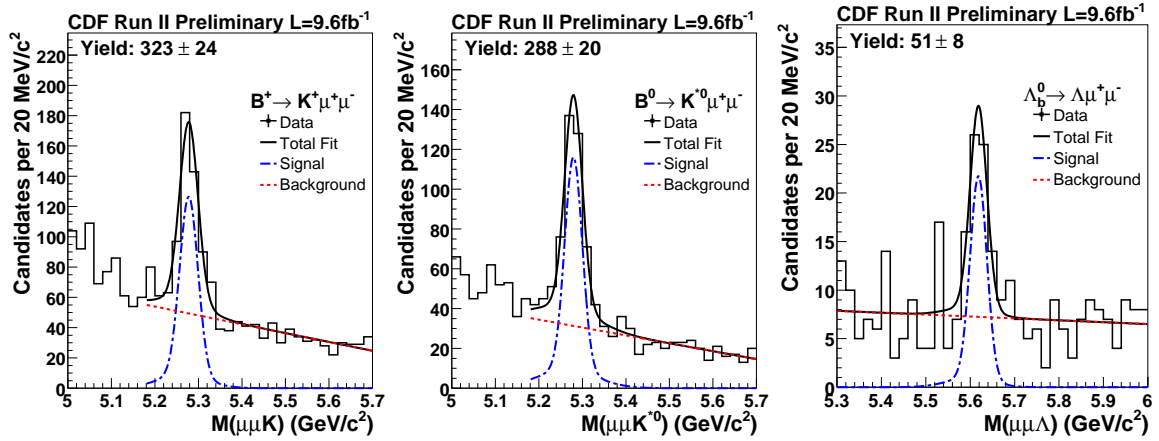


図 2: B ハドロンの稀崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ および $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$ の信号 .

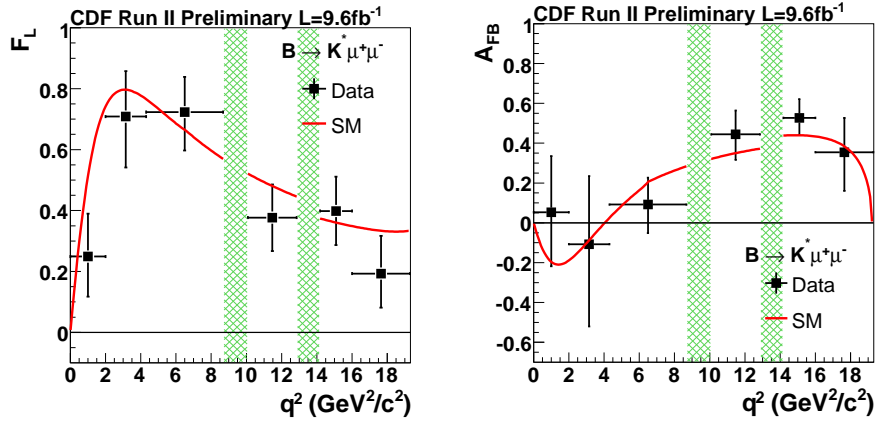


図 3: 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定 . 分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている .

(3) 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 . 2012 年夏に , LHC での ATLAS , CMS 両実験により質量 $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子と思しき新粒子が発見されたが , その正体が素粒子標準理論により予言されるヒッグス粒子であるか否かは , まだ決定的な検証がなされていない . 特に , フェルミ粒子との結合が重要である .

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 $130 \text{ GeV}/c^2$ 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 $p\bar{p} \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}\ell\nu X$ 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

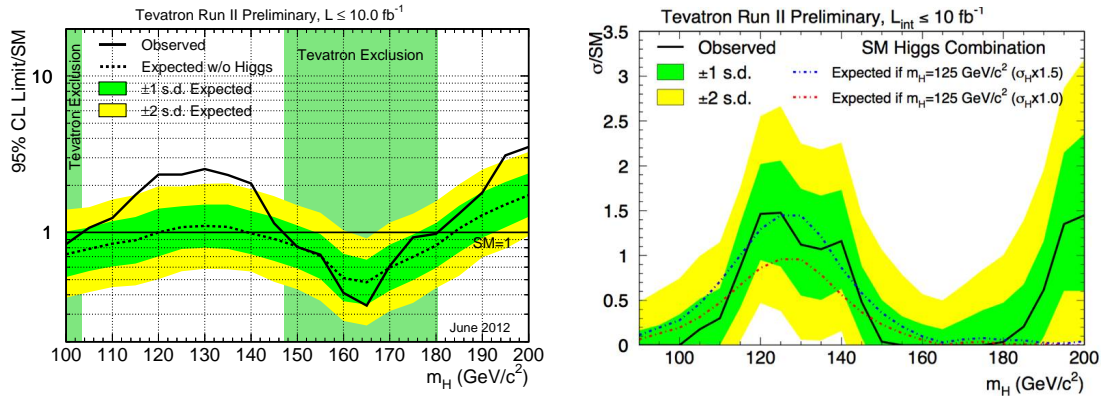


図 4: Tevatron での標準模型ヒッグス粒子探索の結果．左：生成断面積の上限（観測値）の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．右：ヒッグスの信号が存在すると仮定してその生成断面積の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．いずれも，CDF 実験と D0 実験の結果を総合してある．

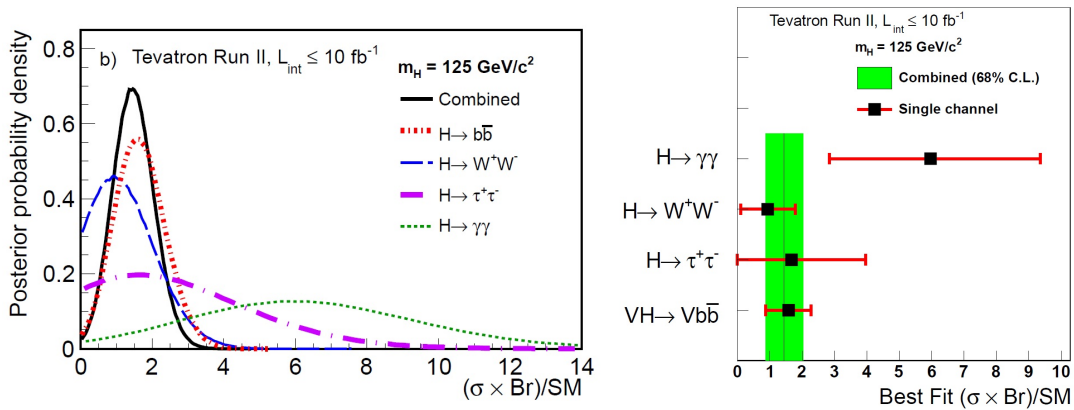


図 5: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．信号を仮定した場合の生成断面積を崩壊様式ごとに示したもの．

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 4 (左) に，生成断面積の上限値と標準理論予言値との比の，CDF 実験と D0 実験のすべてのチャンネルを統合した結果を示す．質量 160 GeV/c² 近辺では，上限値は予言値を下回り，質量領域 $147 < m_H < 180$ 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 125 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同図 (右) に示す．また，ヒッグス粒子の崩壊様式ごとの生成断面積を図 5 に示す．特に， $b\bar{b}$ 対との結合が標準理論の予言と矛盾しないことが示唆される．

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所のLHC加速器 (Large Hadron Collider) は、2011年は重心系エネルギー 7 TeVでの陽子陽子衝突を継続し、10月末までに積算輝度 5.2 fb^{-1} (最大瞬間衝突輝度は $3.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) のデータを収集した。2012年は、8 TeVの衝突エネルギーで 23 fb^{-1} のデータ (最大瞬間衝突輝度は $7.8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を収集した。7月にはそれまでのデータを用いて「新粒子」の発見を発表し、12月には「新粒子がヒッグスと矛盾しない」と発表した。現在は2年弱のシャットダウン中で、再開後は設計エネルギー 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) ヒッグス粒子の発見

質量の起源とされるヒッグス粒子は、素粒子の標準模型では唯一未確認であり、ATLAS実験はその発見を最大の目標としてきた。2011年までのデータでは 2.6σ 程度の兆候がみられたが、データ統計量を増やすことにより新粒子の発見を確立し、2012年末には新粒子がヒッグス粒子の性質と矛盾しないことを示した。

図6および図7は、探索モードのうち、最も感度の良い $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ (ℓ は電子か μ 粒子) および $H \rightarrow \gamma\gamma$ の事象数を終状態の不変質量分布で示したものである。両図において、背景事象数分布 (図6ではシミュレーション分布、図7ではスムーズな分布) に加え $125 \text{ GeV}/c^2$ 辺りに超過が見られる。背景事象のみが統計的にふらついてピークを作る確率はそれぞれ 6.5σ 、 7.4σ であり、これにより新粒子の発見を確立した。

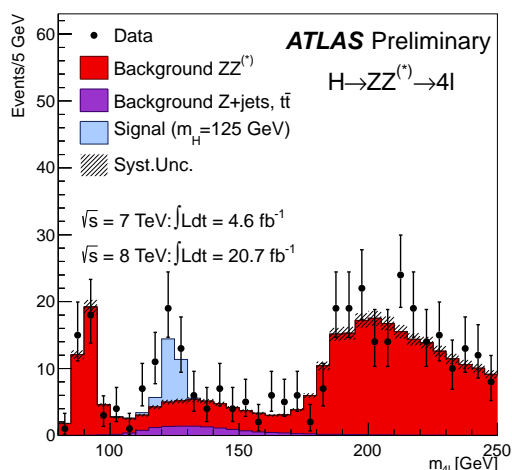


図6: 4レプトン終状態でのヒッグス粒子探索。横軸は4レプトンの不変質量。125 GeV/c^2 近辺を除き、ヒッグスを介さないZZ生成、Zと随伴生成されたジェットの誤認識やトップクォーク対の誤認識による背景事象によりデータを説明できる。

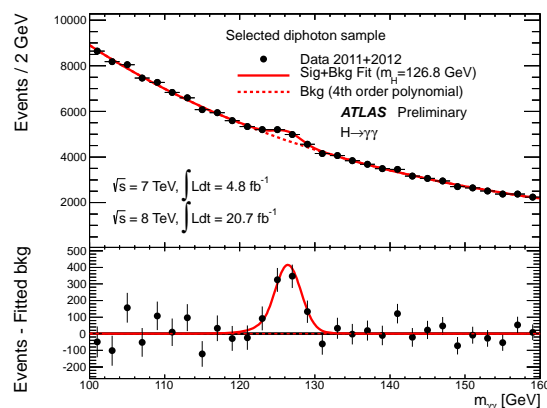


図7: 2光子終状態でのヒッグス粒子探索。横軸は2光子の不変質量。主な背景事象はQCDジェットの誤認識によるものなので、分布は構造を持たないスムーズな曲線で表現できる。下図はスムーズな曲線からのずれの分布で $125 \text{ GeV}/c^2$ 近辺に超過が見られる。

図 8 は、新粒子の質量と生成断面積（標準模型ヒッグスの生成断面積で規格化）の測定値を 2 つの探索モード別および統合したものを示す．中心値にわずかなずれが見られるが、両者は $125.5 \text{ GeV}/c^2$ の統合値となる．

ヒッグス粒子の探索は様々な崩壊モードで行っている．図 9 は $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$ (W または Z を随伴) を含めた 5 モードでの生成断面積の測定結果を示す．前述 2 モードに加え $H \rightarrow WW$ の有意な信号が得られているが、残りの 2 モードでは統計誤差の範囲で信号の有無を判定できない．

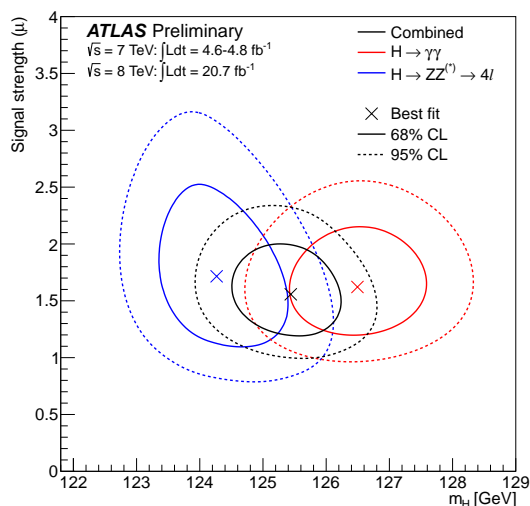


図 8: $H \rightarrow ZZ$ および $H \rightarrow \gamma\gamma$ モードでのヒッグス質量と標準模型で規格化した生成断面積測定値の比較．各測定値には 1σ , 2σ の不確かさの領域が描かれている．

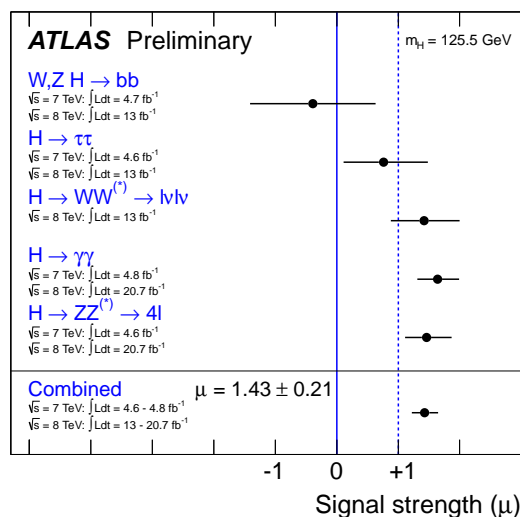


図 9: 5 つの崩壊モードでのヒッグス生成断面積測定のみとめ．横軸は標準模型で規格化した生成断面積で、1 は標準模型と無矛盾、0 は信号無しに対応する．

以上のデータ等より、ATLAS と CMS 実験グループは観測された新粒子がヒッグスの性質（スピン 0、ゲージボソンに質量を与える）と無矛盾であると結論した．但し、標準模型ではヒッグス粒子はフェルミ粒子にも質量を与えるが、その観測の重要性は極めて高い．以下に τ 対に崩壊するモードの探索の現状を示す．

τ 粒子にはハドロン終状態 (τ_h) とレプトン終状態 (τ_ℓ , $\ell=e, \mu$) に崩壊するモードがある．レプトン終状態にはニュートリノが含まれるので τ の再構成精度が限定的でありハドロン終状態では背景事象となるジェット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．

最も感度の良い探索では、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 10 と図 11 はそのような事象選択後の $\tau\tau$ 系の不変質量分布を 7 TeV と 8 TeV の重心系エネルギーごとに示す．事象の多くは、 $Z \rightarrow \tau\tau$ で説明でき、 $125 \text{ GeV}/c^2$ の標準模型ヒッグスを仮定すると数イベントが観測されると予測されるが、現状で生成断面積の測定は限定的である．

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

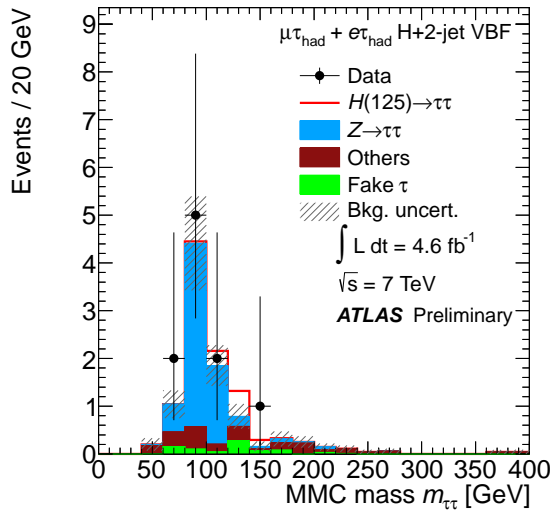


図 10: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布．125 GeV/c^2 ヒッグスと背景事象の予想分布と 7 TeV データとの比較．

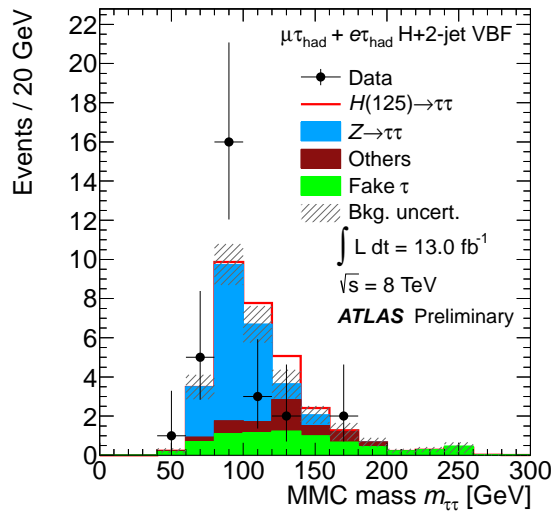


図 11: レプトン+ハドロン終状態での $qq \rightarrow qqH$ 検出に特化した信号選択をした事象の $\tau\tau$ 不変質量の分布．125 GeV/c^2 ヒッグスと背景事象の予想分布と 8 TeV データとの比較．

崩壊 $H \rightarrow \tau\tau$ と $Z + H(\rightarrow bb)$ に注目した解析を継続している．

(2) 標準模型の物理

標準模型粒子の生成断面積測定は、標準模型の検証とともに新粒子探索における背景事象の理解のために重要である．図 12 にいくつかの標準模型粒子の生成断面積を重心系 7 TeV と 8 TeV で測定し、理論計算との比較をしている．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ソ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．

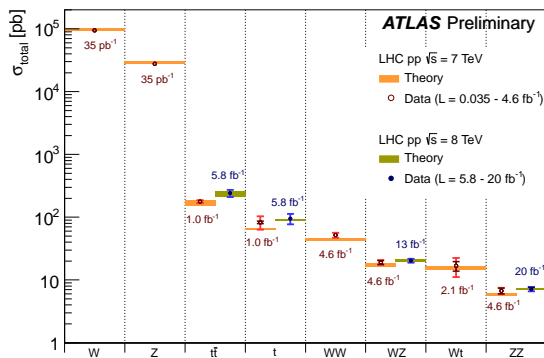


図 12: $\sqrt{s}=7$ TeV と 8 TeV でのいくつかの標準模型粒子生成断面積の測定値と理論予想値との比較．

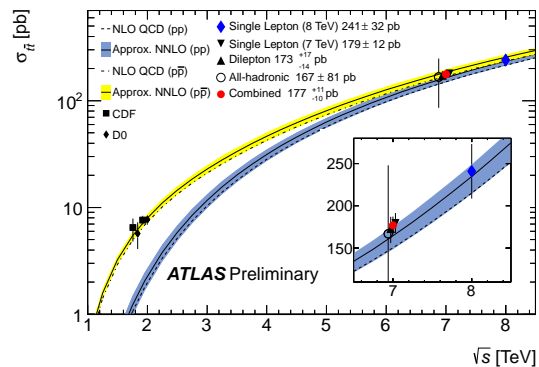


図 13: $t\bar{t}$ 生成断面積のエネルギー依存性の測定値と理論予想値との比較．

トップ対生成断面積については、終状態のモードによっていくつかの測定がなされている

が、いずれも 図 13 に示すように、理論予想と一致した。

(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が生成される期待がありその探索は重要である。

超対称性 (SUSY) は階層性の問題を解決するために最も注目され、対応する SUSY 粒子が 1 TeV の質量領域に存在することが期待されている。また、最も軽い中性 SUSY 粒子は暗黒物質の候補に成り得るので宇宙論にも重要な探索とみなされる。トップの超対称性パートナーであるストップは質量が最も軽いと考えられ、ハドロン衝突器では SUSY が存在するならば最初に発見できる SUSY 粒子と期待されている。図 14 はストップの探索結果であるが、8 TeV においても兆候が見られない。

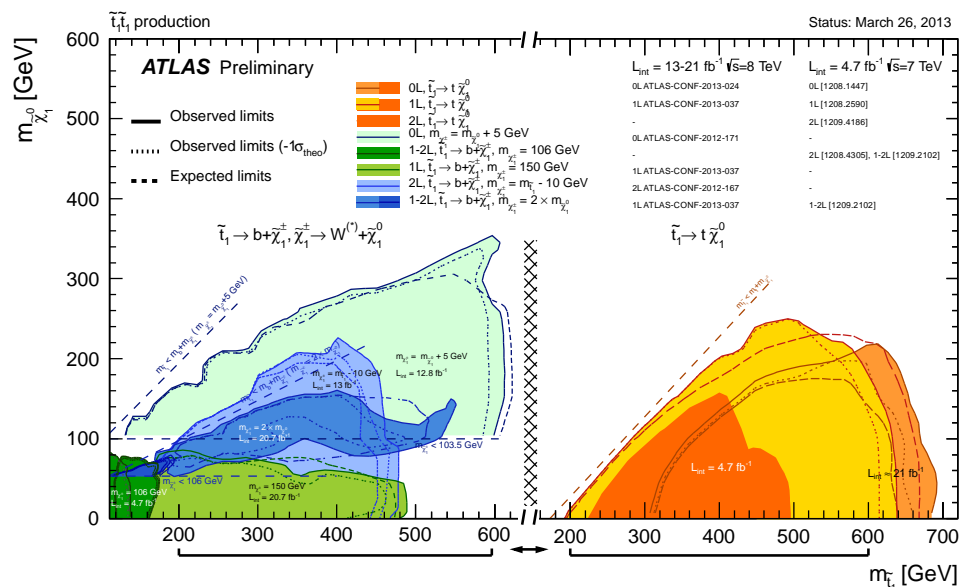


図 14: 95%信頼度での、ストップとニュートラリーノ質量の棄却領域 (左)ストップがチャージノとbクォークに崩壊し、チャージノはWとニュートラリーノに崩壊するモード (右)ストップがトップとニュートラリーノに崩壊するモード。

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 1-4.7 TeV/ c^2 までの質量を棄却した。その他、新しいゲージボソン、新しいクォーク、レプトクォーク、クォーク励起状態など、様々な探索を行ったが、標準模型を超える粒子は観測されていない。

重いこれらの粒子は、重心系エネルギーが高いほど生成されやすく、2015以降の 14 TeV での探索によって発見されることも期待される。

(4) HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC は当初の設計エネルギー (14 TeV) と設計衝突輝度 ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を 2015 年に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) 加速器に増強される．放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大するため、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究も行っている．

HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極、p 型基板を用いたセンサーを開発している．この開発は 7 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、陽子線と中性子線を実際に照射し、HL-LHC の高放射線線量 (1×10^{15} 1-MeV n_{eq}/cm^2) を受けても使用可能な設計を確立した．

現在は最終的な設計段階にあり、2012 年度は、加速器事故で一度に大量の粒子が入射された場合に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た．

(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する全く新しいタイプの検出器である．我々は 2005 年以来 Lapis セミコンダクター社の $0.20\mu m$ SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究を行っている．

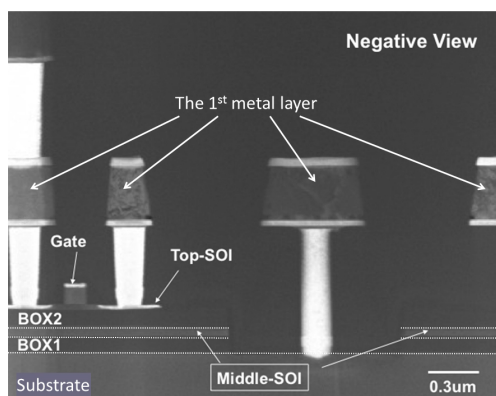


図 15: 新たに開発した 2 重 SOI 基板．FET 用 D-S 電極が BOX2 の上に形成され、最下部の基板に達するピクセル用電極がみられる．

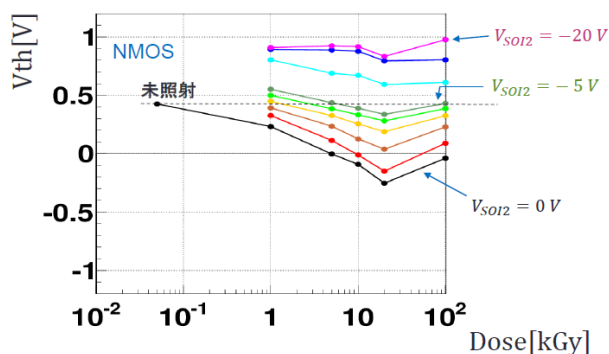


図 16: 2 重 SOI 基板上に形成した FET のしきい値電圧の線量依存性．中間シリコン層の電圧が 0 V のままでは NMOS のしきい値電圧は下がり負になるが、適切な電圧を加えることで補償可能で、どの線量でも初期のしきい値電圧に戻ることを示した．

昨年度までの研究開発で、高速な電荷収集が可能な全空乏化型ピクセル検出器を試作し、素粒子実験での衝突点近傍に設置するピクセル検出器として必要な多重散乱を抑えるために物質量を減らす薄型化の実現を行った．実際に荷電粒子の検出能力をテストビームで実証してきた．SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく、Lapis の FD-SOI プロセスでは、高速応答、広範囲の温度領域でも使用できる特質があるため、さまざまな分野での応用が期待できる．しかし酸化膜は、一方、正孔を蓄積し、電離性放射線線量が増えると蓄積電荷の影響を受けて近傍にあるトランジスタの特性を変化させる

ことが分かっていた．高輝度のハドロン実験に適用するためには，この課題の解決が不可欠である．

今年度は，埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 重 SOI 基板の製作に成功した．図 15 は新たに開発した基板のトランジスタを含む断面図である．粒子センサー部は最下部の基板であるが，その上に中間 SOI シリコン層をはさんで 2 重の埋め込み酸化膜 (BOX) が形成されている．BOX2 の直上にあるトランジスタの性能は BOX2 の帯電により影響を受けるが，中間シリコン層に電圧を加えることでその変化を補償できる．

実際に補償可能であることを確かめるために，いくつかのタイプのトランジスタに $C_{\alpha\gamma}$ 線を照射して，トランジスタ特性の線量依存性を測定した．図 16 は NMOS トランジスタのしきい値電圧の変化を示したものであるが，線量とともにしきい値電圧は減少する．適切な電圧を中間シリコン層に加えることで，未照射の特性に回復できる．トランスコンダクタンス，スイングなどの特性も同様に補償できることを示した．

【3】 ミューオンラジオグラフィによる大規模構造体の内部構造透視

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

炉心から 64 m 離れた位置で測定を行い，7 月末までは核燃料が装填される位置に，11 月末までは燃料プールの位置に焦点をあてて宇宙線の分布を計数した．原子炉全体に対する宇宙線 μ 粒子数分布を図 17 に示す．原子炉構造を再現する GEANT4 シミュレーションとの比較 (図 18) を通じて，測定全期間において，核燃料は装填されておらず，また，燃料格納プールに置かれた核燃料集合体の分布 (図 19) の推算を行った．現在は 2 つの検出器セットでの測定によりステレオ視の有効性を検証している．

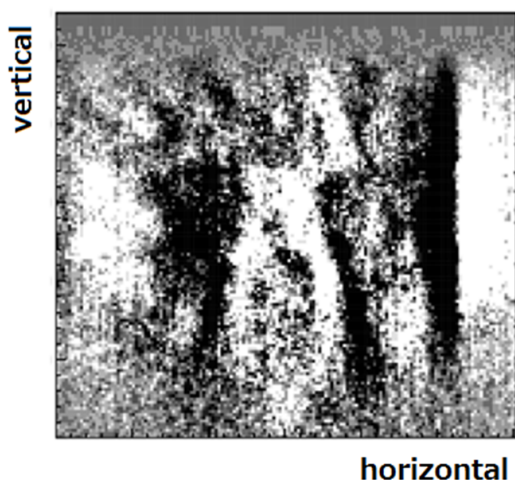


図 17: 原子炉全体に対応する μ 粒子数分布．濃い領域は物質が多いために μ 粒子が吸収され分布が少ない．MARK-II 型原子炉特有なコーン状の格納容器，その内側の円錐状の圧力容器が確認できる．測定期間 100 日のデータで，構造が見易いようにアクセプタンスなどの緩やかに変化する成分はフーリエ解析により除去してある．右端は建屋の壁．

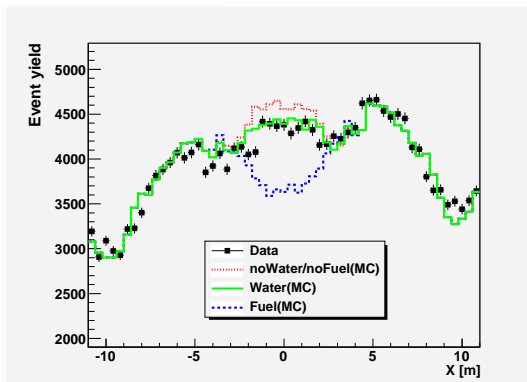


図 18: 核燃料を装填する位置での μ 粒子事象数分布のシミュレーションとの比較．水相当の物質の予想と測定値が一致し，測定期間中は燃料が装填されていないことを示した．

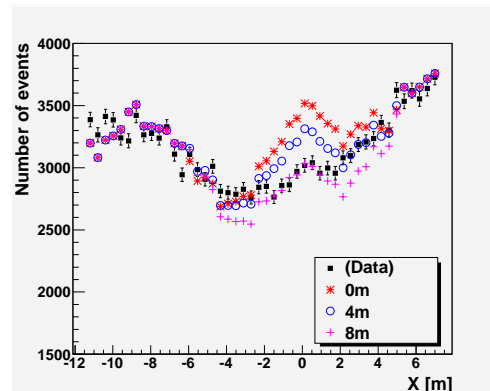


図 19: 燃料格納プール周辺の μ 粒子事象数分布のシミュレーションとの比較．シミュレーションでは燃料集合体の厚さを 0, 4, 8 m の 3 段階で示しているが，幅 6 m に渡り約 6 m から 8 m の厚さで分布していると推算される．

【4】 ILC 実験

次世代のエネルギーフロンティアにおける素粒子実験を遂行するため，重心系エネルギー 500 GeV の電子・陽電子衝突型線形加速器を建設する計画が提案されている．素粒子である電子を衝突に用いるので，加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ，またバックグラウンドの少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる．国際協力により進められているこの計画は ILC 計画と名付けられ，参加各国の大学や研究機関で精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている．ILC 計画は，2012 年 7 月の LHC 実験によるヒッグス粒子と矛盾しない新粒子の発見，ならびに 2012 年 12 月の「国際リニアコライダー (ILC) 計画」の技術設計書の完成と，この年度に大きな進展を迎えた．計画では，その第一期において，重心系エネルギー 250 GeV からスタートし，500 GeV まで増強する．そして，第二期において重心系エネルギー 1 TeV までの加速器増強が想定されている．

ILC 実験では，ゲージボソンやトップクォーク，ヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネルギーを精密に測定することが非常に重要となる．ジェットに対するエネルギー分解能は， $\sigma(E)/E = 0.3/\sqrt{E(\text{GeV})}$ が要求されており，この要求値を実現するため，Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネルギー測定方法が提唱されている．この方法を用いるには，カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネルギー分解能に加え，非常に細かいセルに分割された構造を有することが要求される．

現在筑波大学グループでは，KEK，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が考えられている (図 20)．

シンチレータは非常に細かいセル構造が要求されるため，読み出しのために膨大な数の光センサーが必要となる上，磁場中で使用されることもあり，非常にコンパクト且つ低コストで磁場の影響を受けないという特徴を持つ，新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が，現状では光センサーのほぼ唯一解である．

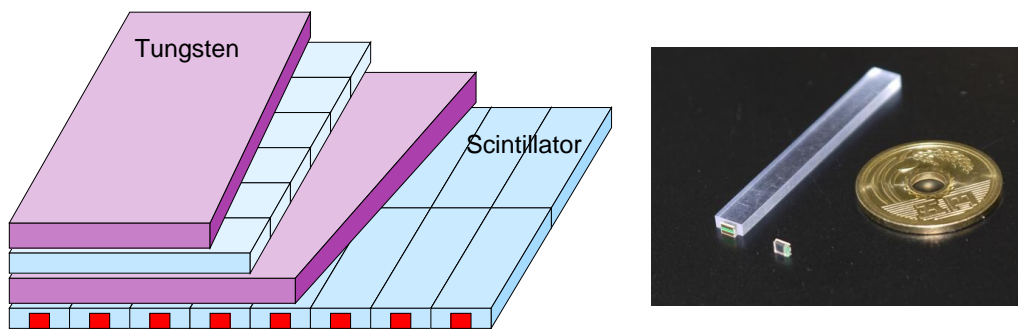


図 20: ILC(ILD) 検出器の電磁カロリメータ候補の一つ．カロリメータは，吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており，シンチレータ層は，シンチレータストリップ (43.5mm × 5mm × 2mm) を横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている．

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

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．我々は，1600 ピクセルと 2500 ピクセルの MPPC の線形応答性を比較し，2500 ピクセルのものが入射光子数に対し実際により広い範囲で線形応答性に優れていることを確かめた．更に MPPC の応答回復時間は，ピクセルの静電容量とクエンチング抵抗で決まっていることを確認し，2500 ピクセルの MPPC は，より早い応答回復時間をもっていることが分かった．これは，シンチレータの発光時間構造を考慮すると，MPPC とシンチレータを組み合わせて使用したときにセンサーの線形応答性に対し，より有利に働くことを示唆している．また，カロリメータの分解能を決めるもうひとつの大きな要因は，シンチレータストリップ内の応答一様性である．我々は，これについても ^{90}Sr β 線源を用い，荷電粒子の MIP 通過に対する応答を MPPC とシンチレータの組み合わせを用いて実測した．(図 21)

シンチレータ内発光位置が MPPC 受光領域を見込む面積が大きく変化する MPPC 読み出し端周辺部を除き，シンチレータストリップの出力光電子数は，およそ 13 光電子数程度となることが分かった．今後は，このデータをもとにシミュレーションを行い，シンチレータストリップの形状，MPPC の仕様の最適化を図っていく．

【5】 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ひろく行われてきた．これは超伝導体が半導体と比較してはるかに小さいエネルギーバンドギャップを有することを利用して，半導体検出器などの既存の光検出器に比べてエネルギー分解能がはるかに高い光検出器を原理的に実現できることが強い動機となっている．このことから，高エネルギー分解能の X 線検出器や赤外線検出器への応用を目指して開発が進められてきた．

本開発研究では，ニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標として従来用いられている Nb (超伝導ギャップエネルギー $\Delta=1.55\text{meV}$, $T_c = 9.23\text{ K}$) を用いた Nb/Al-STJ やさら

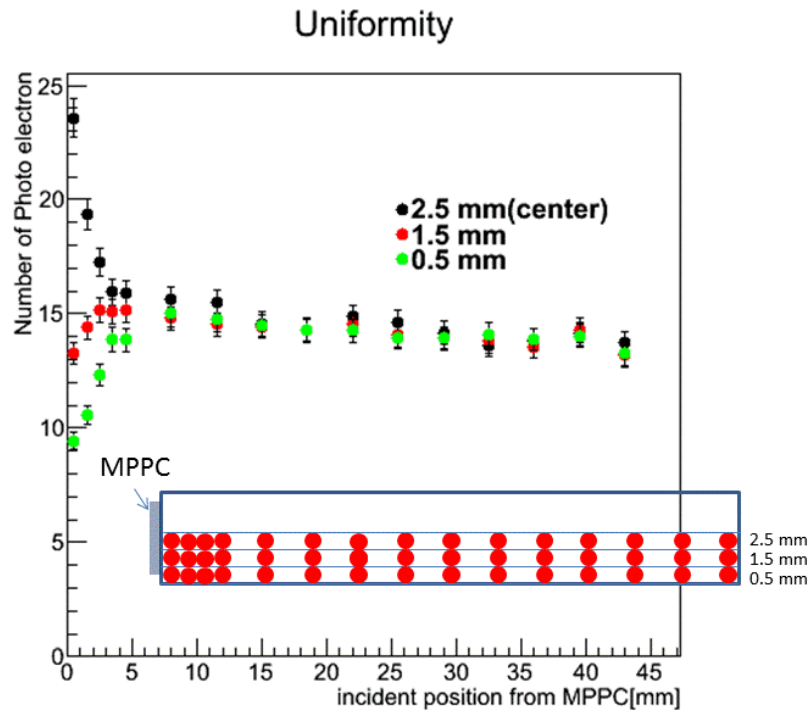


図 21: シンチレータ (43.5mm × 5mm × 2mm) + MPPC (有効受光面積 1mm × 1mm) の出力光電子数の荷電粒子 MIP 通過位置依存性

に Δ の小さい Hf ($\Delta=0.020$ 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検出器 (STJ) の開発を目指している。

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, ν_1) 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結合の 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、 $110/\text{cm}^3/\text{世代}$ 程度存在すると予測されている宇宙背景ニュートリノを用いる。

ニュートリノの二体崩壊で生成する光子のエネルギーを $\sim 25\text{meV}$ とすると背景雑音となる赤外線背景放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、 25 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。

我々は、2007年1月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学、KEK、理研の共同研究によって、Hf-STJ 開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法の確立を行い、2010 年度には、Hf-HfO_x-Hf による SIS 構造の作成に成功し、ジョセフソン電流を確認した。リーク電流が大きいため目標とする検出器として動作させるには、更に改善の必要があるが、可視光に対する光応答のテストを開始した。(図 22 (左))

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 のギャップエネルギーを考慮すると、我々が目標としている 25 meV の光子に対して Nb/Al-STJ 単体では、十分なエネルギー分解能を得られない。そこで、分光は回折格子を用い Nb/Al-STJ の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、25 meV (波長 50 μm) の一光子を検出することであるが、現在は可視光、近赤外光の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 22 (右))

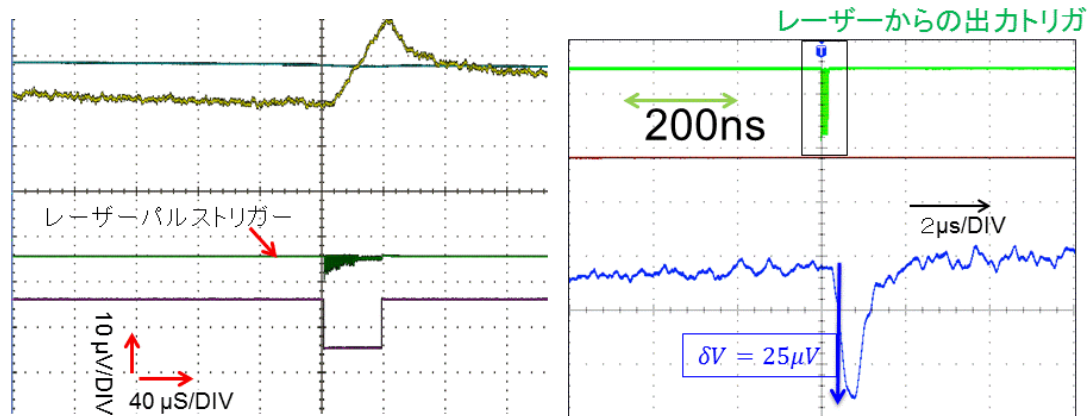


図 22: 可視光 (波長 470 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Hf-STJ の信号出力 (左図) . 近赤外光 (波長 1310 nm) の大光量レーザ光パルスに対する Nb/Al-STJ の信号出力 (左図) .

図 22 右は、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、低ノイズ、極低温読み出し回路の開発を進めている。

【6】 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: 15,000 千円, 旅費: 5,000 千円
2. 日米科学技術協力事業「ニュートリノ崩壊探索」
共同研究 (日本側参加機関: 筑波大物理, 宇宙航空研究開発機構, 高エネルギー加速器研究機構, 岡山大理, 理化学研究所, 福井大工, 近畿大理工. 日本側研究代表者: 金 信弘)
物件費: 5,000 千円, 旅費: 1,500 千円
3. KEK 大学等連携支援事業「筑波大-KEK 連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて」
共同代表者: 守友 浩, 金 信弘, 末木啓介
物件費: 12,000 千円 (うち素粒子実験分: 4,000 千円)
4. 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) 780 千円 (直接経費 600 千円, 間接経費 180 千円)
5. 科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型)
研究課題: 「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」
研究分担者: 受川 史彦
13,000 千円 (直接経費: 10,000 千円, 間接経費: 3,000 千円)
6. 科学研究費補助金 基盤研究 A: 「SOI 技術による高レート実験用薄型ピクセル検出器の研究」
研究分担者: 原 和彦
(直接経費: 300 千円, 間接経費: 90 千円)

【7】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Search for a heavy vector boson decaying to two gluons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], *Phys. Rev. D* **86**, 112002 (2012).
2. “Measurements of the Top-quark Mass and the $t\bar{t}$ Cross Section in the Hadronic $\tau +$ Jets Decay Channel at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **109**, 192001 (2012).
3. “Measurement of the Bottom-Strange Meson Mixing Phase in the Full CDF Data Set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **109**, 171802 (2012).

4. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with top quarks using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 181802 (2012).
5. “Transverse momentum cross section of e^+e^- pairs in the Z -boson region from $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 052010 (2012).
6. “Precision Top-Quark Mass Measurements at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 152003 (2012).
7. “Evidence for a particle produced in association with weak bosons and decaying to a bottom-antibottom quark pair in Higgs boson searches at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).
8. “Search for a Higgs boson in the diphoton final state using the full CDF data set from proton-antiproton collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **717**, 173 (2012).
9. “Novel inclusive search for the Higgs boson in the four-lepton final state at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 072012 (2012).
10. “Search for Neutral Higgs Bosons in Events with Multiple Bottom Quarks at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **86**, 091101 (2012).
11. “Measurement of the difference of CP-violating asymmetries in $D^0 \rightarrow K^+K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111801 (2012).
12. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a $b\bar{b}$ pair in events with no charged leptons and large missing transverse energy using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111805 (2012).
13. “Combined search for the standard model Higgs boson decaying to a $b\bar{b}$ pair using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111802 (2012).
14. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a $b\bar{b}$ pair in events with two oppositely-charged leptons using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111803 (2012).
15. “Search for the standard model Higgs boson decaying to a $b\bar{b}$ pair in events with one charged lepton and large missing transverse energy using the full CDF data set,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 111804 (2012).
16. “Combination of the top-quark mass measurements from the Tevatron collider,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **86**, 092003 (2012).
17. “Measurement of CP-violation asymmetries in $D^0 \rightarrow K_S\pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032007 (2012).
18. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a W^\pm boson with 7.5 fb^{-1} integrated luminosity at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032011 (2012).
19. “Diffractive Dijet Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 032009 (2012).
20. “Measurement of $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)+}D_s^{(*)-}$ Branching Ratios,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 201801 (2012).
21. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a Z Boson in 7.9 fb^{-1} of p anti- p collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **715**, 98 (2012).

22. “Search for Scalar Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], JHEP **1210**, 158 (2012).
23. “Search for a heavy particle decaying to a top quark and a light quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211805 (2012).
24. “A Search for dark matter in events with one jet and missing transverse energy in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211804 (2012).
25. “Precise measurement of the W -boson mass with the CDF II detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 151803 (2012).
26. “Measurement of the WZ Cross Section and Triple Gauge Couplings in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 031104 (2012).
27. “Search for a dark matter candidate produced in association with a single top quark in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 201802 (2012).
28. “Combination of CDF and D0 measurements of the W boson helicity in top quark decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF and D0 Collaborations], Phys. Rev. D **85**, 071106 (2012).
29. “Search for anomalous production of multiple leptons in association with W and Z bosons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 092001 (2012).
30. “Search for a low mass Standard Model Higgs boson in the $\tau-\tau$ decay channel in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 181804 (2012).
31. “Measurement of the Top Quark Mass in the All-Hadronic Mode at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **714**, 24 (2012).
32. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson Using a Matrix Element Technique at CDF in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 072001 (2012).
33. “Measurement of the branching fraction $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-)$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032003 (2012).
34. “Measurement of the masses and widths of the bottom baryons Σ_b^{+-} and Σ_b^{*+-} ,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 092011 (2012).
35. “Measurement of ZZ production in leptonic final states at \sqrt{s} of 1.96 TeV at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 101801 (2012).
36. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 052002 (2012).
37. “Measurement of the CP-Violating Phase $\beta_s^{J/\Psi\phi}$ in $B_s^0 \rightarrow J/\Psi\phi$ Decays with the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 072002 (2012).
38. “Measurements of Angular Distributions of Muons From Υ Meson Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 151802 (2012).
39. “Search for new phenomena in events with two Z bosons and missing transverse momentum in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 011104 (2012).

40. “Observation of Exclusive Gamma Gamma Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 081801 (2012).
41. “Measurement of CP-violating asymmetries in $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ and $D^0 \rightarrow K^+K^-$ decays at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012009 (2012).
42. “An additional study of multi-muon events produced in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **710**, 278 (2012).
43. “Search for high-mass resonances decaying into ZZ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012008 (2012).
44. “Evidence for the charmless annihilation decay mode $B_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 211803 (2012).
45. “Search for a Higgs Boson in the Diphoton Final State in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 011801 (2012).
46. “Search for heavy metastable particles decaying to jet pairs in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012007 (2012).
47. “Search for $WZ + ZZ$ production with MET + jets with b enhancement at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 012002 (2012).
48. “Measurements of the Angular Distributions in the Decays $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108**, 081807 (2012).
49. “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], Phys. Rev. D **85**, 091101 (2012).
50. “Search for Higgs Bosons Produced in Association with b -quarks,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032005 (2012).
51. “Search for the Rare Radiative Decay: $W \rightarrow \pi\gamma$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **85**, 032001 (2012).
52. “Production of Λ , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm and Ω^\pm Hyperons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **86**, 012002 (2012).
53. “Multi-channel search for squarks and gluinos in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions 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. **C73** 2362 (2013).
54. “ A Search for Prompt Lepton-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. **B719** 299 (2013).
55. “Search for charged Higgs bosons through the violation of lepton universality in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **03** 076 (2013).
56. “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the τ +jets channel using the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phts. J. **C73** 2328 (2013).
57. “Measurement of Υ production in 7 TeV pp collisions at ATLAS” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D 87** 052004 (2013).

58. “Search for the neutral Higgs bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model 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 **02** 095 (2013).
59. “Measurement of angular correlations in Drell-Yan lepton pairs to probe Z/γ^* boson transverse momentum at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B720** 32 (2013).
60. “Search for new phenomena in events with three charged leptons 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 87** 052002 (2013).
61. “Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and ZZ γ couplings with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **03** 128 (2013).
62. “Search for resonances decaying into top-quark pairs using fully hadronic decays in pp collisions with ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **03** 116 (2013).
63. “Measurement of isolated-photon pair production 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 **03** 086 (2013).
64. “Searches for heavy long-lived sleptons and R-hadrons 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.* ,
Phys. Lett. **B720** 277 (2013).
65. “Search for contact interactions and large extra dimensions in dilepton events 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. **D87** 015010 (2013).
66. “Search for supersymmetry in events with photons , bottom quarks , and missing transverse momentum in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B719** 261 (2013).
67. “Search for long-lived , heavy particles in final states with a muon and multi-track displaced vertex in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B719** 280 (2013).
68. “A Massive Particle Consistent with the Standard Model Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Science **338** 6114 , 1576.
69. “A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ 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. **B719** 242 (2013).

70. “Measurement of Z boson production in Pb+Pb 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. Rev. Lett. **110** 022301 (2013).
71. “Jet energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV recorded in 2010 with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C73** 2306 (2013).
72. “Search for pair production of a heavy top-like quarks decaying to a high- p_T W boson and a b quark in the lepton plus jets final state at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B718** 1284 (2013).
73. “Search for doubly-charged Higgs bosons in like-sign dilepton final states 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. **C72** 2244 (2012).
74. “Search for anomalous production of prompt like-sign lepton pairs 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 **12** 007 (2012).
75. “Search for pair-produced massive coloured scalars in four-jet final states with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C73** 2263 (2012).
76. “Search for pair production of massive particles decaying into three quarks 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.* ,
JHEP **12** 086 (2012).
77. “Search for dark matter and large extra dimensions in events with a jet and missing transverse momentum with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **12** 075 (2012).
78. “Search for R-parity-violating supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **12** 124 (2012).
79. “Search for direct chargino production in anomaly-mediated supersymmetry breaking models based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **01** 131 (2013).
80. “ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **01** 029 (2013).
81. “Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum , Jets , and at Least One Tau Lepton in 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. **C72** 2215 (2012).

82. “Measurement of the flavour composition of dijet events 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. **C72** 2301 (2012).
83. “Search for Displaced Muonic Lepton Jets from light Higgs boson decay 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. **B721** 32 (2013).
84. “Search for top-jet resonances in the lepton+jets channel of $t\bar{t}$ + jets events with the ATLAS detector in 4.7 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D86** 091103 (2012).
85. “ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino 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** 2241 (2012).
86. “Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a photon and missing transverse momentum in pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **110** 011802 (2013).
87. “Search for a heavy top-quark partner in final states with two leptons with the ATLAS detector at the LHC ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **11** 094 (2012).
88. “Search for high-mass resonances decaying to dilepton final states 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 **11** 138 (2012).
89. “Search for light top squark pair production in final states with leptons and b-jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B720** 13 (2013).
90. “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Momentum in 5 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. **B718** 411 (2013).
91. “Measurements of the pseudorapidity dependence of the total transverse energy in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **11** 033 (2012).
92. “Further search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with jets , missing transverse momentum and isolated leptons with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **86** 092002 (2012).
93. “Search for light scalar top quark pair production in final states with two leptons 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2237 (2012).

94. “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B718** 841 (2013).
95. “Search for new phenomena in the WW to $\ell\nu\ell'\nu'$ final state 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. **B718** 860 (2012).
96. “Search for direct slepton and gaugino production in final states with two leptons and missing transverse momentum with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B718** 879 (2012).
97. “Search for direct top squark pair production in final states with one isolated lepton , jets , and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 4.7 fb^{-1} of ATLAS data ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **109** 211803 (2012).
98. “Measurement of the Jet Size Dependence of Inclusive Jet Suppression 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. **B719** 220 (2013).
99. “Measurement of WZ Production 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2173 (2012).
100. “Search for a supersymmetric partner to the top quark in final states with jets and missing transverse momentum 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. **109** 211802 (2012).
101. “Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using 4.7 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collision data” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D87** 012008 (2013).
102. “Time dependent angular analysis of the decay $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ and extraction of $\Delta\Gamma_s$ and the CP-violating weak phase ϕ_s by ATLAS” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **12** 072 (2012).
103. “ Underlying event characteristics and their dependence on jet size of charged-particle jet events 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. **D86** 072004 (2012).
104. “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B716** 1 (2012).
105. “Search for magnetic monopoles in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **109** 261803 (2012).
106. “Measurements of top quark pair relative differential cross-sections 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. **C73** 2261 (2013).

107. “Search for top and bottom squarks from gluino pair production in final states with missing transverse energy and at least three b-jets with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2174 (2012).
108. “A search for $t\bar{t}$ resonances in lepton+jets events with highly boosted top quarks collected 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 **09** 041 (2012).
109. “Measurement of the Λ_b lifetime and mass in the ATLAS experiment” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D 87** 032002 (2013).
110. “Combined search for the Standard Model Higgs boson 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. **D86** 032003 (2012).
111. “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b-quark pair with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B718** 369 (2012).
112. “Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$ decay channel 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. **B718** 391 (2012).
113. “Search for the Standard Model Higgs boson in the H to $\tau^+\tau^-$ decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **09** 070 (2012).
114. “ATLAS measurements of the properties of jets for boosted particle searches ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D 86** 072006 (2012).
115. “Search for a Standard Model Higgs in the mass range 200-600 GeV in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ with with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B717** 70 (2012).
116. “Measurement of the b-hadron production cross section using decays to $D^*\mu X$ final states 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.* ,
Nucl. Phys. **B 864** 341 (2012).
117. “Measurement of event shapes at large momentum transfer 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** 2211 (2012).
118. “Hunt for new phenomena using large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS in 4.7fb^{-1} of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **07** 167 (2012).
119. “Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay mode with 4.7fb^{-1} of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B716** 62 (2012).

120. “A search for flavour changing neutral currents in top-quark decays in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **09** 139 (2012).
121. “Search for a Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\nu\nu$ decay channel using 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B717** 29 (2012).
122. “Evidence for the associated production of a W boson and a top quark in ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B716** 142 (2012).
123. “A search for ttbar resonances with the ATLAS detector in 2.05 fb⁻¹ of proton-proton 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** 2083 (2012).
124. “Measurement of the t-channel single top-quark production 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. Lett. **B717** 330 (2012).
125. “Measurement of W γ and Z γ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous triple gauge couplings with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B717** 49 (2012).
126. “Measurement of W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **06** 088 (2012).
127. “Measurement of the top quark pair cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using final states with an electron or a muon and a hadronically decaying tau lepton ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B717** 89 (2012).
128. “Search for tb resonances 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. **109** 081801 (2012).
129. “Search for a fermiophobic Higgs boson in the diphoton decay channel with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2157 (2012).
130. “Search for Lepton Flavour Violation in the $e\mu$ Continuum 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2040 (2012).
131. “Measurement of tau polarization in $W \rightarrow \tau\nu$ decays 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** 2062 (2012).
132. “Search for Scalar Top Quark Pair Production in Natural Gauge Mediated Supersymmetry Models 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.* ,
Phys. Lett. **B715** 44 (2012).

133. “ Search for supersymmetry in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **108** 261804 (2012).
134. “Search for TeV-scale Gravity Signatures in Final States with Leptons and Jets with the ATLAS Detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B716** 122 (2012).
135. “Search for supersymmetry with jets , missing transverse momentum and at least one hadronically decaying tau lepton 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. **B714** 194 (2012).
136. “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^+ \rightarrow \tau + \nu$ in $t\bar{t}$ events using 4.6 fb^{-1} of pp collision data 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 **06** 039 (2012).
137. “Search for resonant WZ production in the WZ to $\ell\nu\ell'\ell'$ channel in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D85** 112012 (2012).
138. “Search for pair production of a new quark that decays to a Z boson and a bottom quark with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **109** 071801 (2012).
139. “Search for the decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B713** 387 (2012).
140. “Search for Events with Large Missing Transverse Momentum , Jets , and at Least Two Tau Leptons in 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. **B713** 180 (2012).
141. “Measurement of the WW cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS and limits on anomalous gauge couplings” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B712** 289 (2012).
142. “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D85** 112006 (2012).
143. “Search for gluinos in events with two same-sign leptons , jets and missing transverse momentum 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.* ,
Phys. Rev. Lett. **108** 241802 (2012).
144. “Measurement of the Top Quark Mass with the Template Method in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton+jets Channel using ATLAS Data” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2046 (2012).
145. “Search for heavy neutrinos and right-handed W bosons in events with two leptons and 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. **C72** 2056 (2012).

146. “Measurement of $t\bar{t}$ 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2043 (2012).
147. “Jet mass and substructure of inclusive jets in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **05** 128 (2012).
148. “Determination of the strange quark density of the proton from ATLAS data on $W \rightarrow l\nu$ and $Z \rightarrow \ell\ell$ cross-sections” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **109** 012001 (2012).
149. “Observation of spin correlation in $t\bar{t}$ events from 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. Rev. Lett. **108** 212001 (2012).
150. “Measurement of the charge asymmetry in top quark pair production 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2039 (2012).
151. “Measurement of inclusive two-particle angular correlations in pp collisions 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. **C72** 157 (2012).
152. “Measurement of the azimuthal anisotropy for charged particle production in $\sqrt{s}_{NN} = 2.76$ TeV lead-lead collisions with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **C86** 014907 (2012).
153. “Search for second 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.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2151 (2012).
154. “Forward-backward correlations and charged-particle azimuthal distributions in pp interactions using the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **07** 019 (2012).
155. “Measurement of the production cross section of an isolated photon associated with jets 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. **D85** 092014 (2012).
156. “Measurement of the polarisation of W bosons produced at large momentum transfer in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 2001 (2012).
157. “Search for a light Higgs boson decaying to long-lived weakly-interacting particles 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** 251801 (2012).
158. “Single hadron response measurement and calorimeter jet energy scale uncertainty 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. **C73** 2305 (2012).

159. “Search for new particles decaying to ZZ using final states with leptons and jets 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. **B712** 331 (2012).
160. “Measurement of the azimuthal ordering of charged hadrons with the ATLAS detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D86** 052005 (2012).
161. “Search for FCNC single top-quark production 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. **B712** 351 (2012).
162. “Search for down-type fourth generation quarks with the ATLAS Detector in events with one lepton and hadronically decaying W bosons” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **109** 032001 (2012).
163. “Measurement of the cross section for top-quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using final states with two high-pT leptons” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
JHEP **05** 059 (2012).
164. “Search for anomaly-mediated supersymmetry breaking with the ATLAS detector based on a disappearing-track signature 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** 1993 (2012).
165. “Search for pair-produced heavy quarks decaying to Wq in the two-lepton channel at ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. **D86** 012007 (2012).
166. “Search for Pair Production of a Heavy Up-Type Quark Decaying to a W Boson and a b Quark in the Lepton+Jets Channel with the ATLAS Detector ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Rev. Lett. **108** 261802 (2012).
167. “ 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.* ,
Phys. Rev. Lett. **108** 111803 (2012).
168. “Search for Contact Interactions in Dilepton Events 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. Lett. **B712** 40 (2012).
169. “Search for decays of stopped , long-lived particles from 7 TeV pp collisions with the ATLAS detector” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C72** 1965 (2012).
170. “Search for excited leptons 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. **D85** 072003 (2012).
171. “Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in the single lepton channel” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Phys. Lett. **B711** 244 (2012).

172. “Study of jets produced in association with a W boson 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. **D85** 092004 (2012).
173. “Measurement of inclusive jet and dijet production 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.* ,
Phys. Rev. **D86** 014022 (2012).
174. “Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV ” ,
ATLAS Collaboration , G. Aad , K. Hara , S.H. Kim , K. Nagai , F. Ukegawa *et al.* ,
Eur. Phys. J. **C73** 2304 (2012).
175. “Search for Production of Resonant States in the Photon-Jet Mass Distribution using pp Collisions 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. Rev. Lett. **108** 211802 (2012).
176. “Measurement of the inclusive W^{+-} and Z/γ cross sections in the electron and muon decay channels 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. **D85** 072004 (2012).
177. “Evaluation of slim-edge , multi-guard , and punch-through-protection structures before and after proton irradiation ” , S. Mitsui , K. Hara *et al.* , Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)36.
178. “Development of novel n+-in-p silicon planar pixel sensors for HL-LHC ” , Y. Unno , K. Hara *et al.* , Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)72.
179. “Evaluation of novel KEK/HPK n-in-p pixel sensors for ATLAS upgrade with testbeam ” , R. Nagai , K. Hara *et al.* , Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)78.
180. “Development of a silicon-microstrip super module prototype for the high luminosity LHC” , A. Clark *et al.* , Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)97.
181. “Electrical performance of a silicon micro-strip super-module prototype for the High-Luminosity LHC collider” , S. Gonzalez-Sevilla , K. Hara *et al.* , Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013) 102.
182. 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. 倉田 正和: “DLM を用いた WH チャンネルで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 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町 .
2. 佐藤 構二: “ W ボソン対に崩壊する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 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町 .
3. 武内 勇司: “トップ対生成におけるスピン相関と前後方非対称性,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町 .
4. 金 信弘: “CDF 実験のフレーバー物理,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2012 (2012年7月6日-8日), 奈良県吉野郡吉野町 .

5. 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 III,”
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学 .
6. 倉田 正和: “CDF 実験における Dynamical Likelihood Method を用いた標準理論ヒッグス粒子の探索,”
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学 .
7. 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探索
日本物理学会 2012 年秋大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
8. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における W ボソンを伴うジェット生成事象の断面積測定
日本物理学会 2012 年秋大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学.
9. 埴慶太: LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton} + \text{hadron}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子探索
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
10. 木内健司: LHC-ATLAS 実験における $ZH \rightarrow \nu\nu bb$ 過程を用いたヒッグス粒子探索のための信号/背景選択最適化
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
11. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における W ボソンを伴うジェット生成事象の断面積測定
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
12. 伊藤史哲: 宇宙線ミュオン・ラジオグラフィック・システムを用いた原子炉内構造の測定
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
13. 本多俊介: 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価
日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学.
14. 伊藤史哲: 宇宙線ミュオン・ラジオグラフィック・システムを用いた原子炉内構造の測定
SAT テクノロジー・ショーケース (2013 年 1 月 22 日), つくば市.
15. 武内勇司: ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発 (Hf-STJ 他),
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012 年 4 月 17 日), 高エネルギー加速器研究機構
16. 金信弘: Search for Neutrino Decay ,
日米合同委員会 (2012 年 4 月 18 日), 湘南国際村センター
17. 笠原宏太: ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発,
日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学東広島キャンパス
18. 永田和樹: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf 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 68 回年次大会 (2013 年 3 月 26 日-29 日), 広島大学東広島キャンパス
19. 笠原宏太: SOI 基板上への STJ の形成「SOI-STJ」,
LAPIS meeting(2013 年 1 月 30 日), ラピスセミコンダクター横浜テクノロジーセンター
20. 金井伸也, 永田和樹, 笠原宏太, 奥平琢也: ニュートリノ崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発,
SAT テクノロジー・ショーケース 2013 インデクシング・ポスター発表 (2013 年 1 月 12 日),
つくば国際会議場
21. 武内勇司: STJ developments for FIR photon spectroscopy at Tsukuba ,
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012 年 12 月 18 日), 高エネルギー加速器研究機構
22. 金井伸也: 遠赤外光分光のための NbAl-STJ の性能評価
日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 11 日-14 日), 京都産業大学
23. 武内勇司: 超伝導トンネル接合検出器 ,
LAPIS meeting(2012 年 8 月 24 日), ラピスセミコンダクター横浜テクノロジーセンター

24. 武内勇司：赤外線観測ロケット実験による宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験，
「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
2012，(2012年7月26日)，高エネルギー加速器研究機構研究本館小林ホール
25. 武内勇司：ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発 (Hf-STJ 他)，
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー (2012年4月17日)，高エネルギー加速器研究
機構

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Koji Sato, “Higgs Searches at the Tevatron,”
Standard Model @ LHC 2012, April 10 - 13, 2012, Copenhagen, Denmark.
2. Hideki Miyake, “CDF results on the search for rare $B_d, B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $X_s\mu^+\mu^-$ decays,”
ICHEP 2012, 36th International Conference on High Energy Physics, July 4 - 11, 2012,
Melbourne, Australia.
3. K. Hara, “Consideration of a Possible Detector at Fukushima Daiichi”, Muon Imaging
Workshop, May 22-25, 2012, KEK, Japan.
4. K. Hara and Y. Ikegami, “Silicon Strip Detectors for ATLAS at the HL-LHC Upgrade”,
PIXEL2012 Int. Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging,
Sep. 3-7, 2012, Inawashiro, Japan.

(4) 会議・研究会報告書

1. S. Kim *et al.* :
“Development of superconducting tunnel junction photon detector using Hafnium”,
Physics Procedia 37, 667-674 (2012) (Proceedings of TIPP2011)
2. K. Hara *et al.* :
“Design of Punch-Through Protection of Silicon Microstrip Detector against Accelerator
Beam Splash”,
Physics Procedia 37, 838-843 (2012) (Proceedings of TIPP2011)
3. Y. Takahashi, K. Hara, S. Kim *et al.*:
“Performance of p-bulk microstrip sensors under $^{60}\text{Co}\gamma$ irradiation at rates expected at the
HL-LHC”,
Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013) 107 (Proceedings of HSTD8)
4. K. Hara *et al.*:
“CDF silicon tracking detectors, 1988-2011”,
Nucl. Instr. and Meth. A699 (2013)84 (Proceedings of HSTD8)
5. 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.

(5) 学位論文

博士論文

1. 埴 慶太: Search for the Standard Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs with the ATLAS
Detector (ATLAS 実験における H 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索),
数理解析科学研究所物理学専攻, 2013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，2013年2月．

1. 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光検出器の研究開発
2. 金井 伸也: 遠赤外光探索のためのニオブを用いた超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の研究開発
3. 石橋 貴生: 二重 SOI 層構造を持つ大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器の性能評価
4. 淵 遼亮: ILC 用細分割電磁カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究

【構成員の異動】

1. 2012年9月に倉田正和研究員が高エネルギー加速器研究機構研究員に転出．
2. 2013年3月に永井康一研究員が CERN 研究員へ転出．

III. 宇宙物理理論グループ

1. メンバー

教授	梅村 雅之
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
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)
学生	大学院生 12名 学類生 1名

2. 概要

本年度、当グループスタッフは、FIRSTプロジェクトを推し進めると共に、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、系外惑星における光合成アンテナ機構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。

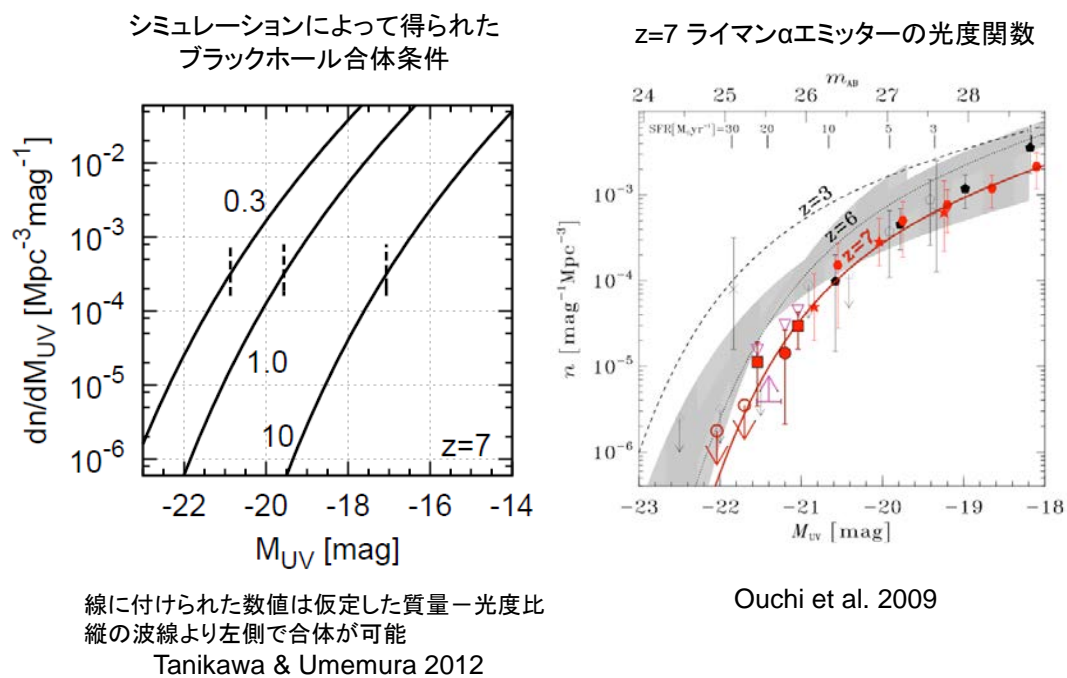
3. 研究成果

【1】一般相対論的 N 体計算による巨大ブラックホール合体過程

巨大ブラックホールは銀河中心に観測され、ブラックホール質量は銀河バルジ質量の約 1/1000 になっているという“ブラックホール-バルジ質量関係”が見出されている (Kormendy & Richstone 1995; Magorrian et al. 1998; Merrifield et al. 2000; Merritt & Ferrarese 2001, Marconi & Hunt 2003)。これは、巨大ブラックホール形成が、銀河バルジ形成史と密接に関係し、ブラックホール質量を決める普遍的な物理メカニズムが存在したことを示唆する。宇宙の階層的天体形成論に従えば、大きな銀河は小銀河の集合体として生まれることになり、大きな銀河には多数の巨大ブラックホールが存在することになる。これは、銀河の中心にブラックホール-バルジ質量関係を満たす巨

大ブラックホールが一つあるという観測事実を説明できない。可能性の一つは、銀河が合体した際に、ブラックホールも全て合体して、銀河中心に落ちるといったものである。しかし、これまで巨大ブラックホールの合体は極めて難しいとされてきた。我々は、ブラックホールを持つ銀河が合体した後、ブラックホール合体が起こるかという問題を、一般相対論効果を入れた**高精度N体計算**により調べた。銀河バルジの中に10個の巨大ブラックホールを置いて計算した結果、銀河中の星密度が高い場合には、星による力学的摩擦が有効に働き、ブラックホールは銀河中心に落ちることで多重散乱を繰り返し、連ブラックホールが生まれ、連ブラックホールは他のブラックホールとの散乱の結果、重力波を放出して合体することが分かった。そして、ブラックホール合体がどのような銀河で起こりうるかということ解析した結果、すばる望遠鏡で見えている赤方偏移 $z=7$ のライマン α エミッターで、ブラックホール合体過程が起こっている可能性を示した(下図)。

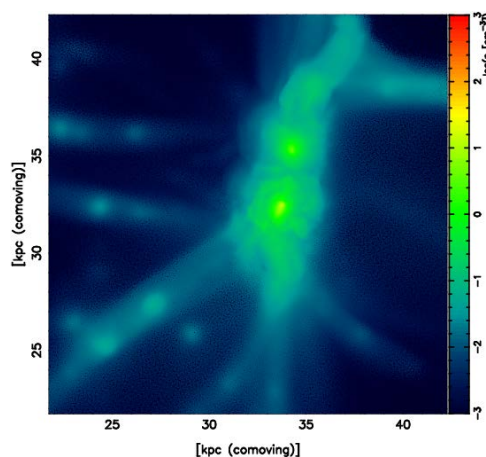
一般相対論的N体計算によるブラックホール合体条件と観測との比較



【2】第一世代天体の輻射流体計算

宇宙で最初に生まれた天体(第一世代天体)は、従来の計算では $\approx 10^6 M_\odot$ のダークマターハローに $\approx 10^5 M_\odot$ 程度のバリオンガスが蓄積されて形成されるとされてきた。しかしながら、従来の研究では、ダークマターの小スケールでの振る舞い、特にダークマター・カスプの成長についてはあまり注目されてこなかった。そこで、我々は計算領域の全体を可能な限り高解像度にした数値計算で、ダークマター・カスプの成長を分解できるようにし、第一世代天体の形成と進化を調べた。この計算では、ダークマターと流体粒子をそれぞれ約1億体(512^3 体)使い、計算領域の全体にわたってバ

リオンとダークマター質量解像度としてそれぞれ $0.046M_{\odot}$ と $0.22M_{\odot}$ を実現した (右図)。その結果、第一世代天体の質量は従来の計算で求められていた質量より 2 桁近く小さくなる ($\approx 10^3 M_{\odot}$ 程度) ことがわかった。この結果の一部は、既に特別推進研究で得られていたものであるが、その後の解析で、ダークマター・カスプの重力ポテンシャルが、ビリアル温度を上昇させ、その結果水素分子冷却の熱的不安定を引き起こすことで小質量の天体形成が可能になることを明らかにした (Umemura et al. 2012)。



[3] 原始銀河形成と宇宙再電離

宇宙は赤方偏移 $z=1000$ 程度で一度中性化し、その後形成された天体からの輻射によって再び電離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。その結果、宇宙の星形成史は主に光加熱効果によって著しく阻害される事を示した(Hasegawa & Semelin 2013)。また、再電離過程にとって重要な鍵となる電離光子の銀河からの脱出割合は、紫外線のフィードバックで高密度領域がならされる事によって上昇する事も分かった(Umemura et al. 2012)。

また、今年度は京のような大規模並列計算機で効率が出せるよう START のアルゴリズムの改善も行った。その結果、数 1000 並列以上の計算であっても非常によいスケーラビリティを実現する事を可能にし、演算数自体もおよそ半分にする事に成功した(START2: Hasegawa in prep.)。

[4] 「京」を用いたダークマターシミュレーション

理化学研究所の京コンピュータ上で、重力多体シミュレーション用コード"GreeM" をチューニングした。我々は、数万や数十万並列でもスケールするように以下の最適化を行った。

1) 大規模な全対通信の階層化。まず全ノードをいくつかのグループに分割する。この時、空間的に近い領域を担当するノードが同じグループになるようにする。そしてグループ内での全対通信を行うことから、グループ間で通信するというように2 段階に分けて通信を行うことによって全対通信の実行

時間を抑制した。

2) 領域形状を過去の数ステップに渡って平均化することにより、サンプリングによるステップ間の形状のばらつきを抑え、粒子再配分の通信コストの抑制。

3) MPI+OpenMP によるハイブリッド並列化

こうして京コンピュータ上でほぼ完璧なスケーラビリティを実現した。さらに2兆ダークマター粒子の重力進化シミュレーションを、京コンピュータのほぼ全システムを用いて、5.67 ペタフロップスの実効性能(実行効率55%)で実現した。これらの成果が認められ、ハイ・パフォーマンス・コンピューティングに関する国際会議SC12 (2012年11月, 米国・ソルトレイクシティ開催)において、ゴードン・ベル賞を単独受賞した。ゴードン・ベル賞ファイナリストには、ピーク性能が20 ペタフロップス(「京」の約2倍)の「セコイア」(米国・ローレンス・リバモア国立研究所)を用いて、同様のダークマターシミュレーションで14 ペタフロップスを達成した米国のグループがあった。ところが我々のコードが実際の計算速度で上回り、1粒子あたり2.4倍の速さでシミュレーションをすることが可能であった(同じ計算機を用いた場合は5倍近く速い)。こういった点が評価され、ゴードン・ベル賞の受賞につながったようである。

[5] 活動銀河核ジェットのパラズマ組成の研究

活動銀河核から噴出する相対論的ジェットのプラズマ組成が、電子・陽子なのか、それとも電子・陽電子であるかという根本的な問題は未だ明らかになっていない。これは、相対論的ジェットの形成メカニズムや宇宙線の起源とも関連する宇宙物理学において最重要テーマの1つである。これまで、バルクコンプトンと呼ばれる2次的放射の有無、シンクロトロン自己吸収や円偏波成分から、ブレーザージェット中のプラズマ組成についての議論がされてきた。しかし、プラズマ組成と密接に関係する真のジェットパワーを評価することは困難であり、従来の手法では放射光度から類推するほかなかった。この問題を解決するために、我々は、ジェットエネルギーの貯蔵庫である膨張コクーン力学に注目し、真のジェットパワーと年齢を評価する方法(Kino and Kawakatu 2005; Ito et al. 2008)、さらにはコクーン内での各成分(電子、陽電子、陽子)の分圧から相対論的ジェットの組成に制限をつける方法を提唱した。(Kino, Kawakatu, Takahara 2012)。本研究では、膨張コクーン力学により真のジェットパワーが求められているFR II型電波銀河Cygnus A, 3C219, 3C223, 3C284に対して、同様の方法を適応し解析を行った。その結果、Cygnus Aを含む4つのFR II電波銀河はエディントン光度に匹敵するパワフルなジェットを持つにも関わらず、いずれの場合もペアプラズマが混在することが分かった。つまり、4天体のジェット組成は電子・陽子プラズマだけでは説明できず、陽電子の存在を示唆するものである(Kawakatu, Kino, Takahara in preparation)。

[6] ダークマターハローの内部構造：コア-カスプ問題

宇宙の構造形成のパラダイム、コールドダークマター(CDM)シナリオは、N体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カスプ)構造を予言する

(Navarro, Frenk & White 1997; Fukushige & Makino 1997)。しかし、その観測結果によると、矮小銀河の密度は中心部で発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている (Swaters et al. 2003; Spekkens et al. 2005; Oh et al. 2010)。この理論と観測の不一致は"コア—カスプ問題"と呼ばれ、CDM シナリオの未解決問題の一つである。今回我々は、"超新星爆発により矮小銀河内のガスが加熱・膨張し、やがて放射冷却・収縮が起こり再び星形成が起こる、という一連の過程の繰り返しの重力場変動によりカスプがコアへと遷移するか"をN体シミュレーションを用いて調べた。ここでバリオンの重力場は周期的に時間変化する外場によって表現した。その結果バリオンの重力場変動の時間スケールに依存してDM ハローに形成されるコアの大きさや位置が大きく変化する事がわかった。また、DM ハローの粒子群と外場間で起こる共鳴的な現象に対する解析的なモデルを構築した。この共鳴モデルによって、コア半径が重力場の時間変動周期と関係があることを突き止めた。

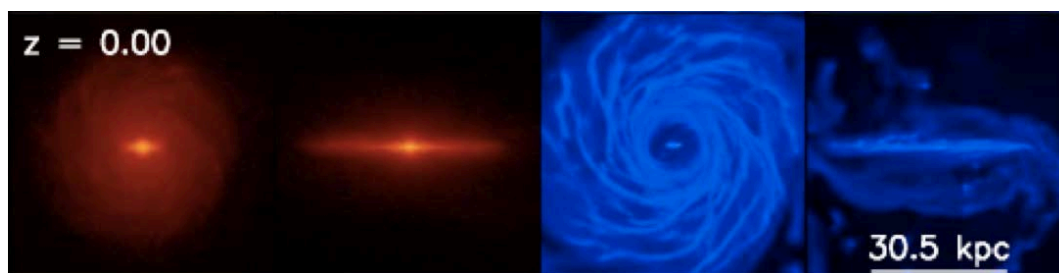
【7】 アンドロメダの涙とさざめき

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

【8】 銀河ハロー中を漂う巨大ブラックホールへのガス降着とその広波長域放射

各銀河はそれぞれの中心に巨大ブラックホールを宿す。また、銀河は周辺の銀河と衝突・合体し、吸収合併する事でその質量を成長させてきたと考えられる。これらの事から、銀河衝突により衛星銀河が壊された後しばらくの間、元衛星銀河の中心巨大ブラックホールが親銀河のハロー中を漂っていると期待される。隣の銀河であるアンドロメダ銀河は、この銀河衝突による銀河とブラックホールの共進化を理論と観測の両面から理解する上で、最上の実験場である。詳細な観測と数値実験の比較により、約10億年昔に衛星銀河が衝突し、今現在、元衛星銀河の破片がアンドロメダ銀河周辺に痕跡として残っている事がわかっている。この元衛星銀河の中心巨大ブラックホールが、ハローの希薄ガスを Bondi 降着により吸い込む時に形成される降着円盤の広波長域放射を計算した。様々な検出装置の感度と比較したところ、電波領域の既存装置で十分検出可能である事がわかった。

【9】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、銀河系バルジの形成について調べた. 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 2013). 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).

【10】6次元位相空間上のVlasov-Poissonシミュレーション

無衝突自己重力系の数値シミュレーションでは、これまでN体シミュレーションが幅広く用いられてきたがニュートリノなどの速度分散が大きい成分の無衝突減衰を正確に取り扱うには不向きであった。このN体シミュレーションの弱点を克服する手法として6次元位相空間上での無衝突ボルツマン方程式を有限体積法によって直接数値シミュレーションする手法を世界で初めて開発した。本年度は、宇宙論的な大規模構造形成の数値シミュレーションに応用できるように共動座標系での無衝突ボルツマン方程式の数値解法を開発した。

【11】GPUを利用した輻射輸送シミュレーションコードの開発

輻射輸送は宇宙物理学の数値シミュレーションにおいて重要な役割を果たすが、多数の光源からの輻射輸送計算は計算コストが膨大となり、大規模な計算や流体力学と組み合わせた輻射流体計算の実行は困難であった。我々は多数の光源からの輻射輸送を高速に計算するARGOT (accelerated radiation transfer on grids using oct tree) 法をGPUを用いてさらに高速化することに成功した。また、GPUを搭載した大規模クラスターシステムであるHA-PACS上でノード並列化を行った。

【12】AGNの輻射にさらされた分子雲の進化についての研究

活動銀河核(AGN)は、宇宙で最も明るい天体の1つであり、その光度は銀河本体に匹敵する。光の大部分は、電離能力を持った紫外光、及び、X線の波長帯で放射されるため、母銀河の進化に大きな影響を与えたと一般に考えられている。しかし、AGNの活動性の詳細がどのように決定されるかは明らかでない。そこで、本研究では、AGN現象の持続性の理解を進めることを目的として、ガス供給に重要な役割を果たすと期待される光学的に厚い分子雲の輻射流体計算を行った。その結果、

分子雲表面での電離パラメータの大きさに応じて、分子雲の進化は2種類に大別されることがわかった。電離パラメータが弱い場合には、分子雲は球対称的な光蒸発によって質量を失いながら、その反作用による圧力で、分子雲の一部が重力崩壊に至る。電離パラメータが強い場合には、輻射圧が効果的になりはじめ、光蒸発流の分子雲表面に閉じ込めながら、分子雲押しつぶし、最終的には分子雲の一部を重力崩壊させることがわかった。

【13】 極高光度 X 線源の中間質量ブラックホール候補

中間質量ブラックホール(BH)の最有力候補である極高光度 X 線源(Hyper Luminous X-ray source)について、X 線スペクトルを降着円盤モデルを用いて解析し、BH 質量を推定した。

極高光度 X 線源 ESO243-49 HLX-1 は、近傍の円盤銀河(赤方偏移 $z = 0.02$) の円盤面上空に写っており、赤方偏移測定を試みからこの銀河と同じ距離に居る事が示唆されている。この距離測定が正しければ、X 線光度は 1042 erg/s に達し、超高光度 X 線源 (Ultra Luminous X-ray source) よりも 1 桁以上明るく、中間質量 BH の最有力候補である。中間質量 BH は実在するか、その起源は何か、元衛星銀河の中心 BH が浮遊しているのか、巨大 BH の種なのか等の疑問に挑む絶好の実験場と言える。

これまでの HLX-1 の X 線スペクトルを降着円盤モデルを用いて解析する研究では、亜臨界降着率に限定される標準降着円盤モデルを基にしていた。しかし、大光度天体に亜臨界降着を仮定して BH 質量を推定し中間質量という答えを得る事は、仮定が結論に直結している危険性がある。

そこで、亜臨界から超臨界降着率まで幅広くカバーすることで降着率に事前の仮定を必要とせず、移流・相対論的効果円盤表層でのコンプトン散乱を含んだ円盤スペクトルモデル(Kawaguchi 2003) を 10 万太陽質量までの BH に対して計算した。3 年に渡って約 30 倍光度が時間変動する HLX-1 の多時刻 X 線スペクトルを解析したところ、約 1.8 万太陽質量 BH へのガス降着によってデータを説明できる事がわかった。

【14】 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。

【15】 星間空間におけるアミノ酸の円偏光波誘起鏡像異性体過剰の理論的研究 (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) が同量生成されるが、地球上の生命ではほとんど L 型アミノ酸しか使われていない。こ

れを、鏡像異性体過剰という。1969年、オーストラリアのマーチソン村に隕石が落下し、その隕石からアミノ酸が検出された。そして、わずかではあるが鏡像異性体過剰が発見された。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自己触媒反応により急速に増大することが分かってきた。よって、アミノ酸の鏡像異性体過剰が宇宙空間で起こり隕石を通じて地球に運ばれ、それが地上で急速に増幅した可能性がある。また、実験室で円偏光の光を当てると鏡像異性体過剰が引き起こされることが分かってきた。そして、近年になって、オリオン座の星形成領域(OMC-1)で円偏光波が発見された。よって、原始系の近くで大質量星が誕生したとすれば、太陽系内でアミノ酸の鏡像異性体過剰が起こった可能性がある。以上の事実を背景に、宇宙空間で円偏光波からアミノ酸の鏡像異性体過剰を引き起こす過程についての量子多体計算を進めている。我々は、円偏光波吸収とアミノ酸の光励起による崩壊・改変反応の過程を解析した。第一原理計算により、真空中におけるアミノ酸の最安定構造を求め、その光吸収性と円偏光二色性の値を求めた。その結果、アミノ酸の光物性はその種の特徴となる側鎖よりアミノ酸全体に共通する主鎖の構造により強く依存し、波長帯としてライマン α 帯の光が重要であることを明らかにした。

【16】系外惑星におけるバイオマーカー検出を目指した光合成アンテナ機構のエネルギー移動計算 (宇宙・生命分野連携)

探査機 Kepler によって太陽系外惑星の数は大きく追加されており、地球型惑星やハビタブルゾーン内に入る惑星の観測にも成功している。地球に類似した惑星の発見が期待される中で、得られるスペクトルから生命の痕跡であるバイオマーカーを如何に検出するかが課題になっている。地球の生命の進化において光合成は極めて重要であり、光合成の痕跡の中でも 750nm 付近の近赤外領域に見られる反射スペクトルの特徴的な勾配 (red edge) は有力なバイオマーカーとなり得る。様々なスペクトル型の主星を公転する系外惑星において光合成生物の存在を想定した場合、光捕集の形態が大きく異なると考えられる。地球の光合成生物の場合は主星である太陽のスペクトル比の光を効率良く捕集するように進化して来たと考えべきであり、クロロフィルなどの光合成色素からなるアンテナ系は環境によって色素の種類や配置などの形態が異なる。光を受けた色素は電子励起され、近くの色素に電子状態を移動させるという過程を通じて効率的に光エネルギーを化学エネルギーに変換する。系外惑星においては異なる光捕集の形態を取る場合、それに対応した波長域に光合成の兆候を示す可能性がある。我々は、系外惑星の光のスペクトル比と植物の光捕集の形態との相関について定量的指標を導出することを目的に、光捕集系の量子化学計算を行った。アンテナを構成する色素1つ1つの励起状態を時間依存密度汎関数法により計算し、色素間では双極子-双極子相互作用する近似モデルを構築した。また、入射光としてある振動数の電場を印加して系の量子力学的時間発展を追跡することによってスペクトル強度を算出した。これにより、アンテナ系の形態と red edge との相関を調べ、系外惑星で想定されるスペクトルを議論した。

4. 教育

【学位論文】

<博士論文>

1. Mohammad Ali Nawaz
Interaction of Jets with the Intracluster Medium
2. Marc White
Outflows from Young Stellar Objects

<修士論文>

1. 安部 牧人
3次元輻射流体計算による紫外線輻射場中の星団形成過程の研究
2. 五十嵐 朱夏
球対称定常銀河風の解析
3. 大野 純
GPUを用いた輻射流体力学シミュレーションの高速化
4. 久保田 明夏
初代星形成における紫外線輻射の流体力学的効果

<学士論文>

飯塚 実紅
系外惑星系における軌道交差によるホットジュピター形成

【集中講義】

- ・梅村 雅之
「輻射輸送・輻射流体力学」(2012年7月19日, 千葉大学, 千葉市)
- ・岡本 崇
「銀河形成とダークマター」第7回 素核宇宙融合 レクチャー シリーズ (2012年11月20日~2012年11月21日, 神戸大学, 神戸市)

5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

1) 【受賞】

- ①ACM Gordon Bell Prize, 石山智明, 4.45 Pflops Astrophysical N-Body Simulation on K computer – The Gravitational Trillion-Body Problem, 2012年11月16日
- ②HPCS IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞, 扇谷豪, 重力多体系用 Tree Code の並列 GPU 化による計算加速, 2013年1月16日

2) 【外部資金】

<代表者>

- ・基盤研究 (S) : 梅村 雅之 (代表者) (2008 年度採択, 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」 (880 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)
- ・プレ戦略イニシアティブ : 森 正夫 (代表者) (継続)
「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)
- ・科研費若手研究 (B) : 岡本 崇 (代表者) (新規)
「輻射流体シミュレーションを用いた銀河風駆動機構の解明」 (110 万円)
- ・科研費若手研究 (B) : 長谷川 賢二 (代表者) (新規) (210 万円)
「宇宙論的輻射シミュレーションで解明する宇宙再電離期の銀河形成史」
- ・科研費若手研究 (B) : 石山智明 (代表者) , 2013-2015 年, 350 万(直接経費)
「銀河系内のダークマター微細構造の解明およびダークマター検出への応用」

<分担者>

- ・基盤研究 (A) : 梅村雅之 (分担者) (代表者 : 大内正巳) (2011 年度採択, 継続)
「次世代大規模探査とシミュレーションで挑む宇宙再電離」 (1 万円)
- ・基盤研究 (A) : 森 正夫 (分担者) (代表者 : 大内正巳) (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」 (20 万円)
- ・挑戦的萌芽研究: 川勝 望 (分担者) (代表者 : 長尾透) (継続)
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)

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

- 1) Doi, A., Nagira, H., Kawakatu, N. Kino, M., Nagai, H., Asada, K., 2012, Radio Galaxies in Narrow-line Seyfert 1 Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 760(1), 41-51
- 2) Godet, B. Plazolles, T. Kawaguchi, J.-P. Lasota, D. Barret, S. Farrell, V. Braito, M. Servillat, N. Webb and N. Gehrels, 2012, Investigating slim disk solutions for HLX-1 in ESO 243-49, *The Astronomical Journal*, 752, 34 [12pages]
- 3) Hasegawa, K., Semelin, B., 2013, The impacts of ultraviolet radiation feedback on galaxies during

the epoch of reionization, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 428, pp.154-166

- 4) Ishiyama, T., Nitadori, K., Makino, J. 2012, 4.45 Pflops Astrophysical N-Body Simulation on K computer – The Gravitational Trillion-Body Problem SC '12 Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No. 5
- 5) Kawata, D., Okamoto, T., Gibson, B. K., Barnes, D. J. and Cen, R., 2013, Calibrating an updated smoothed particle hydrodynamics scheme within `gadget`, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 1968-1979
- 6) Kino, M., Kawakatu, N., Takahara, F., 2012, Calorimetry of AGN Jets: Testing Plasma Composition in Cygnus A, *The Astrophysical Journal*, 751(2), 101-109
- 7) Kino M., Ito, H., Kawakatu, N., Orienti, M., 2013, New class of very high energy γ -ray emitter: radio-dark mini-shells surrounding in AGN jets, *The Astrophysical Journal*, 764(2), 134-138
- 8) Komatsu, Y., Yamada, H., Kawamoto, S., Fukuda, M., Miyakawa, T., Morikawa, R. Takasu, M., Akanuma, S. and Yamagishi, A., 2012, Designing the Binding Surface of Proteins to Construct Nano-fibers, *Progress in Theoretical Chemistry and Physics --Quantum Systems in Chemistry and Physics*, 26, 555-567
- 9) Komatsu, Y., Fukuda, M., Yamada, H., Kawamoto, S., Miyakawa, T., Morikawa, R., Takasu, M., Yokojima, S., Akanuma, S. and Yamagishi, A., 2012, Constructing Protein Nano-Fiber and Estimation of the Electronic State Around Metal Ions, *Int. J. Quantum Chem.*, 112, 3750-3755
- 10) Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Yamauchi, R., Nakamura, Y., Morimoto, N., Ouchi, M., Ono, Y., Umemura, M., Mori, M., 2012, Diffuse Ly α haloes around Ly α emitters at $z=3$: do dark matter distributions determine the Ly α spatial extents?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425, 878-883.
- 11) Miki, Y., Takahashi, D., Mori, M., 2012, A Fast Implementation and Performance Analysis of Collisionless N-body Code Based on GPGPU, *Procedia Computer Science*, 9, 96-105 (Proceeding of International Conference on Computational Science, ICCS 2012)
- 12) Nimori, M., Habe, A., Sorai, K., Watanabe, Y., Hirota, A., and Namekata, D., 2013, Dense cloud formation and star formation in a barred galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429, 2175-2182.
- 13) Okamoto, T., 2013, The origin of pseudo-bulges in cosmological simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 718-728
- 14) Prokhorov, D. A., Million, E. T., Akahori, T., Zemcov, M., Moraghan, A., Nagataki, S., Yoshikawa, K., Colafrancesco, S., Rawle, T. D., Egami, E., 2012, A high-resolution study of the X-ray emission

- and Sunyaev-Zel'dovich effect in the Bullet cluster (1E 0657-56), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 2291-2299
- 15) 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., 2012, The Aquila comparison project: the effects of feedback and numerical methods on simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 1726-1749
 - 16) Shimizu, I., Yoshida, N. and Okamoto, T., 2012, Submillimetre galaxies in cosmological hydrodynamic simulations: source number counts and the spatial clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 2866-2875
 - 17) Son, D., Woo, J.H., Kim, S.C., Fu, H., Kawakatu, N., Bennert, V.N., Nagao, T., Park, D., 2012, Accretion Properties of High- and Low-Excitation Young Radio Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 757(2), 140-152
 - 18) Tanikawa, A., Yoshikawa, K., Nitadori, K. and Okamoto, T., 2013, Phantom-GRAPE: Numerical software library to accelerate collisionless N-body simulation with SIMD instruction set on x86 architecture, *New Astronomy*, 19, 74-88
 - 19) Umemura, M. Susa, H., Hasegawa, K., Suwa, T., Semelin, B., 2012, Formation and Radiative Feedback of First Objects and First Galaxies, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 01A306 (23pp)
 - 20) Wagner, Y. , Bicknell, G. V. and Umemura, M. ,2012, Driving Outflows with Relativistic Jets and the Dependence of Active Galactic Nucleus Feedback Efficiency on Interstellar Medium Inhomogeneity, *The Astronomical Journal*, 757, 136
 - 21) Wagner, Y. , Umemura, M. and Bicknell, G. V. ,2013, Ultrafast Outflows: Galaxy-scale Active Galactic Nucleus Feedback, *The Astronomical Journal Letters*, 763, L18
 - 22) Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., 2012, Sub-millimetre brightness of early star-forming galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420, 3381-3388.
 - 23) Yamada, K., Kitayama, T., Takakuwa, S., Iono, D., Tsutsumi, T., Kohno, K., Takizawa, M., Yoshikawa, K., Akahori, T., Komatsu, E., Suto, Y., Matsuo, H., Kawabe, R., 2012, Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel'dovich Effect for ALMA, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 102
 - 24) Yamada, T., Matsuda, Y., Kousai, K., Hayashino, T., Morimoto, N., Umemura, M., 2012, Profiles of Lyman alpha Emission Lines, *The Astronomical Journal*, 751, 29-41.
 - 25) Yamada, T., Nakamura, Y., Matsuda, Y., Hayashino, T., Yamauchi, R., Morimoto, N., Kousai, K., Umemura, M., 2012, Panoramic Survey of Ly α Emitters at $z = 3.1$, *The Astronomical Journal*, 143,

79-92.

- 26) 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. and Kawai, N., 2012, RXTE Follow-up Observations of the Black Hole Candidate MAXI J1659-152 Discovered by MAXI and Swift, Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 32 [15 pages]
- 27) Yoshikawa, K., Yoshida, N., Umemura, M., 2013, Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation in Six-dimensional Phase Space: Self-gravitating Systems, The Astrophysical Journal, 762, 116
- 28) 川勝望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり, 筑波大学, 2012年, 理数学生応援プロジェクトとスーパーサイエンスハイスクールとの関係, 大学入試研究ジャーナル, 23, pp185-190
- 29) 扇谷豪, 三木洋平, 朴泰祐, 森正夫, 中里直人, 2013年, 重力多体系用 Tree Code の並列 GPU 化による計算加速, 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論文集, Vol.2013, pp.146-155

B) 査読無し論文

- 30) Hasegawa K. and Semelin, B., 2012, Impacts of Ultraviolet Radiation Feedback on the Cosmic Reionization History, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings, 1480, 267-270
- 31) Ishiyama, T., Makino, J., Ebisuzaki, T., 2012, The formation and evolution of first dark matter microhalos, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings,, 1480, 382
- 32) Ogiya, G. and Mori, M., 2012, The Core-Cusp Problem in CDM Halos and Supernova Feedback, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 458, pp. 385-387
- 33) Okamoto, T., 2012, Cosmological pseudobulge formation, 2012, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings, Volume 1480, 403-405
- 34) Shimizu I., Yoshida N., and Okamoto T., 2012, Lyman alpha emitters in cosmological simulations: Lyman alpha escape fraction and statistical properties, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings, 1480, 412-414
- 35) Tanikawa, A., Yoshikawa, K., Nitadori, K. and Okamoto, T., 2012, Phantom-GRAPe: SIMD accelerated numerical library for N-body simulations, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1209.008
- 36) Tanikawa, A., and Umemura, M., 2011, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, FIRST STARS IV -from Hayashi to the Future- AIP Conference Proceedings, 1480, 430-432

- 37) 扇谷豪, 三木洋平, 朴泰祐, 森正夫, 中里直人, 2012年, 重力多体系用 Tree Code の並列 GPU 化, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) , 2012-HPC-135 巻, 40 号, pp.1-9
- 38) 扇谷豪, 森正夫, 2012年, 星フィードバックに対する銀河ガスの振る舞いの解析: 銀河形状・星形成率への依存性, 日本流体力学会 年会 2012 講演論文集, 215 号, pp.1-5

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

- 1) Okamoto, T., 2012, Shaping galaxies by feedback: satellites, discs, and bulges, Disc galaxy formation in a cosmological context, (May 14-18, 2012, Heidelberg, Germany)
- 2) Tanikawa, A., 2012, Multiples in clusters ~ First binary formation via few-body modes~, (Aug.15 – 17, 2012, Kobe, Japan)
- 3) Wagner,A., Umemura,M., Bicknell,G., Hydrodynamic Simulations of AGN Jet and UFO Feedback, (Oct.5, 2012, Nagoya, Japan)
- 4) Yoshikawa, K., 2012, An alternative to N-body methods in astrophysical self-gravitating systems: Vlasov-Poisson simulations”, Conference on Computational Physics (Oct. 14-18, 2012, Kobe, Japan)
- 5) Yoshikawa, K., 2012, Vlasov-Poisson simulations of self-gravitating systems, The 5th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (Oct. 29-Nov.2, 2012, Kyoto, Japan)
- 6) Kawakatu, N., 2012, Dynamical evolution of AGN cocoons, Relativistic jets in AGNs (Nov. 29, 2012, NAOJ, Japan)

B) 一般講演

- 1) Hasegawa, K., Semelin, B., Umemura, M., Impacts of Ultraviolet Radiation Feedback on the Cosmic Reionization History, The Epoch of Reionization: Theory - Simulations – Observations (Apr. 23-27, 2012, Strasbourg, France)
- 2) Hasegawa, K., Semelin, B., Impacts of Ultraviolet Radiation Feedback on the Cosmic Reionization History, FIRST STARS IV –from Hayashi to the Future- (May 21-25, 2012, Kyoto, Japan)
- 3) Okamoto, T., Cosmological pseudobulge formation, FIRST STARS IV –from Hayashi to the Future- (May 21-25, 2012, Kyoto, Japan)
- 4) Miki, Y., Takahashi, D., Mori, M., A Fast Implementation and Performance Analysis of Collisionless N-body Code Based on GPGPU, International Conference on Computational Science (Jun. 4-6, 2012, Omaha, USA)
- 5) Ogiya, G. and Mori, M., The Core-Cusp problem in Cold Dark Matter halos and Supernova feedback: Effects of Oscillation, IAP-Subaru Joint International Conference: Stellar populations across Cosmic Times, (Jun. 25-29, 2012, Paris, France)

- 6) Kawakatu, N., Wada, K., 2012, Coevolution of AGNs and nuclear starbursts, AGN Workshop 2012 in Jeju (Sep. 12~14, 2012, Jeju Island, Korea)
- 7) Kawaguchi, T., Miki, Y. and Mori, M., Emission from AGN Dusty Tori and a Wandering BH, AGN Workshop 2012 in Jeju, (Sep. 12~14, 2012, Jeju Island, Korea)
- 8) Wagner, A., Umemura, M., Bicknell, G., Mechanical Feedback by AGN Jets, First East Asian AGN Workshop in Jeju, (Sep. 12-14, 2012, Jeju Island, Korea)
- 9) Ishiyama, T., Petascale Cosmological N-body Simulations, Conference on Computational Physics (CCP2012), (Oct.14-18, 2012, Kobe, Japan)
- 10) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Resolving the outer density profile of dark matter halo in Andromeda galaxy, Conference on Computational Physics (CCP2012), (Oct.14-18, 2012, Kobe, Japan)
- 11) Miki, Y., Mori, M. and Kawaguchi, M., Hunting a Wandering Black Hole in M31 Halo Using GPU Cluster, Conference on Computational Physics 2012 (CCP2012), (Oct.14-18, 2012, Kobe, Japan)
- 12) Ogiya, G., Mori, M., Miki, Y., Boku, T. and Nakasato, N., Study of the core-cusp problem in cold dark matter halos using N-body simulations on GPU clusters, Conference on Computational Physics (CCP2012), (Oct.14-18, 2012, Kobe, Japan)
- 13) Ishiyama, T., The Gravitational Trillion-Body Problem on K computer, The Fifth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2012), (Oct. 29-Nov.2, 2012, Kyoto, Japan)
- 14) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Galaxy Collision and the Outer Density Profile in Andromeda Galaxy, East Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2012), (Oct. 29-Nov. 2, 2012, Kyoto, Japan)
- 15) Ogiya, G. and Mori, M., Landau resonance and the core-cusp problem in cold dark matter halos, East Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2012), (Oct.29-Nov.2, 2012, Kyoto, Japan)
- 16) Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., Galaxy Merger and Hungry Black Hole: Suppression of Black Hole Activity due to Galaxy Merger, East Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2012), (Oct.29-Nov.2, 2012, Kyoto, Japan)
- 17) Suzuki, H., Umemura, M., The impact of background and internal UV radiation on the galaxy formation., East Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2012 Kyoto (EANAM 2012), (Oct.29-Nov.2, 2012, Kyoto, Japan) (poster)
- 18) Tanikawa A., 2012, Successive merger of multiple massive black holes in a primordial galaxy and its effect on the galactic structure, (Oct. 29 – Nov. 2, 2012, Kyoto, Japan)
- 19) Kawaguchi, T., Innermost Structure and Near-Infrared Emission of AGN Dusty Tori, Torus Workshop 2012, U of Texas in San Antonio (Dec. 4-6, 2012, USA),

- 20) Hasegawa, K., Okamoto, T., The improvement of START, Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop IV (Dec. 12-14, 2012, Austin, USA,)
- 21) Kawaguchi, T. , Growth of massive black holes revealed via the HSC survey, Supermassive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys, (Dec.18-20, 2012, Matsuyama ,Japan),
- 22) Hasegawa, K., The improvement of a Radiation hydrodynamics code START, 3rd AICS international Symposium, (Feb.28-Mar. 1, 2013, Kobe, Japan)

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

- 1) 岡本崇, 「理論シミュレーションで見た銀河形成研究の現状 (I) High-redshift discs and their descendants at $z = 0$ 」, 銀河形成解剖ワークショップ "Resolved Views of Galaxy Formation and Evolution", (2012年5月29日～31日, Hilo, Hawaii)
- 2) 梅村雅之, 「銀河・AGN 形成に関する理論的課題」, 研究会「すばる HSC サーベイによるサイエンス」 (2012年9月26日～28日, 国立天文台, 三鷹市)
- 3) 石山智明, 「スーパーコンピューターの中で生まれる宇宙」, サイエントフィック・システム研究会 科学技術計算分科会 2012年度会合(2012年10月24日, ANA クラウンプラザホテル神戸)
- 4) 三木洋平, 「ガス雲 G2 落下による Sgr A*へのガス降着」, 『銀河系中心ブラックホール 2013』研究会 (2012年11月7日～9日, 宇宙科学研究所, 相模原市)
- 5) 長谷川賢二, 「大規模並列化へ向けた輻射輸送コード START の改良」, 第25回理論懇シンポジウム, (2012年12月22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 6) 石山智明, 「ダークマターシミュレーション」, 第25回理論懇シンポジウム, (2012年12月22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 7) 川勝望, 「ALMA で探る超巨大ブラックホール形成」, ALMA 時代の宇宙構造形成理論 (2013年1月25日～28日, 北海道大学, 札幌市)
- 8) 岡本崇, 「Formation of high-redshift disks and pseudo-bulges in nearby galaxies」, ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第1世代から第n世代へ (2013年1月26日～28日, 北海道大学, 札幌市)
- 9) 石山智明, 「Large scale dark matter simulation」, ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第1世代から第n世代へ(2013年1月26日～28日, 北海道大学, 札幌市)
- 10) 石山智明, 「超並列重力多体シミュレーションコードの開発」, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ(2013年2月18日～19日, 千葉大学, 千葉市)
- 11) 吉川耕司, 「無衝突自己重力系の無衝突ボルツマンシミュレーション」, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ (2013年2月18日～19日, 千葉大学, 千葉市)

- 12) 川勝望, 「銀河とブラックホールの共進化」, 銀河進化と遠方宇宙 2013 (第1回) (2013年2月20日～21日, コープイン京都, 京都市)
- 13) 川勝望, 「サブミリ波観測で探る活動銀河核の形成と進化」, ALMA ミリ波サブミリ波観測で押さえる銀河の基本観測量とその理解(2013年2月25日～26日, 国立天文台, 三鷹市)
- 14) 川口俊宏, 「電波観測で探る銀河衝突に伴う巨大ブラックホールの成長」, 「ALMA ミリ波サブミリ波観測で押さえる銀河の基本観測量とその理解」ワークショップ(2013年2月25日～26日, 国立天文台, 三鷹市)
- 15) 岡本崇, 「スーパーコンピュータによる銀河形成」, 第9回 創成シンポジウム, 「スーパーコンピュータ "京"でせまる最先端の科学・技術」(2013年3月4日, 北海道大学, 札幌市)
- 16) 石山智明, 「スーパーコンピュータ「京」の中の宇宙」, 2012年度 HPCI 戦略プログラム分野5全体シンポジウム (2013年3月5日～6日, 富士ソフトアキバプラザ)
- 17) 川口俊宏, 「巨大ブラックホールの形成・成長と銀河との共進化」, 日本天文学会春季年会 (2013年3月20日～23日, 埼玉大学)

B) その他の発表

- 1) 川口俊宏, 「活動銀河核のダストトーラス, 及び中間質量ブラックホールの探査」, 理論部プラズマセミナー (2012年5月18日, 国立天文台, 三鷹市)
- 2) 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」とスーパーサイエンスハイスクールとの関係」, 『平成24年度全国大学入学者選抜研究連絡協議会』岡山コンベンションセンター (2012年6月1日, 岡山, 岡山市)
- 3) Wagner, A., Umemura, M. and Bicknell, G., 「Mechanical Feedback by AGN Jets」, Matsuyama Black Hole Workshop (2012年6月20日～23日, 愛媛大学, 松山市)
- 4) 川勝望, 和田桂一, 「AGN-Nuclear SB connection in Compton thick AGN」, 松山ブラックホールワークショップ2012—ASTRO-H 衛星で目指すブラックホール研究の新展開— (2012年6月23日, 愛媛大学, 松山市)
- 5) 川口俊宏, 「ダストトーラスの最内縁構造モデル」, ASTRO-H 衛星で目指すブラックホール研究の新展開 研究会 (2012年6月22日～23日, 愛媛大学)
- 6) 川口俊宏, 「漂う巨大ブラックホールと中間質量ブラックホールの探査」, 銀河中心超巨大ブラックホールの起源 研究会 (2012年7月26～27日, 筑波大学)
- 7) 鈴木裕行, 「紫外線輻射場における原始銀河形成の物理」, 2012年度第42回天文・天体物理若手夏の学校(2012年8月3日～6日, 福井県東尋坊温泉三国観光ホテル, 福井県)(口頭発表)
- 8) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「銀河衝突による銀河中心巨大ブラックホール周辺からのガス剥ぎ取り過程」, VLBI WORKSHOP 「巨大ブラックホールからの噴出流」 (2012年9月6日～7日, 国立天文台, 三鷹市)
- 9) 扇谷豪, 森正夫, 「星フィードバックに対する銀河ガスの振る舞いの解析: 銀河形状・星形成率への依存性」, 日本流体力学会 年会 2012 (2012年9月16日～18日, 高知)

- 10) 森正夫, 新田伸也, 五十嵐朱夏, コールドダークマターハローにおける遷音速銀河風解析, 日本流体力学会 年会 2012 (2012年9月16日~18日, 高知)
- 11) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「球対称等温定常銀河風の加速過程に与えるダークマターと星の質量分布の影響」, 日本天文学会秋季年会(2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 12) 石山智明, 「京速計算機による無衝突系重力多体シミュレーション」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 13) 小久保充, 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 土居守, 吉井譲, 越田進太郎, 川口俊宏, 鮫島寛明, 小林行泰, 「QSOs の光度変動に伴う紫外カラー変動に対する標準円盤+質量降着率変化モデルの妥当性」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 14) 扇谷豪, 森正夫, 「星フィードバックに対する銀河ガスの振る舞いの解析: 銀河形状・星形成率への依存性」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 15) 川勝 望, 紀基樹, 「膨張コクーン力学から探る AGN ジェットのプラズマ組成:陽電子は必要か?」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 16) 川口俊宏, O. Godet, B. Plazolles, 「極高光度 X 線源の 2 万太陽質量ブラックホール候補」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 17) 桐原崇亘, 森正夫, 「アンドロメダストリームの非対称構造と母矮小銀河の内部構造」, 日本天文学会秋季年会 (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 18) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 濟藤祐理子, 「M31 ハローを漂う巨大ブラックホール探査: 衝突銀河の突入軌道への制限」, 日本天文学会秋季年会, (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 19) 谷川衝, 梅村雅之, 「巨大ブラックホール多体系におけるブラックホールの進化と銀河の構造」, 日本天文学会秋季年会, (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 20) Wagner, A., Umemura, M. and Bicknell, G. 「Mechanical Feedback by AGN Jets and UFOs」, 日本天文学会秋季年会, (2012年9月19日~21日, 大分大学, 大分市)
- 21) 三木洋平, 高橋大介, 森正夫, 「大規模 GPU クラスタにおける N 体計算コードの演算性能とスケーラビリティの評価」, 第 136 回 ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, (2012年10月3日~4日, 沖縄産業支援センター, 那覇市)
- 22) Wagner, A., Umemura, M. and Bicknell, G. 「Hydrodynamic Simulations of AGN Feedback in a Multiphase Medium」, 天体形成研究会,(2012年10月5月~6月, 筑波大学, つくば市)
- 23) 小松勇, 梅村雅之, 庄司光男, 矢花一浩, 白石賢二, 神谷克政, 栢沼愛, 田口真彦, 佐藤皓允, 蘇垠成, 「系外惑星のバイオマーカー検出に向けた光合成アンテナ機構の励起状態計算」, 第 5 回 アストロバイオロジーワークショップ (2012年11月, 国立天文台, 三鷹市)
- 24) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「AGN の輻射にさらされた分子雲の進化について」, CfCA ユーザーズミーティング (2012年12月11日~12日, 国立天文台, 三鷹市) [ポスター発表]
- 25) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「N 体計算による M31 ハロー領域を漂う巨大ブラックホール探査」, 第 25 回理論懇シンポジウム (2012年12月22日~24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 26) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「球対称等温定常銀河風の遷音速解析」, 第 25 回理論懇シンポ

ジウム(2012月12日22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)

- 27) 扇谷豪, 森正夫, 「ランダウ共鳴が与えるダークマターハロー密度構造への影響」, 第25回理論懇シンポジウム 「計算宇宙物理学の新展開」(2012月12日22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 28) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 「アンドロメダストリームで探るダークマターハローの内部構造」, 第25回理論懇シンポジウム(2012月12日22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 29) 川口俊宏, 濟藤祐理子, 三木洋平, 森正夫, 「銀河ハロー中を漂う巨大ブラックホールへのガス降着とその広波長域放射」, 第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」(2012月12日22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 30) 鈴木裕行, 梅村雅之, 「背景および内部紫外線放射による銀河の星形成史への影響」, 第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」(2012月12日22日～24日, つくば市国際会議場, つくば市)(ポスター発表)
- 31) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「AGNの放射にさらされた分子雲の進化について」, 第25回理論懇シンポジウム(2012月12日22日～24日, つくば国際会議場, つくば市)
- 32) 川口俊宏, 「銀河中心に鎮座する巨大ブラックホール周辺の構造と銀河衝突に伴う巨大ブラックホールの成長」, 九州天文セミナー(2013年1月26日, 九州大学, 福岡市)
- 33) 鈴木裕行, 梅村雅之, 「The effect of ultraviolet radiation on the SFH and galactic morphology」, ALMA時代の宇宙の構造形成理論:第1世代から第n世代へ 兼 2012年度初代星・初代銀河研究会(2013年1月26日～28日, 北海道大学, 札幌市)(ポスター発表)
- 34) 川口俊宏, 「速度分解エコマッピングで探る巨大ブラックホール周辺のガス流出入」, 岡山3.8m新望遠鏡によるサイエンス・装置ワークショップ(2013年3月12日～13日, 国立天文台, 三鷹市)
- 35) 小松勇, 梅村雅之, 庄司光男, 矢花一浩, 白石賢二, 神谷克政, 栢沼愛, 田口真彦, 佐藤皓允, 蘇垠成, 「系外惑星バイオマーカー検出を目指した光合成機構のエネルギー移動計算」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日～23日, 埼玉大学, さいたま市)
- 36) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「3次元放射流体計算による紫外線放射場中の星団形成過程の研究」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日～23日, 埼玉大学, さいたま市)
- 37) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「定常銀河風における銀河中心ブラックホールの影響」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日～23日, 埼玉大学, さいたま市)(ポスター発表, 査読あり)
- 38) 小田寛, 川口俊宏, 「光学的に薄い磁気圧優勢円盤からの放射スペクトル: 明るいハード状態への適用」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日～23日, 埼玉大学, さいたま市)
- 39) 川口俊宏, 「速度分解エコマッピングで探る巨大ブラックホール周辺のガス流出入」, 岡山3.8m新望遠鏡によるサイエンス・装置ワークショップ(2013年3月12日～13日, 国立天文台, 三鷹市)
- 40) 桐原崇亘, 三木洋平, 川口俊宏, 森正夫, 「アンドロメダストリームの非対称構造と母矮小銀河内部構造の関係」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日～23日, 埼玉大学, さいたま市)

- 41) 済藤祐理子, 諸隈智貴, 川口俊宏, 今西昌俊, 美濃和陽典, 峰崎岳夫, 川勝望, 長尾透, 松岡健太, 大井渚, 今瀬佳介, 「 $z\sim 3$ の QSO で探る超巨大ブラックホールと母銀河の共進化」, 日本天文学会春季年会 (2013年3月20日~23日, 埼玉大学, さいたま市)
- 42) 鈴木裕行, 梅村雅之, 「紫外線輻射による銀河の星形成史・銀河形態への影響」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日~23日, 埼玉大学, さいたま市) (口頭発表)
- 43) 土居明広, 秦和弘, 中西康一郎, 河野孝太郎, 寺島雄一, 川口俊宏, 秋山和徳, 澤田-佐藤聡子, 尾崎忍夫, 「ALMA cycle-0 で捉えたソンプレロ銀河(M104) の超巨大質量ブラックホール周辺 10 シュバルツシルト半径付近からの電波放射」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日~23日, 埼玉大学, さいたま市)
- 44) 行方大輔, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「AGNの輻射にさらされたガス雲の輻射流体計算」, 日本天文学会春季年会(2013年3月20日~23日, 埼玉大学, さいたま市) (口頭発表)
- 45) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「大規模 GPU クラスタを用いて探る超巨大ブラックホール成長の現場」, 日本天文学会春季年会 (2013年3月20日~23日, 埼玉大学, さいたま市)

(4) 著書, 解説記事等

- ・石山智明, 岩波「科学」 2013年4月号, 世界最大規模のダークマターシミュレーション

7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

【異分野間連携】

- 1) 星間アミノ酸 L 型過剰の研究 (梅村)
宇宙・生命・物性分野間連携により, 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た。
- 2) 系外惑星における光合成アンテナ機構の研究 (小松, 梅村)
宇宙・生命分野間連携により, 系外惑星系の主星光スペクトルと光合成光捕集の相関を導出することを目的に, 量子化学計算を進めた。

【国際連携】

- ・ Alex Wagner,

 - 1) Collaboration with Prof. Joseph Silk (IAP, France) on the specific topic of "Star Formation in AGN-pressure confined Disk Galaxies."
 - 2) Collaboration with Dr. Kalliopi Dasyra, Prof. Françoise Combes, Dr. Greg Novak, Dr. Julia Scharwaechter (Observatoire de Paris, France) on "Kpc-scale multiphase outflows from AGN"

8. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

- 1) 国際会議「FIRST STARS IV - From Hayashi to the Future -」, May 22- 25, 2012, Heartpia
Kyoto, Kyoto, Japan
- 2) ワークショップ「巨大ブラックホールの起源」, 2012年7月26日~28日
筑波大学計算科学研究センター, つくば市
- 3) 研究会「AGN Workshop 2012 in Jeju」, 2012年9月12日~14日
<http://astro.snu.ac.kr/~hjbae/Welcome.html>
- 4) 「天体形成研究会」2012年10月5日~6日
筑波大学計算科学研究センター, つくば市
- 5) 第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」, 2012年12月22日(土) - 24日
(月), つくば国際会議場, つくば市

9. 管理・運営 (組織運営や支援業務の委員・役員の実績)

・梅村雅之

計算科学研究センター 運営委員会委員
計算科学研究センター 副センター長
計算科学研究センター 共同利用委員会主査
計算科学研究センター 共同利用審査委員会委員長
計算科学研究センター 宇宙・原子核物理研究部門主任
計算科学研究センター 運営協議会委員
計算科学研究センター 研究企画室委員
物理学域 運営委員会委員
物理学域 宇宙物理理論グループ長
物理学類 カリキュラム委員会委員長, 学務委員

・吉川耕司

計算科学研究センター・フロンティア計算機システム仕様策定委員会・委員 (書記)
計算科学研究センター・密結合並列演算加速機構実験システム仕様策定委員会・委員

10. 社会貢献・国際貢献

・川勝望

- 1) 大学説明会・模擬授業 (千葉県立佐倉高等学校), 2012年5月8日,
- 2) 平成24年度筑波大学説明会, 2012年7月31日, 筑波大学
「銀河中心に潜む超巨大ブラックホール形成の謎」
- 3) SSH 生徒研究発表会 2012 (パシフィコ横浜, 横浜市), 2012年8月8日~9日,
理数学生応援プロジェクト広報

4) 東京大学主催主要大学説明会 (大田区産業プラザ PiO, 東京), 2012年8月21日
理数学生応援プロジェクト説明

・川口俊宏

1) 「ブラックホールだらけの宇宙」, 全国同時七夕講演会 2012 (2012年7月14日, つくば国際会議場, つくば市)

11. その他 (海外長期滞在, フィールドワークなど)

なし

IV. 宇宙観測グループ

教授	中井直正
講師	瀬田益道
助教	永井 誠
準研究員	宮本祐介
研究員	石井 峻、金子紘之
大学院生	16名（数理物質科学研究科後期課程6名、前期課程10名）
卒研究生	4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、銀河面のアンモニア掃天観測や系外銀河中心部のアンモニア観測などを継続している。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と10mテラヘルツ望遠鏡の開発を行った。共同利用の望遠鏡を用いて銀河の観測的研究も行った。

【1】国土地理院つくば32m鏡の電波望遠鏡の開発整備と観測

(1) 観測システムの開発整備

- 国土地理院つくば32mアンテナに搭載しているK帯受信観測システムに発生した不具合を修理、部品交換、改善を行った。特に第1局部発振器として高安定周波数を提供している信号発生器が故障したため修理した。
- K帯受信機を大学に持ち帰って保守を行った。その際に不良部品や性能劣化部品を交換し、再度初期の性能に戻してアンテナに再搭載し、観測に供した。
- アンテナ伝送系カバー（雨除けカバー）の保守点検を実施した。
- アンテナのゲイン（主ビーム能率と開口能率）を測定し、2012年3月とほぼ同じであることを確認した。
- アンテナの指向性が非常に悪くなっており、全天で調査したところ、数10°～100°（=アンテナのビームサイズ）程度急激にずれる箇所がいたるところの方位角(AZ)と仰角(EL)で発生していることが明らかになった。アンテナのAZレールの水平度を測定するとともにその原因を調査したところレールの基礎が大きく劣化しており、レールの位置が大きくずれているとともにその基礎の中に水が入ってもろくなっており車輪が通るたびにレールが上下していることがわかった。今後さらに劣化は加速すると予想され、国土地理院と対応の協議を開始した。
- 観測データの解析環境を整備した（パソコンの追加、メモリ増設、ハードディスク増設等）。

(2) 観測

(VLBI観測)

○天の川銀河（銀河系）の中心核にある巨大ブラックホールにガスが落下することが外国の赤外線観測から予言され、そのときに中心核が赤外線、電波、X線等で明るく輝くと期待された。そのため全世界的に銀河系中心核の明るさのモニターが開始された。国内VLBI網でもK帯でモニターすることが開始され、つくば32m鏡もそれに参加して、6月、8月、11月、12月、1月に実施し、2月からはかなり頻繁に継続して観測していた。また増光は観測されていないが、予言されているガスの落下は2014年3月なのでさらに継続して観測する予定である。

(単一鏡観測)

○天の川銀河の銀河面のうち銀経 -0.5 度 $\sim +1.0$ 度、銀緯 -0.5 度 $\sim +0.5$ 度のアンモニア分子の(J,K)=(1,1)-(6,6)の6輝線の掃天観測から、この領域の分子雲は分子雲の表面で励起温度が ~ 120 K程度と高く、内部は ~ 25 K程度と低いことを明らかにした。これは分子雲が外部から暖められていることを示している。またオルソ・パラ比から過去の温度を求めると、現在の分子雲の温度と同程度であることがわかり、過去も星形成が活発であったことがわかった。

○天の川銀河の中の大質量星形成領域であるW3のアンモニアの(J,K)=(1,1)-(6,6)の輝線観測を行い、星形成の母体である高密度分子ガスの温度、密度、光学的厚み、オルソ・パラ比などを求めた。

○天の川銀河の中の超新星爆発による周囲のガスへの影響を調べるため、超新星残骸IC443のアンモニア観測を行い、検出することができた。その結果から分子ガスの温度、密度、光学的厚み、オルソパラ比などを求めた。

【2】南極天文学の推進

(1) 南極望遠鏡の開発

○30-cm 可搬型サブミリ波望遠鏡

南極ドームふじ基地で運用する電波望遠鏡のプロトタイプとして 30cm 可搬型望遠鏡を開発している。既に試験観測に成功しているが、雑音が高い問題があった。調査の結果、超伝導ミキサの温度低減が雑音の低減に有効であることが判明したので、受信機の改良を行い、受信機雑音温度として 170K 以下という高い感度を低い消費電力の 4K 冷凍機を用いながら実現した。新受信機を搭載した 30cm 望遠鏡は、チリ北部の砂漠地帯の標高 4400m のパリナコッタにて試験観測を行い、オリオン分子雲等の観測に成功した。南極は、夏季でも気温マイナス 30 °C の低温環境にある。モータ及びエンコーダの動作、ケーブルの硬化が懸念される。南極夏に想定される低温環境下での望遠鏡の駆動上の問題点を、要素実験及び計算機による熱解析シミュレーションで検討した。その結果、風の影響が無視できないことが判明したため、必要箇所には断熱材やヒータの補強を行った。耐寒性能を高めた 30cm 望遠鏡を、国立極地研究所の低温室において、実際に望遠鏡を駆動して、低温下での運用に目処をたてた。

○1.2-m サブミリテラヘルツ望遠鏡

ドームふじ基地で、星間ダストのサブミリからテラヘルツ領域での観測を目指して、1.2m 望遠鏡を開発している。冷却受信機に対する要求は、低消費電力で高感度であり、30cm 望遠鏡と共通の技術要求がある。冷却受信機の熱設計の精度が上がり、比較的低い消費電力ながら、4K の冷却が可能で目処がたった。電波望遠鏡の駆動方式は、経緯台式を用いるため、方位角モータの駆動に伴い、仰角モータの電源及び制御ケーブルが可動する必要がある。ところが、南極ドームふじは冬期には気温はマイナス 80°C にも達し、ケーブル硬化の懸念があった。ガラス転移温度の低いケーブルを選定し、冷凍庫実験により、ケーブルの硬さを評価したところ、低温下でも可動が見込めるケーブルを見出す事ができた。

○10-m テラヘルツ望遠鏡

光学系の設計を行った。広い視野を実現するために電波望遠鏡としては初めてリッチークレチアン光学系を採用し、主鏡と副鏡ともに双曲面を用いてコマ収差を無くし、他の収差も第3鏡以下で軽減して平面焦点の場合視野 0.5 度、湾曲焦点の場合視野 1 度を実現することができた。主鏡面パネルの概念設計も行った。口径 10m の主鏡を中心のビーム伝送用の穴を除いて 4 周とし、パネルの大きさをおよそ 1.2m \times 1.2m として内周から順に 10 枚、16 枚、22 枚、28 枚の合計 76 枚と非常に少ない枚数で構成し、支持機構やアクチュエータも含めて予算の軽減を図った。

(2) 超伝導電波カメラの開発

ダブルスロットアンテナと高純度多結晶シリコンレンズを1画素1レンズで結合する光学系設計の妥当性を確かめるために、国立天文台先端技術センターで製作したシリコンレンズアレイの評価を行い、形状誤差 10 μm (P-V 値)以下、表面粗さ 1 μm (rms)以下を達成し、サブミリ波帯で使用するには十分な加工精度を達成したことを示した。また、各カメラのビームパターン測定を行い、理論値とよく一致することを示した(査読論文 3)。

シリコンレンズ表面での最大 30%の反射損失を低減させるため、屈折率 1.8の反射防止膜の開発を行った。低温での接着性が良い屈折率 1.68と 2.2の2種類のエポキシ樹脂を混ぜ合わせることで屈折率の制御を試みた。結果、エポキシ樹脂の体積比により屈折率が線形に変化することを確認し、220 GHz帯にて良好な反射防止特性を得ることに成功した。

素子の多素子化を進めるため、220 GHz帯 720素子カメラの設計を行った。集積度を上げて焦点面を有効利用するため、レンズ直径を波長の 1.2倍にして光学設計を行い、一辺 26 mmの正六角形の中に 720素子を並べることが可能になった。レンズと平面アンテナのアライメント調整機構についても検討し、先端技術センターMEショップでレンズアレイの製作などを進めた。

(3) 人員体制の強化と概算要求等

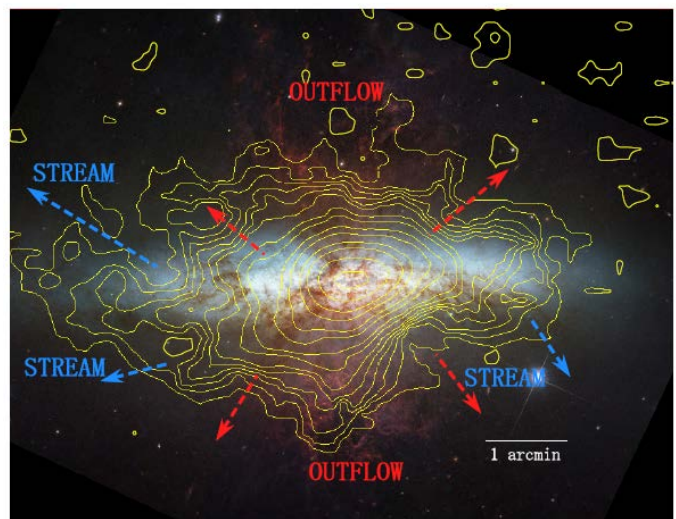
10m テラヘルツ望遠鏡を実現するため、数学等との協力のもと数物連携南極天文学の推進という戦略的研究推進枠として教授1名を採用することが認められた。

国立天文台電波専門委員会、宇宙電波懇談会と日本学術会議物理学委員会天文学宇宙物理学分科会のシンポジウムで報告し、宇宙電波懇談会から日本学術会議当該分科会に推薦された。当該分科会の推薦のもと、東北大学の 2.5m 赤外線望遠鏡と合わせて南極望遠鏡として筑波大学長名で日本学術会議の大型研究計画に申請した。

10m テラヘルツ望遠鏡の概算要求を数理物質系に提出し、系から第1位で大学本部に提出され、本部で説明を行った。

【3】銀河の観測的研究

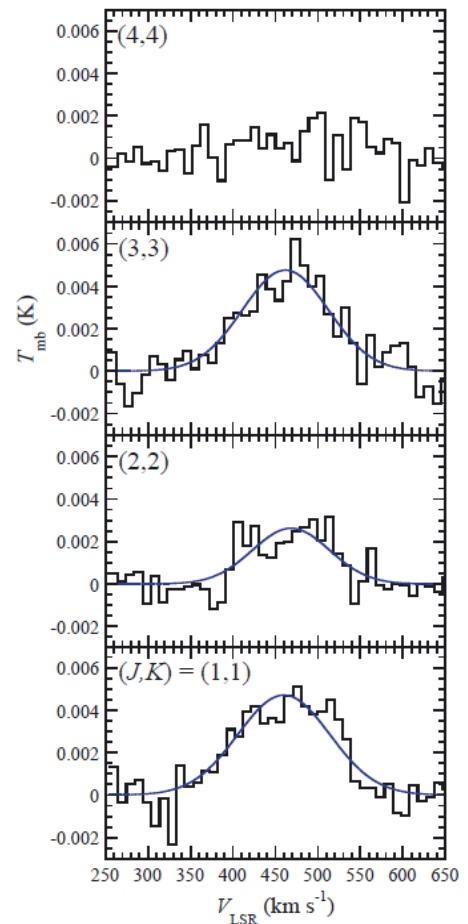
- (1) 近傍にある典型的な爆発的星形成銀河 M82 の広域 (15.7 \times 16.9') の CO(J=1-0)マッピングを野辺山 45m 電波望遠鏡で行った(査読論文 1)。25点同時観測システム BEARS を用いて OTF で行い、角分解能は 22'であった。銀河円盤部の大量の分子ガスのほかに銀河円盤から 4kpc も離れたところまで分子ガスを検出した(右図)。これは銀河中心部での超新星爆発や星風によって吹き飛ばされたものと解釈される。その分子ガスの力学的エネルギーは $\sim 10^{56}$ erg に達する。全分子ガスの質量は 2.4×10^9 Mo であった。また銀河中心部、他の円盤部、吹き飛ばされたハロー部のそれぞれの分子ガスの密度や温度も推定した。



(2) 近傍渦巻銀河 M51 の中心部において MPIFR の 100m 電波望遠鏡でアンモニア NH_3 の $(J,K)=(1,1)$ - $(4,4)$ を観測し (右図)、 $(J,K)=(1,1)$ - $(3,3)$ を検出した (査読論文 4)。 $(J,K)=(1,1)$ - $(2,2)$ から求めた励起温度は $T_{\text{ex}} = 25 \pm 2 \text{ K}$ であり、 $(J,K)=(2,2)$ - $(4,4)$ から求めた励起温度は $T_{\text{ex}} < 104 \pm 16 \text{ K}$ であった。アンモニアの柱密度は $N(\text{NH}_3) = (8.1 \pm 2.4) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ であり、水素分子 H_2 に対する存在比は $\sim 4.5 \times 10^{-9}$ であった。これは NGC 253 や IC 342 の 1/5 であるが、M82 や LMC より 1 桁多い。この結果、M82 におけるアンモニアの異常な低存在比が一層再確認された。

(3) 重力相互作用初期にある VV 254 からの $\text{Pa}\alpha$ 撮像観測をチリにある miniTAO/ANIR 望遠鏡を用いて行った (査読論文 6)。VV 254 は銀河同士が正面衝突した直後の銀河ペアであり、分子雲がほぼ同時期に電離され、再度分子雲へと戻ったと期待される銀河ペアである。 $\text{Pa}\alpha$ から求められた星形成領域における星形成後の経過時間は銀河全体にわたって 7×10^6 年ではほぼ一定になっており、また、星形成活動・分子ガス関係の分散は他の銀河に比べ 1 桁以上小さい (0.058 dex)。これは星形成の母体である個々の分子雲の進化段階がほぼ一致している場合、同じように星形成が進行するというを示唆している。

(4) 相互作用の初期～中期段階にある 4 つの相互作用銀河に対して $\text{CO}(J=1-0)$ マッピング観測を野辺山 45m 電波望遠鏡で行った (査読論文 8)。これまでに観測されていなかった銀河円盤部分や銀河間の領域からも分子ガスを検出した。これらの分子ガスの分布は原子ガスや銀河が相互作用する前から存在する古い恒星の分布とは大きく異なり、重力相互作用の影響は物質により異なることが分かった。分子ガスの銀河中心への集中度は孤立銀河に比べて優位に低く、分子ガスは広く分布したり、銀河の中心とは異なる場所にピークを持つなどこれまでの描像とは異なることが明らかになった。



<論 文>

(査読論文)

1. Salak, D., Nakai, N., Miyamoto, Y., Yamauchi, A., “Large-Field $\text{CO}(J=1-0)$ Observations of the Starburst Galaxy M82”, 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted.
2. Ishii, S., Seta, M., Nakai, N., Miyamoto, Y., Nagai, M., Arai, H., Maezawa, H., Nagasaki, T., Miyagawa, N., Motoyama, H., Sekimoto, Y., Bronfman, L., 2013, “Development of a Transportable Telescope for Galactic Survey at 500 GHz in Antarctica”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 3, 15-24.
3. Nitta, T., Naruse, M., Sekimoto, Y., Mitsui, K., Okada, N., Karatsu, K., Sekine, M., Matsuo,

- H., Noguchi, T., Uzawa, Y., Seta, M., Nakai, N., “Beam Pattern Measurements of Millimeter-wave Microwave Kinetic Inductance Detector Camera with Direct Machined Silicon Lens Array”, 2013, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 3, 56-62.
4. Naruse, M., Sekimoto, Y., Noguchi, T., Miyachi, A., Karatsu, K., Nitta, T., Sekine, M., Uzawa, Y., Taino, T., Myoren, H., “Optical Efficiencies of Lens-Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors”, 2013, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 3, 180-186.
 5. Takano, S., Takano, T., Nakai, N., Kawaguchi, K., Schilke, P., “Detection of ammonia in M51”, 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 552, A34, 5p.
 6. Onodera, S., Kuno, N., Tosaki, T., Muraoka, K., Miura, R., Kohno, K., Nakanishi, K., Sawada, T., Komugi, S., Kaneko, H., Hirota, A., Kawabe, R., "NRO M33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC): II. Dense Gas Formation within Giant Molecular Clouds in M33", 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 1330
 7. 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”, 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, A103, 12p
 8. 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”, 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, A51, 10p
 9. Komugi, S., Tateuchi, K., Motohara, K., Takagi, T., Iono, D., Kaneko, H., Ueda, J., Saitoh, T. R., Kato, N., Konishi, M., Koshida, S., Morokuma, T., Takahashi, H., Tanabé, T., Yoshii, Y. "The Schmidt-Kennicutt Law of Matched-age Star-forming Regions; Pa α Observations of the Early-phase Interacting Galaxy Taffy I", 2012, *The Astrophysical Journal*, 757, 138-143
 10. Miura, E. R., Kohno, K., Tosaki, T., Espada, D., Hwang, N., Kuno, N., Okumura, K. S., Hirota, A., Muraoka, K., Onodera, S., Minamidani, T., Komugi, S., Nakanishi, K., Sawada, T., Kaneko, H., Kawabe, R., "Giant Molecular Cloud Evolutions in the Nearby Spiral Galaxy M33", 2012, *The Astrophysical Journal*, 761, 37-59
 11. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., “Properties of Molecular Gas in Galaxies in Early and Mid Stages of the Interaction. I. Distribution of Molecular Gas”, 2013, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, A20, 16p
 12. 真鍋武嗣、西堀俊幸、菊池健一、落合啓、瀬田益道、大嶺裕幸、「JEM/SMILES 用サブミリ波アンテナ・受信機光学系」, 2012, 電子情報通信学会論文 J95-B, 990-1002

(国際研究集会集録等)

1. Tsuboi, M., Asaki, Y., Yonekura, Y., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Kameya, O., Miyoshi, M., Takaba, H., Wakamatsu, K., Fukuzaki, Y., Morimitsu, T., Sekido, M., Omodaka, T., Handa, T., Takumi, A., “Non-detection of flare at 22 GHz of Sgr A* induced by the approaching G2 cloud in February and March 2013”, 2013, *The Astronomer’s Telegram* #4923.
2. Seta, M., Nakai, N., Ishii, S., Nagai, M., Miyamoto, Y., Ichikawa, T., Takato, N., Motoyama, H., “Dome Fuji in Antarctica as a Site for Infrared and Terahertz Astronomy”, 2013, *Astrophysics from Antarctica, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 288, 251-255.

3. Nitta, T., Naruse, M., Sekimoto, Y., Mitsui, K., Okada, N., Karatsu, K., Sekine, M., Matsuo, H., Noguchi, T., Uzawa, Y., Seta, M., Nakai, N., "Development of Direct Machined Silicon Lens Array for Millimeter-wave Kinetic Inductance Detector Camera", 2013, Proceedings of 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology.
4. Nagasaki, T., Seta, M., Nakai, N., Ishii, S., Miyamoto, Y., Nagai, M., Arai, H., Terabe, Y., Imada, H., Saitou, K., Doihata, K., Sekimoto, Y., "Receiver for 30cm transportable submillimeter-wave telescope", 2013, The 13th Workshop on Submm wave Receiver Technologies in Eastern Asia (10-12.Jun.2013).
5. Nagasaki, T., Seta, M., Nakai, N., Ishii, S., Miyamoto, Y., Nagai, M., Arai, H., Terabe, Y., Imada, H., Saitou, K., Doihata, K., Sekimoto, Y., "Development of a new receiver for transportable 30cm submillimeter-wave telescope" 2013, The 24th International Symposium on Space Terahertz Technology(8-10 Apr. 2013).
6. Imada, H., Miyata, T., Sako, S., Kamizuka, T., Nakamura, T., Asano, K., Uchiyama, M., Okada, K., Wada, T., Nakagawa, T., Onaka, T., Sakon, I., "Fabrication and tolerances of moth-eye structures for perfect antireflection in the mid-infrared wavelength region", 2012, Proceedings of SPIE, Vol. 8450, 84502F.
7. Kamizuka, T., Miyata, T., Sako, S., Imada, H., Nakamura, T., Asano, K., Uchiyama, M., Okada, K., Wada, T., Nakagawa, T., Onaka, T., Sakon, I., "Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye antireflection structure for mid-infrared astronomy", 2012, Proceedings of SPIE, Vol. 8450, 845051.

<学会発表>

1. 関根正和、関本裕太郎、野口卓、唐津謙一、新田冬夢、関口繁之、宮地晃平、成瀬雅人
「積層ハイブリッド型超伝導共振器カメラの開発」
応用物理学会（2013年3月27日、神奈川工科大学）
2. 齋藤浩太、瀬田益道、永井誠、宮本祐介、石井峻、中井直正、長崎岳人、今田大皓、土井畑幸一郎、ほか宇宙観測グループ（筑波大学）
「南極サブミリ波望遠鏡の電気系統の設計と評価試験」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）
3. 長崎岳人、石井峻、瀬田益道、中井直正、宮本祐介、永井誠、荒井均、寺部佑基、今田大皓、齋藤浩太、土井畑幸一郎、関本裕太郎
「南極30cm可搬式サブミリ波望遠鏡搭載用2SB受信機の開発」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）
4. 今田大皓、瀬田益道、石井峻、中井直正、宮本祐介、長崎岳人、永井誠
「南極30cm可搬型サブミリ波望遠鏡アライメント調整法の開発」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）
5. 永井誠、石井峻、今田大皓、瀬田益道、寺部佑基、中井直正、長崎岳人、宮本祐介
「オフセット・カセグレン／グレゴリアン式望遠鏡のポインティング模型の新しい定式化」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）
6. 新田冬夢、関本裕太郎、唐津謙一、三ツ井健司、岡田則夫、松尾宏、野口卓、成瀬雅人、関口繁之、関根正和、瀬田益道、中井直正
「Al膜超伝導共振器を用いた1000素子ミリ波カメラの開発」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）

7. 関口繁之、唐津謙一、野口卓、松尾宏、岡田則夫、齋藤栄、関本裕太郎、成瀬雅人、新田冬夢、関根正和
「広視野ミリ波・サブミリ波カメラの冷却光学系設計」
日本天文学会（2013年3月22日、埼玉大学）
8. 荒井均、永井誠、藤田真司、中井直正、他宇宙観測グループ一同（筑波大学）、栗原忍、他宇宙測地グループ（国土地理院）
「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡によるアンモニア分子反転遷移輝線の銀河系中心領域広域サーベイ観測」
日本天文学会（2013年3月21日、埼玉大学）
9. 唐津謙一、関本裕太郎、野口卓、鶴澤佳徳、松尾宏、成瀬雅人、新田冬夢、関根正和、関口繁之、他 LiteBIRD Working Group
「宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 LiteBIRD のための多素子超伝導共振器カメラの設計」
日本天文学会（2013年3月21日、埼玉大学）
10. 成瀬雅人、関本裕太郎、唐津謙一、野口卓、新田冬夢、関根正和、関口繁之、他 LiteBIRD Working Group
「力学インダクタンス検出器と平面アンテナを用いた LiteBIRD 用両偏波ミリ波カメラの開発」
日本天文学会（2013年3月21日、埼玉大学）
11. 指田朝郎、岡朋治、田中邦彦、松村真司、瀬田益道、永井誠
「 $\text{HC}0^+ \text{ J}=1-0$, $\text{CO J}=3-2$ 輝線による W44 超新星残骸の膨張運動の解析 (II) 」
日本天文学会（2012年9月20日、大分大学）

<学位論文>

（博士論文）

数理解物質科学研究科・物理学専攻

1. 荒井均

「A Multi-Line Ammonia Survey of the Galactic Center Region with the Tsukuba 32-m Telescope」

（つくば 32m 電波望遠鏡を用いた銀河系中心領域のアンモニア多スペクトル線掃天観測）

（修士論文）

数理解物質科学研究科・物理学専攻

1. 今田大皓

「南極 10m サブミリ波望遠鏡の光学系の開発」

2. 齋藤浩太

「南極サブミリ波望遠鏡の電気系統設計と評価試験」

3. 土井畑幸一郎

「南極可搬型サブミリ波望遠鏡アンテナ系の熱設計」

（卒業論文）

理工学群・物理学類

1. 奥富弘基

「超新星残骸 IC443 に付随する分子雲のアンモニア分子輝線観測」

2. 北本翔子

- 「つくば 32m アンテナの性能評価」
3. 小林和貴
「つくば 32m 望遠鏡のアンテナレール調査」
 4. 笠 嗣瑠
「アンモニア観測による大質量星形成領域 W3(OH) の研究」

<外部資金>

1. 科学研究費補助金（基盤研究 A）：中井直正（研究代表者）、瀬田益道
「天の川のアンモニア掃天観測」
（交付額 410 万円）（5/5 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 590 万円）（3/4 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 47 万 7 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 1374 万 9 千円）（3/3 年）
5. 国立極地研究所平成 24 年度研究プロジェクト：中井直正（研究代表者）、瀬田益道、他
「ドームふじ基地における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓」
（交付額 270 万円）（3/6 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 730 万円 7 千円）（3/3 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 509 万 6 千円）

<共同研究・受託研究>

1. 「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究」
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2012 年 4 月 1 日～2013 年 3 月 31 日）

<受賞>

1. 筑波大学大学院・数理物質科学研究科長賞（2013 年 3 月 25 日）
今田大皓
2. 理工学群・物理学類長賞（2013 年 3 月 25 日）
北本翔子

V. 原子核理論グループ

教授	矢花 一浩	
准教授	寺崎 順	(HPCI 戦略プログラム分野5)
講師	橋本 幸男	
研究員	谷口 億宇	(計算科学研究センター)
研究員	須原 唯広	(日本学術振興会特別研究員)
大学院生	10 名	

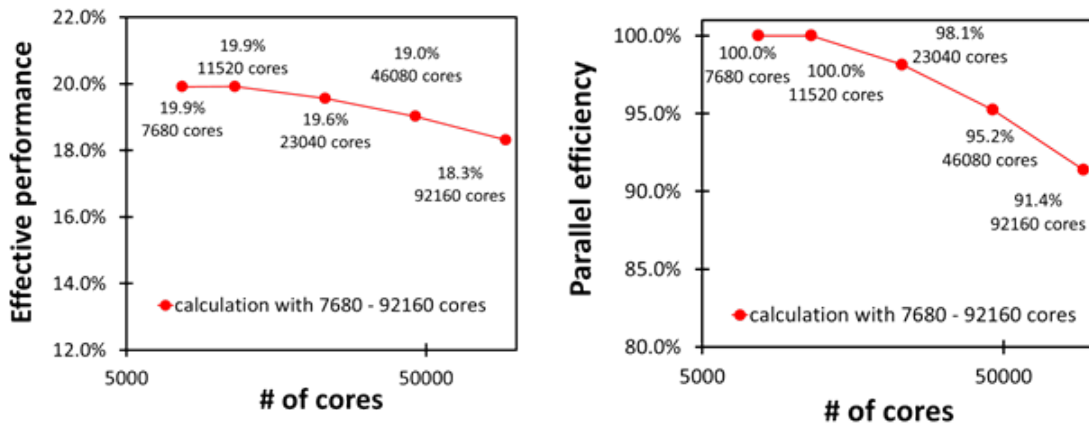
【1】時間依存密度汎関数理論による物質中の電子ダイナミクス計算

(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・シミュレーション (矢花、篠原、佐藤、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington)、李 (APRI))

光とバルク物質 (結晶) との相互作用は、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を含む構成関係式で取り入れられる。ところが近年発展の著しい極限的な光科学 (短パルス極限であるアト秒科学、物質中の電場と光電場が同程度となる高強度光科学など) では、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して扱うことが許されず、巨視的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同時に結合して解くことが必要とされている。また、可視光の波長は μm 領域、電子ダイナミクスは nm 以下の空間スケールであることから、この問題はマルチスケール物理の課題となっている。

昨年度我々は、パルス光が半導体表面に垂直に入射する場合に関して、高強度パルス光が物質中を伝播し、光電磁場から電子にエネルギーが不可逆に移行する過程を記述するマルチスケール・シミュレーション法の開発に成功した。この計算は、巨視的マクスウェル方程式を解くために用意する各巨視的格子点で、微視的電子ダイナミクスを独立に解くため、簡単な1次元の光伝播に対しても数千コアを要する大規模な数値計算となる。本年度の前半に、京コンピュータの試験運用を利用して、このマルチスケール・シミュレーションコードの高効率な並列化に取り組んだ。下の図は、実行効率と、強スケーリングのもとでの並列化効率を示している。ハイブリッド並列のもとで、およそ7000コアから90000コアの間で実行効率はおよそ18-20%の高い値を示し、また7680コアを基準として90000コアを越える並列度においても並列化効率は90%を越える値となっているなど、スケーリングに優れていることが示された。

本研究で作成した計算コードは、フェムト秒レーザーパルスと物質の相互作用を調べる上で極めて有効である。この課題に関し、本年度よりマックスプランク量子光学研究所のアト秒科学実験グループと共同研究を開始している。また、韓国APRI、ウィーン工科大の理論グループとの共同研究



を立ち上げつつある。

- (2) 半金属Sbのコヒーレントフォノン生成機構の解明 (篠原、佐藤、矢花、岩田 (東大)、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

パルス光がバルク物質 (結晶) に照射した際に見いだされる現象の一つに、巨視的な空間領域で結晶を構成する原子が一様に運動するコヒーレントフォノンがある。本年度は、半金属Sbを対象に、コヒーレントフォノン生成のメカニズムを調べた。実験的には光学フォノンの種類に応じて異なるフォノン生成メカニズムが見いだされているが、計算の結果は同一のメカニズム (実励起型) を示唆しており、観測事実を説明することはできなかった。また、現象論としてしばしば用いられる2テンソル模型に基づく記述の正当性を理論的に調べた。

- (3) パルス光により励起した半導体の誘電応答に対するポンプ・プローブ数値実験 (佐藤、篠原、矢花、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

パルス光により励起した物質の誘電率は、フェムト秒程度の時間で大きく変化することが知られている。我々は、ポンプ・プローブ実験に相当する数値シミュレーションを行い、ポンプ光電場により励起した半導体にプローブ光電場を印加し、そのプローブ光電場によって生じたカレントを調べることにより、励起した物質の誘電率を調べた。その結果、誘電率の実部は、励起したキャリアが自由電子として振る舞うことを仮定したドルーデ模型により定量的に記述されることが分かった。一方誘電率の虚部は、より複雑な振る舞いをするのが明らかになった。

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

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

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

【2】原子核の励起状態

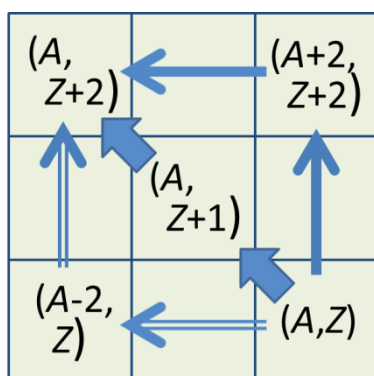
- (1) 二重ベータ崩壊行列要素のQRPA計算 (寺崎)

寺崎は、準粒子乱雑位相近似 (QRPA) を用いて、ニュートリノ質量を決めるためのニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素の計算に平成23年度に引き続き取り組んでおり、この課題は平成24年度、科研費研究活動スタート支援に採択されている (2年目)。もしこの崩壊が観測されれば、原子核行列要素の二乗と電子の位相空間因子の積 (理論計算) とその崩壊の寿命 (実験測定) からニュートリノ質量の期待値が求められる。

原子核行列要素は、ニュートリノポテンシャルの二体相互作用行列、始状態と終状態から求めた二種類のQRPA励起中間状態の重複行列、始状態と終状態からQRPA励起中間状態への二つの二核子移行遷移行列の積のトレースによって求められる。

本研究の特徴の一つは、下図に示すように、二核子移行を経由する反応を考えていることである。これは完全性近似のもとで可能であるが、いままで用いられたことがない。この方法により、荷電変化反応に適用した際 QRPA はあまり良い近似でないという問題を避けることができ、また、原子核行列要素の重要な部分を実験的に直接検証する可能性をもたらす。もう一つの特徴は、今まで他の人々が用いてきた方法よりもずっと精密な QRPA 状態の重複の計算方法を用いていることである。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、重複行列の特性をうまく使い、強力な並列計算機を用いれば、その常套的考え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が特筆される。平成 24 年度の進展は、以下のとおりである。

1. 平成 24 年度に開発した、QRPA 励起状態の重複の計算方法の数学的性質を詳細に調べ、かつ数値計算可能であることを二つのテストケースで示し、それらの研究結果を二編の原著論文で発表した。
2. ニュートリノポテンシャルの二体相互作用行列を計算するプログラムを開発した。この計算に必要な関数は積分可能な特異点を持つのであるが、その特異性が数値積分の精度に影響しないように工夫してある。
3. 放出される電子の位相空間因子を計算するプログラムを開発した。
4. 上記 1 と 2 で求まる重複行列と二体相互作用行列、並びに二核子移行の遷移行列を用いて、原子核行列要素を求めるプログラムを開発した。 ^{150}Sm 、 ^{150}Nd 並びにこの質量数領域の 2, 3 の原子核の Skyrme-QRPA 計算を複数の K^π について実行し、QRPA 励起状態を得た。現在質量数 150 近辺で QRPA 状態の重複計算と二体相互作用行列計算を京コンピュータ上で大規模に実行するため準備を進めている。



核図表 (縦軸: Z 、横軸: N) 上でのニュートリノレス二重ベータ崩壊の経路 (対角線) と完全性近似のもとで計算上可能な二核子移行 (水平方向と鉛直方向の遷移) 経路。A は質量数。

(2) 多 Slater 行列式の重ね合わせによる ^{12}C 原子核の記述 (福岡、矢花、船木 (理研)、中務 (理研))

構造に何ら仮定を置くことなく、現実的核力から出発して非経験的に原子核の基底状態と励起状態を計算により記述し予言することは、今日の原子核理論の最重要課題の一つとなっている。しかし、 ^{12}C より重い原子核や、基底状態とは大きくことなる構造を持つ励起状態に対して、収束した解をえることは容易ではない。本研究で我々は、現実的な核力ではなく、単純化された有効核力のもとで、収束した解である多体波動関数を得ることを目的として本研究を進めている。本年度、Skyrme 力を用いて ^{12}C の基底状態と励起状態を総合的に調べ、論文にまとめた。方法論の特色として、通常基底状態を得るために用いられる虚時間計算法をさまざまなクラスター相関を持つ多体波動関数を生成するために利用していることが挙げられる。計算は、得られた多数の多体波動関数にパリティ及び角運動量の射影を行い、配位混合計算により励起スペクトルや遷移行列要素を得るという方法で行っている。

(3) Gogny 力を用いた時間依存平均場計算 (橋本)

原子核の集団運動を記述する方法の中でも時間依存平均場の方法は、理論的な枠組みの展開においても、また、実際の現象に対応した定性的・定量的な説明・記述を行ううえでも中心的な役割を果たしてきた。時間依存平均場の方法の中では、時間依存ハートレーフォック (TDHF) が広く用いられている。TDHFは、スキルム有効相互作用を用いた密度汎関数理論として位置づけられ、計算機の能力向上によって核図表上の広い範囲の原子核を対象とした応用が可能になっている。TDHFは、ゼロレンジの力であるスキルム有効相互作用と3次元空間格子の組み合わせにより、計算コードがシンプルで適応範囲の広いツールとなった。最近では、中性子過剰核のダイナミクスにおける対相関の役割を研究するために、空間格子によるスキルム力+時間依存ハートレーフォックボゴリュボフ (TDHFB) の枠組みが提案されている。

一方、ゴグニー有効相互作用は、そのレンジが有限の大きさを持つことで、平均場計算に用いられる基底はもっぱら調和振動子基底であった。そこで、連続状態と束縛状態の間に対相関が働く中性子過剰核の運動を記述するうえでは空間格子が便利であることに着目し、ゴグニー有効相互作用でも空間格子を用いた平均場計算が可能な枠組みを作ることを目指している。ゴグニー有効相互作用の場合には、ガウス型の相互作用形のおかげで対相関の働く空間に自然なカットオフが入る点がメリットである。一方、有限なレンジのために、2体相互作用の行列要素の計算にCPU時間をとられることになる。2012年度は、ラグランジュ格子点を利用したTDHFBのコードを作成し、酸素 ^{16}O 、 ^{20}O 、ネオン ^{20}Ne 、マグネシウム ^{34}Mg などの核において四重極型の振動運動の線形応答計算を試みた。対相関が無い系ではTDHF計算になる。 ^{16}O 、 ^{20}O 、 ^{20}Ne についてHFおよびHFB基底状態を求め、線形応答の計算を行い、エネルギー保存を確認した。また、強度関数が調和振動子基底による計算のものとはほぼ同じになることを示した。 ^{34}Mg の四重極型線形振動の計算は現在も継続中である。エネルギー保存のための定式化に時間が掛かってしまったが、調和振動子基底を用いた場合のエネルギー保存と同程度の精度を出せるようになった。

(4) 励起状態に現れる変形状態とクラスタ相関 (谷口)

原子核は励起により多彩に構造が変化する。低励起状態では変形構造とクラスタ構造が重要である。クラスタ構造は、原子核が複数の塊に分かれて局在した、空間的な相関の強い構造である。本年度はカルシウム42 (^{42}Ca) や硫黄同位体の低励起状態の構造の研究を行った。

^{42}Ca には変形回転帯や ^{38}Ar への α 移行反応で強く生成される構造が低励起状態に存在する。後者は α - ^{38}Ar クラスタ構造を示唆する。しかし、 ^{42}Ca について変形やクラスタ構造の両方を扱った理論的研究はなく、その詳細な構造は理解されていなかった。

谷口は様々な変形状態や α - ^{38}Ar クラスタ構造波動関数を重ね合わせてハミルトニアンを対角化することにより、実験的に発見されている変形回転帯や α 移行反応でよく生成される励起状態を再現した。また、 α 移行反応でよく生成される励起状態の上に立つ変形回転帯や、さらに別の大きく変形した変形状態 (超変形状態) が存在することを予言した。

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

本年度は、 ^{35}S などの硫黄同位体の励起状態に現れる変形状態を研究した。励起状態に変形状態が存在することを予言した。その変形状態は、特に陽子密度分布が対称な括れ構造をしており、これは ^{16}O - ^{16}O クラスタ構造成分を多く含むことを示唆している。

^{42}Ca や硫黄同位体の研究結果から、変形状態はクラスタ構成成分を含むことが予想される。クラスタ構成成分は、多核子移行あるいは捕獲反応断面積と密接に関係していることが予想され、それは元素合成などにも重要である。

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

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

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

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

【3】原子核の反応

(1) トリプルアルファ反応率の虚時間理論 (赤堀、矢花、船木 (理研))

トリプルアルファ反応は、3つの α 粒子が同時に衝突して ^{12}C 原子核を生成する反応であり、元素合成や星の構造を理解する上で極めて重要な反応である。この反応率を直接実験で調べることはできないため、理論的な評価が重要となる。融合のメカニズムに関して、高温では ^{12}C の O_2 状態、いわゆる Hoyle 状態を経由した過程が主要であり、より低温では共鳴状態としてある時間存在する ^8Be 核が、第3の α 粒子と非共鳴的に衝突し生成する過程が重要となる。さらに低温では、3つの α 粒子が共鳴状態を経ることなく ^{12}C が生成される非共鳴過程が重要となると考えられている。この反応率に対して、最近、量子3体理論に基づいた評価がいくつかのグループによりなされた。しかしそれらの結果は、低温領域において 10^{20} を超える差異があり、反応率の理論的評価は混んとした状況にある。

トリプルアルファ反応率を理論的に評価する上で困難となる点の一つは、3つの電荷を持つ粒子の散乱問題に対して、適切な定式化が知られていないことである。このため、3体反応の断面積や散乱振幅を求める際に、何かしらの近似が必要となる。我々はこの困難を克服する方策として、温度の逆数を虚時間とみなす、光捕獲反応率に対する虚時間理論を提案した。この理論を用いると、散乱問題を解くことなく反応率を得ることが可能となるため、特にトリプルアルファ反応率の計算に適している。我々は虚時間理論に基づく計算によりトリプルアルファ反応率に関して次の結論を得ている。①従来用いられてきた反応率 (NACRE) が、我々の微視的な3体理論計算により高い精度で再現されること、②チャネル結合法を用いる場合、チャネルを制約すると何十桁もの反応率の増大をもたらす危険があること、チャネル数に対する収束性が著しく遅いこと、③R 行列理論と虚時間理論を組み合わせることにより、従来用いられてきた反応率 (2体反応が連続して起こるプロセスを仮定) の導出がサポートされること、を示すことができた。現在、これらの結果を論文にまとめている。

(2) 多核子移行反応の TDHF 計算 (関澤、矢花)

我々は、低エネルギー原子核衝突の周縁部で重要となる核子移行反応に対して、時間依存 Hartree-Fock 理論に基づく記述を検討している。今年度、実験的な測定がなされている系 40

$^{48}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 、 $^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ に対する TDHF 計算の結果を論文にまとめた。さらに、KISS 計画の準備段階として KEK の実験グループが行っている $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ 衝突に対して、移行反応に基づく原子核生成断面積の評価を行った。

<学位>

1. 理学博士：

篠原 康 「Study on coherent phonon generation based on time-dependent density functional theory」

2. 理学修士：

西山了史 「Gauss 基底展開法を用いた Gogny-TDHF による軽い核の線形応答」

赤堀孝彦 「低温領域におけるトリプルアルファ反応率の虚時間法を用いた研究」

植草雅人 「ハイブリッド汎関数を用いた電子ダイナミクス計算」

高宮悠介 「Kadanoff-Baym 方程式による原子分子の光応答の研究」

<発表論文>

1. Nonadiabatic generation of coherent phonons

Yasushi Shinohara, Shunsuke A. Sato, Kazuhiro Yabana, Tomohito Otobe, Jun-ichi Iwata, George F. Bertsch

J. Chem. Phys. 67, 22A527 (2012), 138, 029903 (2013) Erratum.

2. Imaginary-time method for the radiative capture reaction rate

K. Yabana, Y. Funaki

Phys. Rev. C85, 055803 (2012).

3. Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer processes in $^{40, 48}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$, $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, and $^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ reactions

K. Sekizawa, K. Yabana

arXiv:1303.0552 [nucl-th], submitted to Phys. Rev. C.

4. Dielectric response of laser-excited silicon

S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, G.F. Bertsch,

arXiv:1303.3249 [cond-mat.mtrl-sci], submitted to Phys. Rev. B.

5. Large scale calculations for cluster structure of light nuclei with Skyrme interaction

Y. Fukuoka, Y. Funaki, T. Nakatsukasa, K. Yabana

J. Phys. Conf. Ser. 436, 012012 (2013)

6. Stochastic approach to correlations beyond the mean field with the Skyrme interaction

Y. Fukuoka, T. Nakatsukasa, Y. Funaki, K. Yabana

AIP Conf. Proc. 1491, 222-225 (2012)

7. Overlap of quasiparticle random-phase approximation states for nuclear matrix elements of the neutrino-less double- β decay

- J. Terasaki
Phys. Rev. C 86, 021301(R) (2012)
8. Testing Skyrme energy-density functionals with the QRPA in low-lying vibrational states of rare-earth nuclei
J. Terasaki
Prog. Theor. Phys. Suppl. no. 196 (2012) 377
 9. Overlap of quasiparticle random-phase approximation states based on ground states of different nuclei: Mathematical properties and test calculations
J. Terasaki
Phys. Rev. C 87, 024316 (2013).
 10. Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
J. Terasaki
Acta Physica Polonica B 44, 259 (2013).
 11. Computational Nuclear Quantum Many-Body Problem: The UNEDF Project
S. Bogner, A. Bulgac, J. Carlson, J. Engel, G. Fann, R.J. Furnstahl, S. Gandolfi, G. Hagen, M. Horoi, C. Johnson, M. Kortelainen, E. Lusk, P. Maris, H. Nam, P. Navratil, W. Nazarewicz, E. Ng, G.P.A. Nobre, E. Ormand, T. Papenbrock, J. Pei, S. C. Pieper, S. Quaglioni, K. Roche, J. Sarich, N. Schunck, M. Sosonkina, J. Terasaki, I. Thompson, J.P. Vary, S.M. Wild
Submitted to Computer Physics Communications
 12. Linear responses in time-dependent Hartree-Fock Bogoliubov Method with Gogny interaction, Y.Hashimoto
Eur. Phys. Journ. A 48(2012): 55.
 13. Separation of a Slater Determinant Wave Function with a Neck Structure into Spatially Localized Subsystems
Y. Taniguchi and Y. Kanada-En'yo
Prog. Theor. Phys. 128, 349-362 (2012).
 14. Prolate, oblate, and triaxial shape coexistence, and the lost magicity of $N = 28$ in ^{48}S
M. Kimura, Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, and K. Ikeda
Phys. Rev. C 87, 011301(R) (2013).
 15. Adiabatic internuclear potentials obtained by energy variation with the internuclear-distance constraint
Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo and T. Suhara
Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 043D04 (2013).
 16. Cluster correlations in largely deformed states
Y. Taniguchi

Jour. Phys. Conf. Ser. 436, 012055 (2013)

17. Separation of a Slater Determinant Wave Function with a Neck Structure into Spatially Localized Subsystems

Y. Taniguchi and Y. Kanada-En'yo

Few-Body Syst. DOI 10.1007/s00601-013-0623-3 (2013)

18. Cluster and deformation in C isotopes

Yoshiko Kanada-En'yo, Fumiharu Kobayashi, Tadahiro Suhara

AIP Conf. Proc. 1491, 5-9 (2012)

19. $2\alpha+t$ cluster structure in ^{11}B

Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo

Few-Body Syst. (2013)

20. Cluster structures of excited states in ^{11}B

Tadahiro Suhara and Yoshiko Kanada-En'yo

accepted by IOP Conference Series (Cluster12)

21. Cluster correlation in light nuclei

Yoshiko Kanada-En'yo, Fumiharu Kobayashi, and Tadahiro Suhara

accepted by IOP Conference Series (Cluster12)

22. Three-dimensional structure of low-density nuclear matter

M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi,

Phys. Lett. B713, 284, 2012

23. Non-uniform structures in low-density nuclear matter and neutron star crust.

M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi

PoS (NIC XII) 218

24. Three-dimensional calculation of inhomogeneous nuclear matter

M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi

AIP Conf. Proc. 1484, 394 (2012)

<国際会議発表>

1. Ab-initio theory for intense laser pulses in solids

K. Yabana

Korean Physical Society 2012 Spring Meeting, April 25-27, 2012, Daejeon, Korea

2. Ab-initio theory for intense laser pulses in solids

K. Yabana

6th International Conference on Laser Probing, June 4-8, 2012, Paris, France

3. Real-time electron dynamics in solids under strong electromagnetic fields
K. Yabana
ISSP-CMSI International Workshop/Symposium on Material Simulation in Petaflops era (MASP2012),
June 27, 2012, Tokyo, Japan
4. Time-Dependent Density Functional Theory for Electron Dynamics
K. Yabana
BERTSCHFEST, UW, Seattle, Sept. 7-9, 2012
5. Ab-initio description for the interaction of intense laser pulses with solids
K. Yabana
Frontiers in Intense Laser-Matter Interaction Theory (FILMITH), Sept. 19-21, 2012, Max Planck
Institute fur Quantenoptik, Garching, Germany
6. Triple-alpha reaction rate - tunneling of three charged particles
K. Yabana
Many-body Open Quantum Systems: From Atomic Nuclei to Quantum Optics, Sept. 24-28, 2012, ECT*,
Trento, Italy
7. Multi-scale first-principles approach for strong electromagnetic fields in solids
K. Yabana
Int. Symp. on Computics: Quantum Simulation and Design, Oct. 11-13, 2012, Osaka, Japan
8. A New Theoretical Approach for Triple-alpha Reaction Rate
K. Yabana
1st Visiting NAOJ Fellow Workshop on Element Genesis and Cosmic Chemical Evolution: r-process
perspective, Oct. 17-19, 2012, RIKEN Nishina Hall
9. Time-dependent density functional theory for ultrafast electron dynamics in solid
K. Yabana
Computational approaches to nuclear many-body problems and related quantum systems, Feb.
12-16, 2013, RIKEN, Wako, Japan
10. Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
J. Terasaki
XLVII Zakopane Conference on Nuclear Physics, Extremes of the Nuclear Landscape, Zakopane,
Poland, Aug. 27-Sep. 2, 2012.
11. Effects of pairing correlation in anharmonic collective vibrations
in $^{44,52}\text{Ti}$ with Gogny-TDHF (poster)
Y. Hashimoto
The 4th International Conference on "Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions",
Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, Oct. 22-26, 2012.

12. Separation of a Slater determinant wave function with a neck structure into spatially localized subsystems,
Y. Taniguchi and Y. Kanada-En'yo
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012.

13. Cluster correlations in largely deformed states
Y. Taniguchi
10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster12), Debrecen, Hungary, Sept. 24-28, 2012.

14. Cluster correlations in largely deformed states
Y. Taniguchi
Large-scale computations for nuclear alpha-particle condensation, Wako, Japan, Nov. 13-19, 2012.

15. Cluster structures of excited states in ^{11}B
T. Suhara
10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster12), Debrecen, Hungary, Sept. 24-28, 2012.

16. $2\alpha+t$ cluster structures in ^{11}B
T. Suhara
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012.

17. Real-Time TDDFT simulation for coherent phonon generation in crystalline solids
Y. Shinohara, S. A. Sato, K. Yabana, T. Otobe, J.-I. Iwata, G. F. Bertsch
APS march meeting 2013, Baltimore, USA, 2013 March 18-22 (Oral)

18. First principles calculation for electron-phonon dynamics in crystals under ultrashort laser pulses (Poster)
Y. Shinohara, S.A. Sato, K. Yabana, J.-I. Iwata, T. Otobe, G. F. Bertsch
ISD-QSD, Osaka, Japan, 2012 October 11-13

19. Coherent phonon generation in time-dependent density-functional theory (Poster)
Y. Shinohara, S.A. Sato, K. Yabana, J.-I. Iwata, T. Otobe, G.F. Bertsch
Material Simulation in Petaflops era (MASP2012), Kashiwa, Japan, 2012 July 12-13

20. First-principles calculation for coherent phonon generation in solids
Y. Shinohara, K. Yabana, J.-I. Iwata, T. Otobe, G.F. Bertsch
International Conference on Laser Probing, Paris, France, 2012 June 4-8

21. Theoretical investigation for coherent phonon generation studied with first-principles

calculation (Poster)

Y. Shinohara, K. Yabana, J.-I. Iwata, T. Otobe, G.F. Bertsch
CLEO:2012, San Jose, USA, 2012 May 8-10

22. Non-uniform structures in low-density nuclear matter and neutron star crust
M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana, T. Tatsumi
12th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Cairns conventional hole, Australia,
Aug 5-10, 2012
23. Large scale calculations for cluster structure of light nuclei with Skyrme interaction
Y. Fukuoka, Y. Funaki, T. Nakatsukasa, K. Yabana
10th Int. Conf. Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Debrecen, Hungary, 24-28
Sept. 2012.
24. A fully microscopic study of multinucleon transfer processes in $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$: An application
of the time-dependent Hartree-Fock theory
K. Sekizawa, K. Yabana
10th ASRC International Workshop, Nuclear Fission and Decay of Exotic Nuclei,
Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Japan, Mar. 21-22, 2013.
25. Time-dependent Hartree-Fock theory for multinucleon transfer processes in heavy-ion
collisions
K. Sekizawa, K. Yabana
International workshop on Computational approaches to nuclear many-body problems and related
quantum systems, RIKEN, Wakou, Japan, Feb. 12-16, 2013.
26. Projection method for TDHF final wave function: Analysis of multi-nucleon transfer processes
K. Sekizawa, K. Yabana
11th CNS International Summer School, RIKEN Nishina Center, Wakou, Japan, Aug. 29- Sept. 4,
2012.
27. Time-dependent density functional theory for ultrafast electron dynamics at solid surfaces
(poster)
S.A. Sato, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana
Frontiers in Intense Laser-Matter Interaction Theory (FILMITH), Max Planck Institute of Quantum
Optics, Munich, Germany, Sept. 19-21, 2012
28. First-principles numerical pump-probe experiments: intense laser pulses on solid (poster)
S.A. Sato, Y. Shinohara, T. Otobe, K. Yabana
MATERIAL Simulation in Petaflops era (MASP2012), Kashiwa library media hall, Kashiwa, Japan,
July 12-13, 2012

<国内研究会・学会等>

1. フェルミ多粒子系ダイナミクスの大規模計算

- 矢花一浩
研究会「大規模シミュレーションと数値アルゴリズム」, 2012年5月27-28日, 東京大工学部6号館
2. 高強度超短パルス光と物質の相互作用を記述する巨視的マクスウェル方程式の第一原理計算
矢花一浩
超高速現象研究会、東工大、8月3日
 3. 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・シミュレーション
矢花一浩
第3回計算物質科学イニシアティブ (CMSI) 研究会～超並列計算が拓く新しい計算物質科学～、
2012年12月3-5日
 4. 物質科学と原子核理論の接点を巡って
矢花一浩
離合集散の物理とその拡がり、2013年1月26日 (土) 京都大学基礎物理学研究所
 5. A hybrid density functional + configuration mixing approach for light nuclei
K. Yabana
GCOE interdisciplinary workshop on numerical methods for many-body correlations, Feb. 5-6,
2013, Univ. Tokyo
 6. 量子多体系の密度汎関数アプローチ
矢花一浩
素核宇宙融合レクチャーシリーズ第8回、2013年2月22-23日、理化学研究所
 7. Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
寺崎 順
筑波大学原子核理論研究室セミナー、2012年5月11日
 8. 原子核応答の大規模計算
寺崎 順
筑波大学数理物質科学研究科 平成24年度定例第8回物理学セミナー、2012年10月31日
 9. Skyrme-QRPA for nuclear collective dynamics with HPC
吉田賢市、松尾正之、下山裕孝、広川一也、中務孝、寺崎順
筑波大学計算科学研究センター学際共同利用 平成23年度成果報告・平成24年度中間報告、
2012年10月25日
 10. 原子核の密度汎関数理論を用いた二重ベータ崩壊行列要素と基底状態の計算
寺崎 順、矢花一浩、橋本幸男、熱田貴之
筑波大学計算科学研究センター学際共同利用 平成24年度中間報告、2012年10月25日
 11. Nuclear transition matrix elements of neutrino-less double-beta decay for determining the
neutrino mass

寺崎 順

筑波大学計算科学研究センター年次報告会、2013年2月26日

12. 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、東京、2013年3月5,6日

13. ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素のための QRPA 状態の重複計算

寺崎 順

日本物理学会 第68回年次大会、広島大学、2013年3月26-29日

14. 変形超流動原子核における素励起モード・応答関数の計算 (ポスター)

中務孝、藏増嘉伸、数納広哉、江幡修一郎、稲倉恒法、寺崎順

平成24年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題中間報告会、東京、2013年、3月14,15日

15. ^{35}S の負パリティ超変形状態のクラスタ相関

谷口億宇

第68回日本物理学会年次大会、広島大学、東広島、2013年3月26-29日

16. p 及び sd 殻核の変形とクラスタ相関

谷口億宇

微視的有効相互作用の理論と核構造・核反応、京都大学、京都、2013年2月12-14日.

17. ^{42}Ca における変形状態の共存と クラスタ相関

谷口億宇

日本物理学会秋季大会、京都産業大学、京都、2012年9月11-14日.

18. sd 殻領域核の変形状態におけるクラスタ相関

谷口億宇

原子核の閾値近傍における共鳴現象と反応ダイナミクス、大阪大学、茨木、2012年7月18-20日.

19. ^{11}B における $2\alpha+t$ クラスター構造

須原唯広

RCNP 研究会「原子核の閾値近傍における共鳴現象と反応ダイナミクス」、2012年7月20日

20. クラスター・シェル競合を記述するモデルの発展

須原唯広、板垣直之

日本物理学会秋季大会、京都産業大学、京都、2012年9月11-14日.

21. 炭素同位体におけるリニアチェイン構造

須原唯広

日本物理学会秋季大会、京都産業大学、京都、2012年9月11-14日.

22. 現実的核力を用いたクラスター構造計算に向けて
 須原唯広
 原子核クラスター構造、反応研究における戦略ミーティング、理研ミニワークショップ、
 2012年11月9-10日
23. ^{16}C に現れるクラスター構造
 須原唯広、延与佳子
 日本物理学会 68 回年次大会、広島大学、2013年3月26日-29日
24. ラマン感受率の第一原理計算とコヒーレントフォノン振幅の評価
 篠原康、佐藤駿丞、矢花一浩
 日本物理学会 68 回年次大会、広島大学、2013年3月26日-29日
25. First-principles calculation for coherent phonon generation in solids (ポスター)
 篠原康、佐藤駿丞、矢花一浩、乙部智仁、岩田潤一、G.F. Bertsch
 テラヘルツ分光法の最先端—ここまでのテラヘルツ時間領域分光—、筑波大学
 2012年10月25日-26日
26. 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振動数依存性の分析
 篠原康、佐藤駿丞、矢花一浩、岩田潤一、乙部智仁、George F. Bertsch
 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012年9月18日-21日 (口頭)
27. 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振動数依存性の分析
 篠原康、佐藤駿丞、矢花一浩、岩田潤一、乙部智仁、George F. Bertsch
 第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学 2012年9月11日-14日
28. シフト線型方程式のクリロフ部分空間法のスカラー化とその時間依存密度汎関数理論
 への応用(ポスター)
 篠原康、矢花一浩、二村保徳、櫻井鉄也
 日本応用数理学会 2012 年度年会、稚内全日空ホテル 2012年8月28日-9月2日
29. コヒーレントフォノンの第一原理計算
 篠原康
 超高速現象研究会、東工大、8月3日
30. 原子核“ pasta ” と中性子星クラスト
 岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
 京都大学基礎物理学研究所研究会「ハドロン物質の諸相と状態方程式—中性子星の観測に照らして—」、
 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館/パナソニック国際交流ホール、2012年8月30日-9月1日
31. 中性子星クラスト物質における構造と力学的性質
 岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012年9月11-14日

32. Non-uniform nuclear matter in neutron star crust
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
Symposium on “Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012)”、奈良県新公会堂、
2012年12月13-16日
33. 実空間格子でのGogny相互作用を用いた計算
福岡佑太、船木靖郎、矢花一浩、中務孝
日本物理学会 2012年秋季大会、京都産業大学、2012年9月11-14日
34. Skyrme力を用いたスレーター行列式の重ね合わせによる軽い核の記述： ^{16}O と ^{20}Ne
福岡佑太、船木靖郎、矢花一浩、中務孝
日本物理学会 第68回年次大会、広島大学東広島キャンパス、2013年3月26-29日
35. TDHF計算による核子移行反応の系統的分析
関澤一之、矢花一浩
日本物理学会 第68回年次大会、広島大学東広島キャンパス、2013年3月26-29日
36. 射影演算子を用いた核子移行TDHF波動関数の分析
関澤一之、矢花一浩
日本物理学会 2012年秋季大会、京都産業大学、2012年9月11-14日
37. 時間依存平均場計算に基づく核子移行反応による生成核種波動関数の分析
関澤一之、矢花一浩
2012年度原子核三者若手夏の学校、2012年8月2-7日
38. 密度汎関数理論に基づく原子核ダイナミクスの研究（ポスター）
関澤一之、矢花一浩、橋本幸男
平成24年度「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題中間報告会、イイノカンファレンスセン
ター、2012年3月15日
39. 時間依存平均場計算に基づく核子移行反応による生成核種波動関数の分析（ポスター）
関澤一之、矢花一浩
2012年度原子核三者若手夏の学校、2012年8月2-7日
40. 熱核融合反応率の虚時間計算
矢花一浩、船木靖郎
日本物理学会 2012年秋季大会、京都産業大学、2012年9月11-14日
41. 虚時間法を用いた 3α 融合反応率の計算
赤堀孝彦、矢花一浩、船木靖郎
日本物理学会 2012年秋季大会、京都産業大学、2012年9月11-14日
42. 虚時間法を用いた 3α 融合反応の研究
赤堀孝彦、矢花一浩、船木靖郎

日本物理学会 第 68 回年次大会 , 広島大学, 2013 年 3 月 26 日~29 日

43. 超高速誘電応答変化に対する第一原理ポンププローブ数値実験
佐藤 駿丞、篠原康、乙部智仁、矢花一浩、George F. Bertsch
日本物理学会 第 68 回年次大会 , 広島大学, 2013 年 3 月 26 日~29 日
44. パルス光による電子ホールプラズマ生成の第一原理計算
佐藤 駿丞、篠原 康、乙部智仁、矢花一浩
2012 年 秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会 , 愛媛大学, 松山大学 、2012 年 9 月 11 日~14 日
45. パルス光による固体表面の超高速誘電関数変化の第一原理計算(ポスター)
佐藤 駿丞、篠原康、乙部智仁、矢花一浩、George F. Bertsch
計算物質科学研究センター(CCMS)・元素戦略プロジェクト 合同研究会「計算物性物理学の新展開」
東京大学物性研究所, 2013 年 1 月 10 日~11 日

<集中講義>

1. 中重原子核の構造
寺崎 順
千葉大学理学研究科、2012 年 11 月 29, 30 日

<セミナー>

1. First principles calculation of electron dynamics under strong electromagnetic fields
K. Yabana
Univ. Vienna, Sept. 14, 2012
2. Ab-initio simulations of intense pulse propagation in SiO₂
K. Yabana
Max-Planck Institute for Quantum Optics, Garching, Germany, Mar. 13, 2013
3. Time-dependent density functional theory for electron dynamics in solids under strong electromagnetic fields
K. Yabana
Technische Universitat Vienna, Mar. 15, 2013

<一般対象の講演>

1. 原子核物理学が解き明かす元素の起源
矢花一浩
スーパーコンピュータが明かす宇宙と物質の起源、8 月 25 日 (土)、朝日カルチャーセンター
2. 光科学のフロンティアと第一原理計算
矢花一浩
企業研究会 CAMM フォーラム、アイビーホール、H25. 1. 11

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	坂田洞察 (D3)、佐野正人 (D3)、伊藤由太 (D3)、轟木貴人 (D3) 新井田貴文 (D3)、石橋陽子 (D2)、Jihyun Bhom (D2)、阿部康志 (D1) 福岡翔太 (D1)、水野三四郎 (D1)、船戸龍 (M2)、郡司薫 (M2) 堀内聖志 (M2)、中込宇宙 (M2)、渡邊大介 (M2)、中島朋 (M2) 錦織良 (M2)、丹羽崇博 (M2)、三田浩希 (M2)、湯浅暁玲 (M2) 岡田俊祐 (M1)、斎藤佑多 (M1)、向井もも (M1)、大西貴博 (M1) 木原宏一 (M1)、小林大洋 (M1)、田中直斗 (M1)、稲葉成紀 (M1) 大島一軌 (M1)、尾崎瞳 (M1)

【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 (Rare-RI Ring) の R&D を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置される。理化学研究所の予算により、平成 24 年 4 月より稀少 RI リングの製作が始まった。平成 24 年 6 月には、Construction proposal を RIBF PAC に申請し、PAC から ... the proposal is original, has high physics potential and low technical risks. というコメントをいただき、この proposal は認められた。平成 24 年度は、最初に、K4 室にクレーンおよびステージを製作し、蓄積リング用の水、電気などのインフラを整備した。ステージ完成後、アライメントを実施し、入射ライン Q 磁石とセクター磁石の設置、蓄積リングのセクター磁石 (計 24 台) の設置、入射用および出射用セプタム磁石 (各 2 台) の製作と設置、各種電源の製作と設置、真空チェンバーの製作と設置、真空ポンプの購入などを行った。2013 年 3 月の稀少 RI リングの現状を図 1 に示した。稀少 RI リングの概要に関して、2012 年 12 月に PTEP にレビューペーパー [1] を出版した。

平成 25 年度は、磁石と電源の配線を完了させ制御系を整備し、通水試験、各種磁石の励磁を行うとともに、真空排気系の整備を進め、ベーキング及び真空排気などを行う予定である。さらに、入射ラインとして使用する SHARAQ スペクトロメーターとの接続をし、キッカー磁石の製作と設置を行う。Schottky-probe の製作、設置を行うとともに、蓄積リング内のビームモニター検出器 (スクリーンモニター、フォイル検出器) の製作と設置、および質量測定のための飛行時間検出器の製作と設置を行う。平成 25 年度終わりには、真空、制御系、検出器、データ収集系、インターロックなどを準備し、RIBF の SRC から加速された 250 MeV 陽子の入射、蓄積を行う予定である。



図 1: 2013 年 3 月の稀少 RI リングの現状

(2) Ca 同位体の荷電変換断面積測定と荷電核半径の導出

不安定核の構造を理解する上で、陽子密度分布あるいは陽子密度分布を反映する荷電核半径を導出することは重要である。従来、荷電核半径は、optical isotope shift によって、測定されてきた。しかし、レーザーとイオン源によって測定できるアイソトープが決まってしまうという欠点があった。最近、荷電核半径の導出を担う測定として、荷電変換断面積の測定に注目し、測定が行われた [2]。この研究では、 ^{28}Si の荷電変換断面積と荷電核半径を関連づける補正因子を求めた。この補正因子を導入することで、荷電変換断面積の測定から荷電核半径を導出できることが期待される。本研究では、中重核において、この補正因子の妥当性の評価をする目的で、炭素の反応標的に対する $^{39-42, 44-46}\text{Ca}$ の荷電変換断面積の測定を行った。測定したこれらの核種については全て荷電核半径が分かっている [3]。実験は放射線医学総合研究所で行われた。500 MeV/nucleon に加速した ^{56}Fe のビームを Be 標的に照射することで、300 MeV/nucleon 程度の Ca 同位体の二次ビームを生成した。透過法により、荷電変換断面積を導出した。今回測定した荷電変換断面積を、図 2 に示した。Ref.[2] の補正因子を用いて既知の荷電核半径より計算した荷電変換断面積を合わせて示した。両者は、 $N/Z = 1$ の原子核では良い一致を見せたが、それ以外では一致せず、補正因子を N/Z により拡張する必要があることがわかった。今後は、補正因子の拡張を検討し、荷電核半径が未知の不安定核に適用していく。

(3) 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。飛行時間のスタートシグナルを供給する検出器（軽粒子用と重粒子用）の開発を行っている。加えてリング内に入射した RI ビームの周回数を測定する検出器の開発に着手した。

スタート検出器に求められるのは i) 100 ps 以下の時間分解能、ii) ビームの通過におけるエネルギー損失、エネルギー広がり小さいこと、iii) 検出器通過前後でビームの電荷状態が変化しないこと、iv) 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 (100 mm × 50 mm) を有しなくてはならない。軽粒子用として厚さ 0.1 mm のプラスチックシンチレーター (100 mm × 50 mm) を利用した検出器の開発を今年度より開始し、放射線医学総合研究所の HIMAC において 200 A MeV の Kr ビームにて性能評価を行った。得られた時間分解能は $\sigma \sim 60$ ps であり、十分な時間分解能が得られた。その他の要請も全て満たす事ができており、稀少 RI リングへインストールする実機製作を進めている。重粒子用のスタート検出器とし

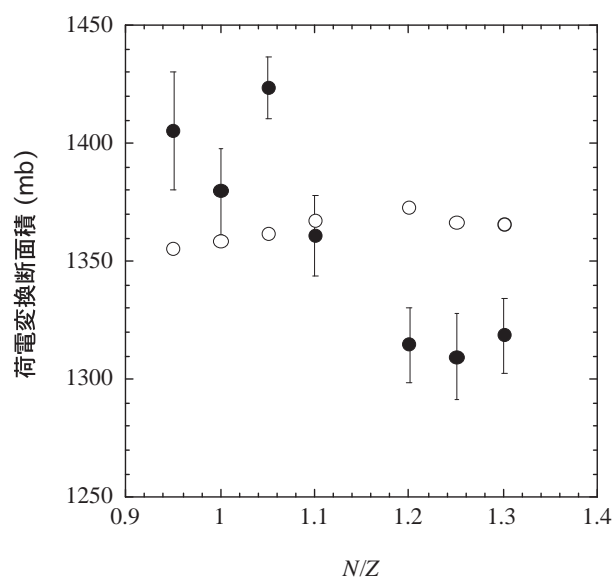


図 2: 今回測定した荷電変換断面積の N/Z 依存性。測定結果は黒丸。白丸は従来の補正因子を使用し、既知の荷電核半径から計算した荷電変換断面積。

て炭素薄膜と Micro Channel Plate(MCP) で構成され、ビームが炭素薄膜を通過する際に放出される電子を電磁場中で制御し、MCP に導く方式 [4] の検出器の開発を行っている。この方式では放出される電子は放出位置、放出角度、初期エネルギーによらず等時性を持って MCP に到達する。これまでに原理実証機の製作、および α 線源、200 ~ 300 A MeV の重粒子ビームを用いて時間分解能の測定、等時性の測定を行った。今年度は等時性の向上を目的として電磁場分布の一樣性の改善を行った。電場については開口部分における電場浸み出しを防ぐ為、金+タンゲステンのワイヤーを 1 mm ピッチで開口部に取り付けた。これにより開口部近傍での電場勾配の非一樣性が向上したものと考えている。磁場についてはコイル巻き数を最適化し、磁場の非一樣性を $\pm 2\%$ から $\pm 1\%$ まで向上させた。 α 線源、HIMAC における重粒子ビームを用いた性能評価により、時間分解能としては $\sigma \sim 150$ ps、等時性としてはビーム入射位置により最大 1 ns のズレがあり、さらなる改善が必要と確認できた。今後は MCP の位置を最適化し電場勾配の一樣性向上を図るとともにトリムコイルを設置し、磁場分布の更なる一樣性改善を行う予定である。以上の結果より、軽粒子については誤差 10^{-6} 程度での質量測定に目途がついた。

周回数測定用検出器に求められるのは時間分解能 ($\sigma \sim 1$ ns) 以外はスタート検出器と同様である。今年度は原理実証機の製作、性能評価を行った。この検出器の原理の大部分は重粒子用スタート検出器と同様であり、炭素薄膜から放出される電子を MCP へ導くものであるが、電子を制御するのが電場のみであるところに違いがある。適当な電場を印加することにより、等時性をもったまま電子は MCP へ到達する。HIMAC における重粒子ビームを用いた性能評価により、時間分解能としては $\sigma \sim 340$ ps、検出効率としては約 75% が得られ、周回数測定検出器として十分な性能を持っていることが示された。今後は実機の製作を進め、その性能評価を行う予定である。

(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 法の開発を進めている。NMR に寄与す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、回転磁場が必要である。右回り、あるいは左回りの回転磁場を作用させ、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。これまでに回転磁場生成システムの構築、回転磁場の検出を行い、約 90% の偏向度の回転磁場の生成に成功した。

今年度は符号決定検証の為、回転磁場による $\pi/2$ パルス NMR により陽子（水試料）の磁気モーメントの符号（正）の測定を行った。この測定では右回り、あるいは左回りの回転磁場を作用させた際の自由誘導減衰の振幅の大きさとスピン偏極保持の為に印加している磁場の向きから磁気モーメントの符号が決定できる。大きな振幅の自由誘導減衰が得られた回転磁場の方向と印加している静磁場の方向から陽子の磁気モーメントの符号“正”が確認できた。今後はより高偏向な回転磁場の生成、より効率の良い NMR の検出（速い断熱通過法）の構築を進め、磁気双極子モーメントの値およびその符号が既知の不安定原子核を用いて β -NMR 法による原理実証実験へと進む予定である。

(5) 理研での核モーメント測定

本年度は①E7B コースでの断熱磁場回転装置 (AFR) の性能評価実験、②RIPS での $^{31,33}\text{Cl}$ の核磁気モーメント測定を行った。

① β -NMR での核磁気モーメント測定では不安定核が偏極していることと共鳴領域を含むように振動磁場を周波数掃引することを同時に満たす必要がある。共鳴が観測されない場合この 2 つのどちらが原因か切り分けることができず、これが測定を困難にしている。そこで理研の偏極チーム、東工大と共同で永久磁石を機械的に断熱反転させることで核スピンを反転させ、周波数掃引無しに核偏極度を測定する装置を開発した。本年度は、この装置の性能評価実験を行った。理研 AVF からの偏極重陽子ビームにより、磁気モーメントが既知である ^{20}F を生成し、この核偏極度を AFR と断熱通過法 (AFP) により測定した。AFR による核偏極度 (P) は AFP による測定量とほぼ同程度であり、核偏極度測定に有効であることが示された。

②sd-shell 領域の陽子過剰核では陽子分離エネルギーが非常に小さくエキゾチックな構造が期待される。アイソスピン (T) = 1/2 核については既に多くの研究がある。この研究を $T = 3/2$ 核に拡張するために、 ^{31}Cl の核磁気モーメント測定を試みた。 ^{31}Cl は高エネルギー ^{32}S 一次ビームからの陽子ピックアップ反応により生成した。またこの実験では、システムチェックとして磁気モーメントが既知である ^{33}Cl についても測定を行った。 ^{33}Cl の測定から $P \sim 4\%$ と非常に大きな核偏極度が観測され、高エネルギー陽子ピックアップ反応では、低エネルギー (d,n) 反応より大きな核偏極度を生成できることがわかった。 ^{31}Cl については一次ビームの強度が予想より弱かったこともあり、統計が少なく核磁気モーメントを決定することは出来なかった。そこで今後は AFR 装置を取り入れ、より核偏極度と収量が多い条件を調査し、再度、核磁気モーメント測定を行う予定である。

(6) KISS (KEK Isotope Separation System) の開発状況

KISS では、 $A \sim 200$ 、 $N=126$ 付近の r -過程核を生成し寿命を測定することによって、元素が作られた天体環境を特定することを目的としている。KISS は、ビームが打ち込まれて反応生成物のできるガスセル、磁場によって質量数 (A) を選別する双極電磁石、ビームを振り分ける装置、 β 崩壊を測定するための検出器から構成される。反応生成物はガスセルの中を流れる 0.5 気圧のアルゴンガスによってガスセル中で停止・中性化し、ガス流にのってガスセル出口まで運ばれ、そこで 2 段階レーザー共鳴イオン化法によって元素選択的にイオン化される。現在は双極電磁石までの設置が完了している。昨年度は鉄ビーム ($A=56$) を用いて、鉄イオンの引出効率や鉄イオン・化合物イオンの引出時間の測

定、ガスセル中で生成される化合物の質量分布測定を行った。化合物とは目的の原子と不純物(水分子、炭化水素など)が結合したものであり、化合物の形成は目的とする原子核が中性原子として存在する確率を低下させる。不純物はガスやガス配管、ガスセルに含まれている。昨年度は、不純物を除去するためにガスセルやガス配管をベーキングし、更に純化器を一つ追加してガス中の不純物を吸着させることによってガスの高純度化を行った。これにより鉄イオンを観測できるようになった。

KISS では元素選別のために2段階レーザー共鳴イオン化を用いるため、研究対象である元素の効率の良いイオン化経路を調べる必要がある。昨年度はイリジウム、レニウム、ハフニウムについて2段階レーザー共鳴イオン化経路の探索を行った。レニウム、イリジウムに関しては自動イオン化状態を発見し、イオン化効率を求めた。一方、ハフニウムについては自動イオン化状態を見つけるには到らなかった。今後は、目標とする効率である数%・S/N > 1000に向けてガスセルの改良、効率の良いイオン化経路の探索を行っていく。

(7) ビッグバン元素合成におけるリチウム生成の謎

138億年前に起きたビッグバンでは3分から7分程度の間元素合成が進み、陽子と中性子から大量のヘリウム4が生成された。この頃、自由な陽子と中性子の比率は7対1であった。中性子の半減期10分に比べ短い時間である為多数の中性子が存在し、この元素合成に寄与した。このヘリウムの量は質量比で25%にのぼり、観測値と良く一致する為、ビッグバンの存在を証明する一つの証拠であると言われている。そして、ヘリウム4は極端に強く結合しているため、これ以上の元素合成の進行が妨げられた為、(質量数5と8にギャップがある為) ビッグバン元素合成はリチウムで止まってしまった。一方、このリチウムの量は金属欠乏星における観測から推定されているが、この観測値は計算値の3分の1しかなく、大きな問題となっている。そこで我々は、生成された後のリチウム7が崩壊するプロセスの一つである、 ${}^7\text{Li}({}^3\text{He},p){}^9\text{Be}$ 反応に着目し、生成断面積の詳細についての研究を開始した。筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門に設置された1MV タンデトロン加速器を用いて実験を行っている。

ビームエネルギーは、 $E_{lab} = 0.5, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{MeV}$ を選んだ。これまでの Yan 等の先行研究で、 $E_{cm} \sim 0.1\text{MeV}$ における断面積が報告された。しかし、 $0.1 < E_{cm} < 0.4\text{MeV}$ の領域に測定値がなかった。 $E_{lab} = 0.5\text{MeV}$ の実験は、ターゲット中のエネルギー損失も考慮した重心系エネルギー $E_{cm,eff} = 0.337\text{MeV}$ に相当する。また、角分布の測定も行い、 3.0MeV では $\theta_{lab} = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ$ 、で測定し、また 0.5MeV では $\theta_{lab} = 35^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 140^\circ$ で測定した。ターゲットは濃縮度95%以上の ${}^7\text{Li}$ 金属を炭素薄膜上に蒸着したものをを用いた。厚みは、 ${}^7\text{Li}$ は $30\mu\text{m}/\text{cm}^2$ であり、炭素は $50\mu\text{m}/\text{cm}^2$ である。この実験で得られた astrophysical s-factor を先行研究と比較し図3に示す。

(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

昨年に引き続き、恒星内の元素合成過程の1つである silicon burning において bottleneck として知られているスカンジウム45周辺の反応、特に経路が集中している ${}^{42}\text{Ca}(\alpha,p){}^{45}\text{Sc}$ と ${}^{45}\text{Sc}(p,\gamma){}^{46}\text{Ti}$ に着目し、その中の ${}^{42}\text{Ca}(\alpha,p){}^{45}\text{Sc}$ の反応率を評価するために逆反応である ${}^{45}\text{Sc}(p,\alpha){}^{42}\text{Ca}$ の断面積を測定し、過去の実験値 [5] と比較した。さらに、今回は全断面積の評価の為に角分布の測定も行った。実験は1MV タンデトロンで行い、2MeVの陽子ビームを $50\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素のバックリング上の $42\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のスカンジウムに照射し、 α 粒子をE- Δ Eカウンター(SSD)で測定した。角度は50、70、90、110、130°で、各点の統計量を500カウント確保した。今回のデータを見ると、前回の結果より断面積が高いという結果が得られた。つまり、 $E_p=2\text{MeV}$ が resonance である可能性があると考えられる。今

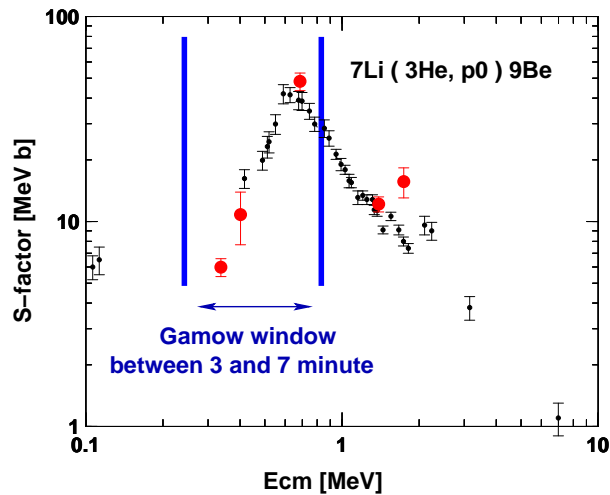


図 3: ビッグバン宇宙元素合成において、リチウムを失う反応のひとつの ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p_0){}^9\text{Be}$ 反応の astrophysical s-factor. ビッグバン元素合成の際の温度に対応する反応エネルギーを、Gamow window と表している。赤丸は、今回の測定値である。

後エネルギーを変えて実験を行い、確かめていきたい。

(9) 福島第一原発事故により放出された放射性ヨウ素 129 の加速器質量分析法による測定 (笹 公和 筑波大学 AMS グループ)

福島第一原発事故により放出された放射性ヨウ素 129 (${}^{129}\text{I}$) [$T_{1/2}=15.7$ Myr] について、環境中の分布状況を調査した。福島第一原発事故では、環境中に揮発性の高いセシウムやヨウ素などの核分裂生成の放射性核種が大量に放出された。しかし、甲状腺被ばくの原因となる ${}^{131}\text{I}$ の半減期が約 8 日と短い為に、被ばく線量評価を実施する為の詳細なデータの入手が既に困難となっている。そこで、同じ核分裂生成の放射性ヨウ素同位体である ${}^{129}\text{I}$ の環境中での分布状況を調査して、 ${}^{131}\text{I}$ 降下・沈着量の推定を試みている。2012 年度は、福島第一原発事故由来の ${}^{129}\text{I}/{}^{131}\text{I}$ 原子数比の相関について確認を行った。

本研究グループでは、2011 年 3 月下旬から 5 月上旬にかけて、福島県及び東関東周辺の表層土壌について 108 か所で表層土壌を採取し、 ${}^{129m}\text{Te}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{134}\text{Cs}$ 、 ${}^{136}\text{Cs}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$ の地表への降下・沈着量を明らかにしている [6]。 ${}^{131}\text{I}$ の測定データを得ている表層土壌試料を用いて、 ${}^{129}\text{I}$ について東京大学タンデム加速器施設 MALT の AMS システムを用いて測定を行った。なお、福島第一原発事故前に採取した表層土壌から、事故前の ${}^{129}\text{I}$ 平均濃度は、 $(2.7 \pm 1.4) \times 10^8$ atoms/g であった。 ${}^{129}\text{I}$ 表面密度では約 1.1×10^{-2} Bq/m² となり、これが福島第一原発周辺の ${}^{129}\text{I}$ バックグラウンドと推定される。図 4 に福島県における福島第一原発事故後の表層土壌での ${}^{129}\text{I}$ 分布状況を示す。測定結果から、福島第一原発事故後における表層土壌中の単位重量当たりの ${}^{129}\text{I}/{}^{131}\text{I}$ 原子数比は、 25.6 ± 5.8 (2011 年 3 月 11 日換算) となった。

(10) 筑波大学 6 MV タンデム加速器システムの設計・開発 (低エネルギー原子核実験グループ)

研究基盤総合センター応用加速器部門において、2014 年 9 月の完成を目指して 6 MV タンデム加速器システムの設計・開発を進めている。加速器本体は 6 MV ペレット型タンデムであり、低エネ

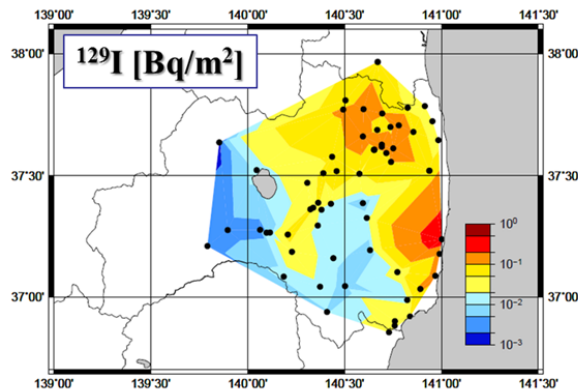


図 4: 福島第一原発事故による放出された放射性ヨウ素 ^{129}I の表層土壌分布 (2011 年 3 月 29 日に壊変補正)

ルギー天体核反応や偏極陽子・重陽子による核反応実験の他に、宇宙線生成核種の AMS 測定やイオンビーム応用実験等に利用される。

既存のラムシフト型偏極イオン源 (PIS) は、施設横に建設される偏極イオン源実験棟に移設される予定である。イオン源は計 5 台を予定している。40 試料の装填が可能な AMS 測定用 MC-SNICS イオン源は 2 台を予定しており、そのうちの 1 台は CO_2 ガス導入型イオン源となる。AMS ビームラインは加速器室の +20 度コースに設置予定である。図 5 に 6 MV タンデム加速器システムの最新設計案を示す。

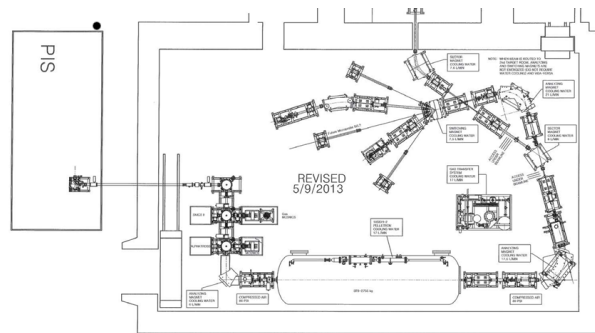


図 5: 筑波大学 6 MV タンデム加速器システムの設計案 (2014 年 9 月完成)

(11) J-PARC MR キッカー磁石開発の現状

J-PARC MR の入射部では、4 台の集中定数型キッカー電磁石を用いて周回軌道に陽子ビームバンチを入射している [7]。しかし、入射キッカー電磁石の励磁電流にはテールが存在しており、これがハイパワー運転時に粒子損失に繋がる Closed Orbit Distortion の増加を引き起こしている。この軌道のずれを補正することを目的として、加速器リング内にはビームを中心軌道に蹴り戻すための小型の高速キッカー電磁石システムの開発を行っている。このシステムは、テール磁場を忠実に再現し、蹴られたビームを反対方向に蹴ることによりビームの補正を行う。よって、電源・電磁石ともに 100 MHz 以上の帯域が要求される。パルス電源には Marx 型電源を応用している。個々のスイッチのトリガー

信号を制御することで任意の形状の励磁電流波形を出力する [8]。電磁石部は分布定数型を採用しており、1セクションのインダクタンスを 10 nH、静電容量を 100 pF とし、特性インピーダンスを 10 Ω に設定している。今回、従来の並行平板コンデンサの代わりにセラミックコンデンサを用いることで、帯域を制限する浮遊のインダクタンスと静電容量を低減させている (図 6 左)。

現在、キッカー電磁石の試験機 (図 6 右) を製作し、その性能測定を行った。本試験機は片側 1 のみの構造となっている。結果として、20 MHz 相当の帯域を有していることが確認されたが、これは我々の想定値 160 MHz を下回る結果であった [9]。原因として、磁性体コアとして使用しているフェライトの周波数特性や、漏れ磁場によるコイル部のインダクタンス増加が懸念される。今後、原因の究明および性能の向上を行うために、更なる追加試験を予定している。

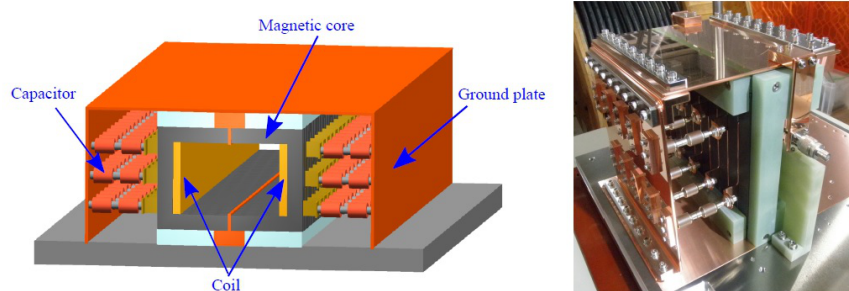


図 6: (左図) 補償用キッカー電磁石のコンセプトデザイン、(右図) 電磁石試験機

【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) PHENIX 実験における直接光子 - ハドロン関連の測定

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) の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 での金原子核同士の衝突実験や、重陽子・金衝突、陽子・陽子衝突実験を行い、直接光子 - ハドロン関連の解析や、ハドロン - ハドロン関連の解析を行った。図 7 (左) は、金原子核同士の衝突における直接光子 - ハドロン関連を、陽子・陽子衝突の場合に対する比 I_{AA} の値で示している。直接光子の透過的性質により、この比は QGP 中でのジェットの破碎関数の変貌を示しており、特に高い運動量領域でのハドロン収量が抑制され、大角度領域で測定した低い運動量領域でのハドロン収量は増加している事を表している [10]。図 7 (右) は、RHIC 及び、LHC の重イオン衝突で測定された楕円型方位角異方性を初期反応領域の幾何学的楕円率で規格化した量 v_2/ϵ_2 の多重度依存性を示している。通常の原子核効果を確認したり比較するために、陽子や重陽子と重イオンとの衝突におけるハドロン - ハドロン 2 粒子関連を測定した。その結果、小さい衝突系であるのにも関わらず、その小さい多重度領域まで、楕円形的放出が同じ傾向にある事が観測された [11]。

(2) PHENIX 実験における高次反応平面を用いた関連測定

200 GeV での金原子核同士の衝突実験において、量子力学的干渉効果を用いた HBT2 粒子関連測定による粒子発生源サイズ、空間的広がり、時間的広がりの大きさと、高次の異方性で決まる反応平面との関連を調べる事により、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、中図) は、識別された荷電 π 中間子の HBT 関連測定による終状態粒子放出領域の大きさ、

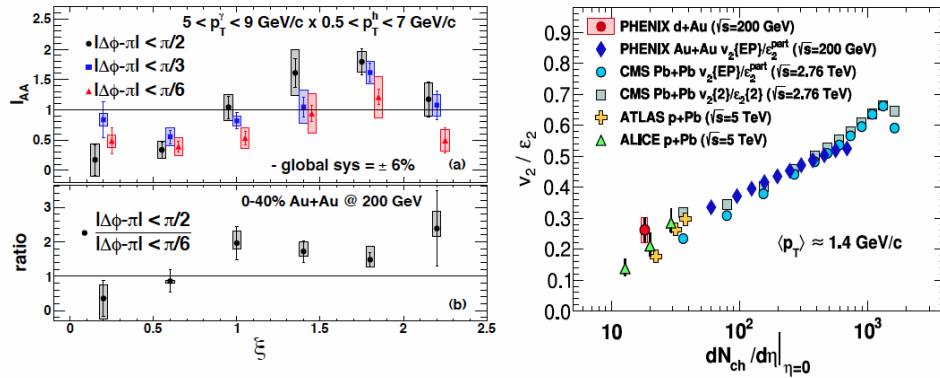


図 7: 直接光子 - ハドロン相関による I_{AA} (左図) [10] と v_2/ϵ_2 の多重度依存性 (右図) [11]

ここで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}) の大きさの、2次、3次反応平面に対する依存性を示す。中心衝突であるのにも関わらず、特に奥行き方向の大きさで時間項を含むとされる R_{out} に関しては、2次、3次反応平面の両方に対して大きな振幅が観測された。図 8 (右図) は、初期反応領域の形状と終状態粒子放出領域の形状の相関図であり、2次の異方性は楕円の膨張により楕円率は初期形状の約半分になり、3次異方性は3次膨張によりほぼゼロになっている事が分かる [12]。

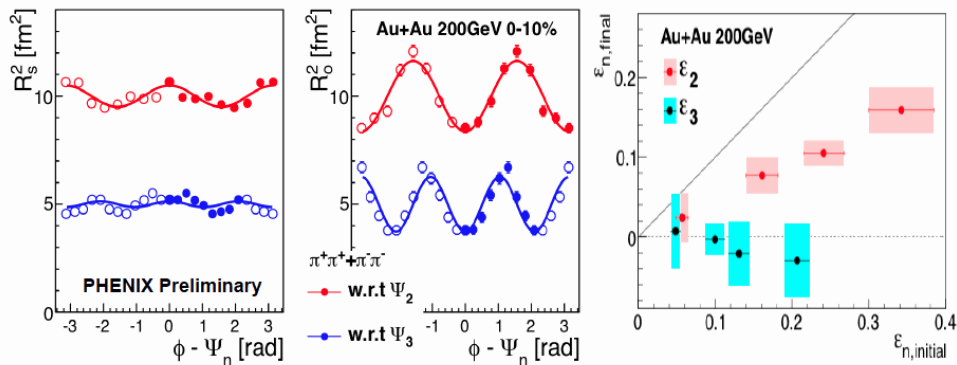


図 8: HBT 相関測定による終状態形状の大きさ R_{side}, R_{out} (左、中図) の2次平面及び3次平面依存性と初期状態と終状態の幾何学的形状高次異方性の相関 (右図) [12]

さらに図 9 は、ジェット等によるハドロン の 2 粒子方位角相関を、反応平面に対してトリガー粒子となるハドロン放出角度の条件を選んで測定した結果である。上図は2次の反応平面 Ψ_2 に対する、下図は3次の反応平面 Ψ_3 に対する依存性を示している。左図から右図へ、Out-of-plane から In-plane 方向へトリガー粒子の放出方向が変化しており、反応平面に対して左側 (−側) と右側 (+側) を赤、青色で示す。特に2次の反応平面とジェット相関の間に強い依存性が観測され、これはQGP中でのジェットの吸収や変貌と、反応領域の楕円形状や楕円膨張が大きく関わっている事を示唆している [13]。一方で、3次の反応平面とジェット相関の間には大きな依存性は無いが、3次の反応平面分解能が、2次よりも悪い事も原因の一つになっている。さらに、ridge 的、及び mach-cone 的な振る舞いが依然として生き残っている様子を暗示しているか、あるいは v_3, v_4 の η 依存性によって BG 分布の差し引きが不十分である可能性もある。ハードなプロセスである初期パートン散乱からのジェッ

トの吸収と変貌により、ソフトなプロセスである初期楕円形状等を起源とする集団運動的な QGP 領域の膨張発展が、どのような影響を受けかつ影響を与えているか、つまりハード・ソフト相互作用を調べる手がかりとなる。

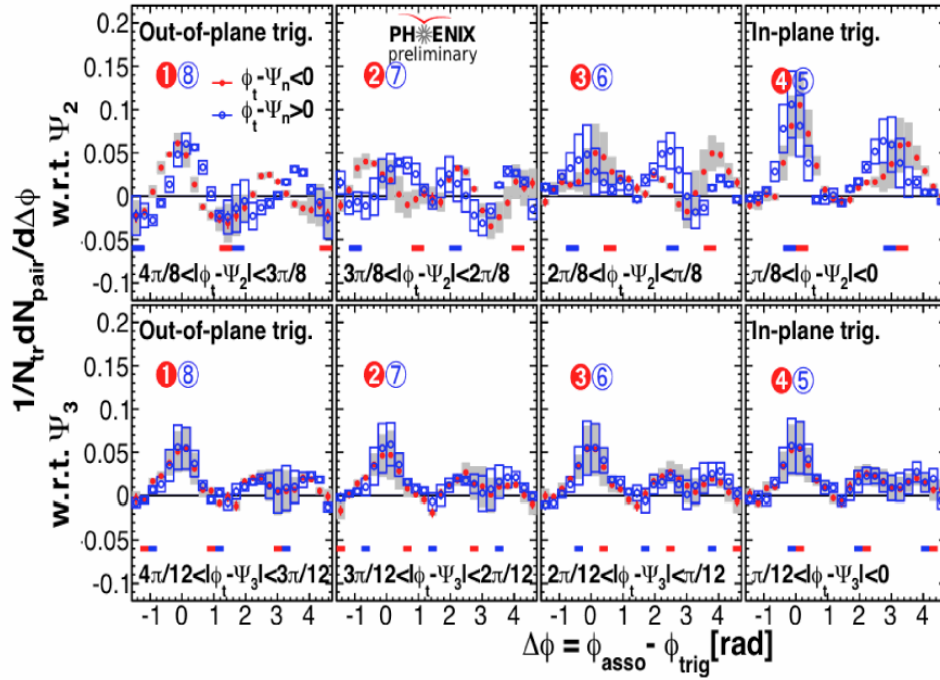


図 9: ハドロン 2 粒子相関の 2 次 (上図) 及び 3 次 (下図) 反応平面に対する依存性 [13]

(3) ALICE 実験における識別したハドロンの p_T 分布、 v_n 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 (ALICE 実験) における、識別したハドロンの p_T 分布を図 10 (左) [14]、 v_2, v_3 の p_T 依存性を図 10 (右) [15] に示す。 p_T 分布は、どの粒子種に関しても分布がより緩やか (ハード) になっており、さらに RHIC エネルギーに比べて LHC エネルギーでの横方向膨張の速度がより大きくなり、また終状態の平衡温度も高くなっている事を示唆している。この結果は、初期温度や初期密度が、大きくなっている事を示す。ハドロンの粒子種 (構成クォーク数) による観測されている v_2 の違いは、3 次の異方性 v_3 でも観測され、これらは流体力学的振る舞いやクォーク結合モデルで理解する事ができる。ハドロン粒子種間の v_2, v_3 の違いはより高い運動量領域ではより小さくなり、また v_2 の値は高い運動量領域でも有限値である事に対して、 v_3 の値は高い運動量領域ではほぼゼロになる事は興味深い。ソフトな物理とハードな物理に対する v_2, v_3 の感度の違いが現れていると考える事ができる。

(4) ALICE 実験における電荷非対称性の測定、pA 衝突での対 ridge 現象

通過する原子核が作る強い縦磁場と、QGP との相互作用により、局所的パリティ非保存領域ができる可能性が予言されており、その観測量として 2 粒子の方位角と反応平面の相関 (図 11、左) がある。同電荷の 2 粒子を選ぶか、逆電荷の 2 粒子を選ぶかによって、この観測量に差が見える事が確

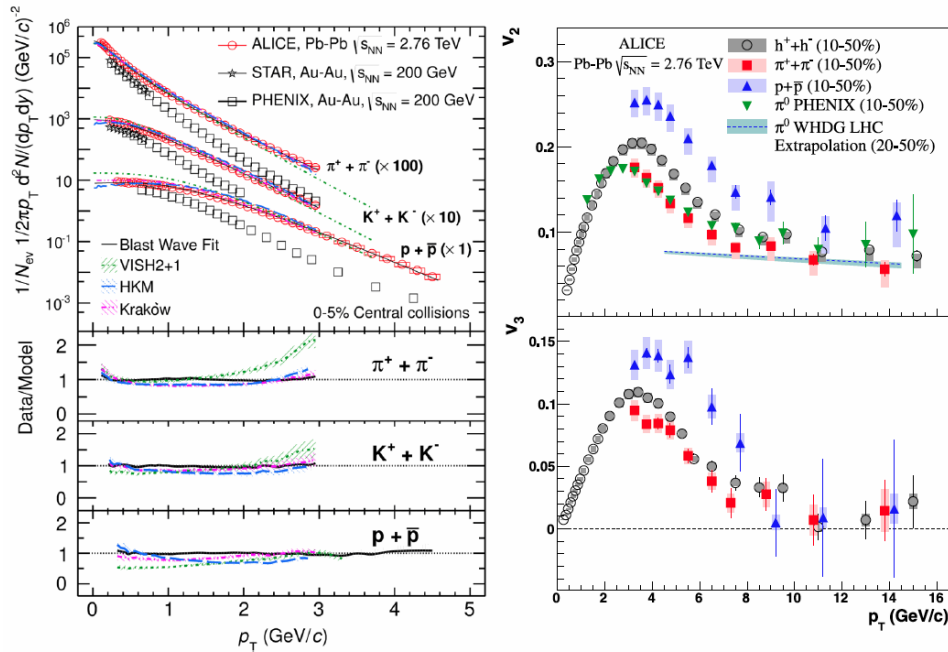


図 10: 識別したハドロン p_T 分布 (左図) [14] と、 v_2, v_3 の p_T 依存性 (右図) [15]

認された [16]。そのシグナルの大きさは RHIC での測定と似ているが、 p_T 分布をはじめ、その p_T 依存性は異なる。また、これらのシグナルの解釈としては、局所的電荷保存等の別の可能性もあげられており、強磁場中での QGP の影響かどうかは、未だ明確ではない。

陽子・鉛衝突実験を行い、鉛・鉛衝突実験との比較をする事により、通常原子核効果 (冷たい核物質効果) による、比較基準を作るのが主な目的であったが、陽子・鉛衝突での中心衝突と周辺衝突の 2 粒子相関分布の差を取ってみると、図 11 (右) のように、長い $\Delta\eta$ 相関を持った (つまり η に依存しない) 楕円的放出が観測された。小さい衝突系であるのにも関わらず、中心衝突度に応じて楕円流的膨張を伴った粒子放出が起きている事を示唆している。これは、陽子・陽子衝突の高多重度事象で起きている現象と定性的にとっても良く似ているが、さらに定量的な比較や理解が今後重要となる。

(5) LHC-ALICE 実験 ダイジェットカロリメーター (DCAL) 検出器の建設

高エネルギー原子核実験グループでは、国際共同実験 LHC-ALICE 実験に参加し、アメリカ、フランス、イタリア、中国、スイス、フィンランドの各研究機関と協力して、ALICE ダイジェット電磁カロリメーター (DCAL) の建設を 2008 年より推進している [18]。この DCAL 検出器は、既存の電磁カロリメーター (鉛・シンチレータからなるサンプリング型) と同型のカロリメーターを、方位角にして 180° 反対方向に配置し、ダイジェットおよび光子のトリガー能力向上に寄与するものである。これにより LHC エネルギーでの重イオン衝突や陽子-陽子衝突で発生する、高エネルギージェット対の測定や直接光子-ジェット相関測定、ハドロン-ジェット相関測定、など様々な測定が可能となり、それらを組み合わせることでクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 相の新たな性質解明が期待されている。

DCAL 検出器は 2012 年度までに全ての電磁カロリメーターモジュールが完成し、全 1,344 モジュール中 288 モジュール分 (約 21%) の製作を筑波大が担当した。2012 年度においては、特にスーパーモジュールの製作、フロントエンド読み出し回路のインストール、信号受光素子であるアバランシェ・フォトダイオード (APD) のゲイン調整、高いデータ収集速度を可能にする新規バックエンド

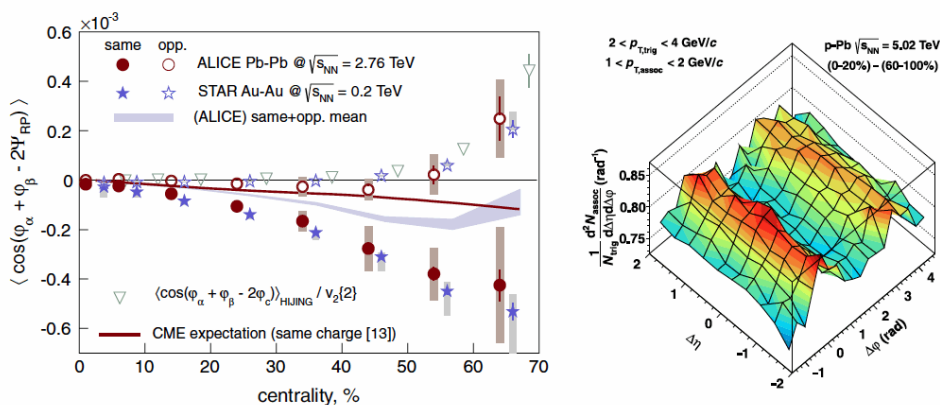


図 11: 反応平面に対する電荷非対称性 (左図) [16] と、陽子・鉛衝突における near-side、away-side の両方に観測された対 ridge 現象 (右図) [17]

読み出しシステム SRU (Scaleable Readout Unit) のテストが行なわれた。筑波大グループは SRU 読み出しシステムのテストを CERN 研究所と筑波大にて行なった。筑波大においては、CERN にある電磁カロリメータの読み出しシステム一式を複製し、テストベンチを新たに立ち上げた (図 12)。双方でのテストの結果、8 kHz でのデータ読み出しが可能であることが確認された。今後は目標値である読み出し速度 50 kHz を実現すべく、現在改良を進めている。

本 DCal 検出器のスーパーモジュールは、現在 LPSC 研究所 (仏・グルノーブル) と CERN 研究所にて保管されている。まず DCal の約半数を 2013 年 9 月より、残りの半数を 2014 年末頃に ALICE 実験エリア (地下約 80 m) にインストールする。その後のコミッショニングを経て、2015 年初頭からいよいよ物理データ収集を開始する。また検出器をインストールするフレーム (図 13) の準備も、ALICE 実験エリア (地上) で着々と進められている。

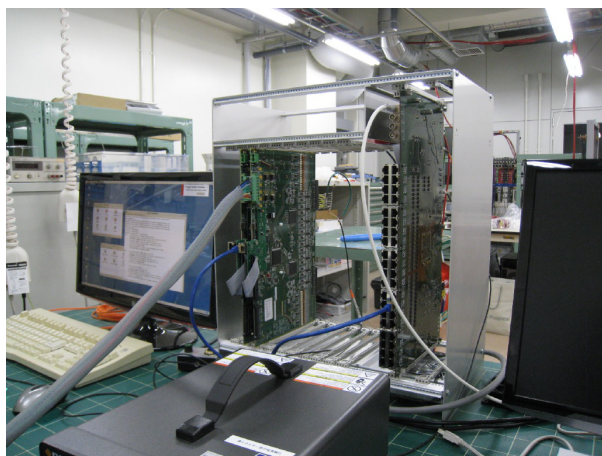


図 12: 筑波大学で構築した ALICE DCal 検出器用データ読み出しシステムのテストベンチ



図 13: ALICE DCal 検出器のサポートフレーム

(6) LHC ALICE 実験におけるジェットとハドロンの相関測定

LHC-ALICE 実験で測定された鉛-鉛 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV データおよび、陽子-陽子 $\sqrt{s} = 2.76$ TeV データを使ったジェットとハドロンの相関測定を行なった。今年度においては特に、(1) ジェット対とハドロンの生成の相関測定 (坂田洞察 氏 博士論文) [19]、(2) 中性 π 中間子とジェットの相関測定 (渡邊大介 氏、修士論文) [21] がある。

(1) においては、まず鉛-鉛衝突データおよび陽子-陽子データから、荷電粒子のみを用いてダイジェットを再構成し、その周り (方位角方向) に生成する荷電ハドロンの分布を調べた。その際、重イオン衝突においては、多数の低横運動量の粒子からなるバックグラウンド (方位角に対して等方的および非等方的な成分) を差し引く。さらに PYTHIA (陽子-陽子シミュレーションデータ) のジェット事象のみを鉛-鉛衝突の実データに人為的に埋め込み、重イオン衝突環境下でのジェット再構成によるバックグラウンドの寄与を見積もった。得られた陽子-陽子衝突の結果と鉛-鉛衝突データを比較することにより、ジェットに伴って生成されるハドロンの原子核変貌効果を見た。その結果、低い横運動量のハロン ($0.15 < p_T(\text{hadron}) < 1.5$ GeV/c) は、中心衝突で増加していること、また高い横運動量のハロン (4.5 GeV/c $< p_T(\text{hadron})$) では、リーディングジェットと同じ方向に出てきたものについては、逆に大きく収量が抑制されていることが分かった。これらの結果は、CMS 実験の結果 [20] と無矛盾である。本研究は CMS 実験よりさらに低いエネルギー領域のジェット ($10 < p_T(\text{jet}) < 40$ GeV/c) を初めて扱っており、QGP 中におけるジェット抑制効果に関して新たな知見を与える。

(2) では、 π^0 中間子を電磁カロリメータ検出器でとらえ、 π^0 中間子の周りに生成されるジェットとの相関測定を行なった。 π^0 中間子は、 $\gamma\gamma$ の不変質量分布から同定し、ジェットは anti- k_T アルゴリズムと呼ばれるジェット再構成手法を用いた。図 14 は、陽子-陽子衝突 $\sqrt{s} = 2.76$ TeV における π^0 中間子をトリガーとした場合のリーディングジェットの方位角分布である。 π^0 中間子に付随して、back-to-back ジェットの 2 つの明瞭なピークが観測された。同様の解析を鉛-鉛衝突でも行い、陽子-陽子衝突の結果と比較した。今後は重イオン衝突でのバックグラウンドの取り扱いの厳密化、さらに高い横運動量の π^0 中間子を識別するために、電磁カロリメータの電磁シャワーシェーブを用いる方法を取り入れ、より高いジェットエネルギーと高い横運動量領域の π^0 中間子の相関測定を行い、ジェット抑制効果の物質通過距離依存などを調べる。

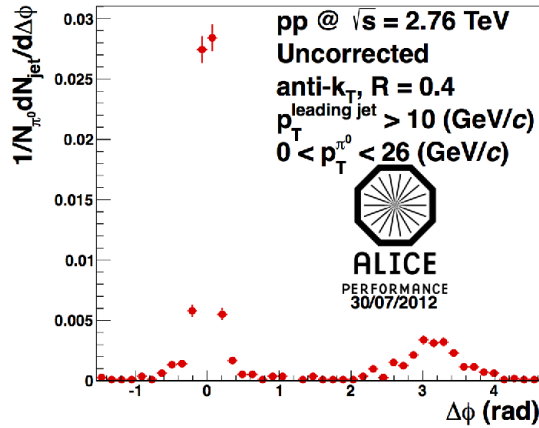


図 14: 陽子-陽子衝突 $\sqrt{s} = 2.76$ TeV における π^0 中間子をトリガーとした場合のリーディングジェットの方位角分布

参考文献

- [1] A.Ozawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 03C009 (2012).
- [2] T.Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 014609 (2010).
- [3] I.Angeli , At. Data and Nucl. Data Tables **87**, 185 (2004).
- [4] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978)
- [5] J.S. Schweitzer, Z.E. Switkowski, R.M. Wieland NPA 287 (1977) 344
- [6] Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa *et al.*, First assessment of individual radionuclides distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 108 (49), 2011, 19526-19529.
- [7] K.Fan *et. al.*, "DESIGN AND TEST OF INJECTION KICKERS FOR JPARC MAIN RING", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, THPPP004, (2012)
- [8] Weihua Jiang, *et. al.*, "Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs", IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 38, NO. 10, OCTOBER 2010
- [9] S.Fukuoka *et. al.*, "DEVELOPMENT OF A FAST COMPENSATION KICKER SYSTEM FOR J-PARC MAIN-RING INJECTION", Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, MOPWA009, (2013)
- [10] arXiv:1212.3323, PHENIX Collaboration.
- [11] arXiv:1303.1794, PHENIX Collaboration.
- [12] arXiv:1304.2876, PHENIX Collaboration.
- [13] arXiv:1304.2852, PHENIX Collaboration.

- [14] Phys.Rev.Lett. 109(2012)252301, ALICE Collaboration.
- [15] Phys.Lett.B 719(2013)18-28, ALICE Collaboration.
- [16] Phys.Rev.Lett. 110(2013)012301, ALICE Collaboration.
- [17] Phys.Lett.B 719(2013)29-41, ALICE Collaboration.
- [18] 科学研究費補助金（基盤研究（S）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」代表者；三明康郎、平成20年～24年
- [19] 坂田洞察、博士論文、筑波大学(2013).
- [20] S. Chatrchyan *et al.* (CMS collaboration), Phys. Rev. C **84** 024906.
- [21] 渡邊大介、修士論文、筑波大学(2013).

<論文>

1. Kosuke Morita, Kouji Morimoto, Daiya Kaji, Hiromitsu Haba, Kazutaka Ozeki, Yuki Kudou, Takayuki Sumita, Yasuo Wakabayashi, Akira Yoneda, Kengo Tanaka, Sayaka Yamaki, Ryutaro Sakai, Takahiro Akiyama, Shin-ichi Goto, Hiroo Hasebe, Minghui Huang, Tianheng Huang, Eiji Ideguchi, Yoshitaka Kasamatsu, Kenji Katori, Yoshiki Kariya, Hidetoshi Kikunaga, Hiroyuki Koura, Hisaaki Kudo, Akihiro Mashiko, Keita Mayama, Shin-ichi Mitsuoka, Toru Moriya, Masashi Murakami, Hirohumi Murayama, Saori Namai, Akira Ozawa, Nozomi Sato, Keisuke Sueki, Mirei Takeyama, Fuyuki Tokanai, Takayuki Yamaguchi, and Atsushi Yoshida, New Result in the Production and Decay of an Isotope, $^{278}113$, of the 113th Element, Journal of the Physical Society of Japan 81 (2012) 103201.
2. D. Kameda, T. Kubo, T. Ohnishi, K. Kusaka, A. Yoshida, K. Yoshida, M. Ohtake, N. Fukuda, H. Takeda, K. Tanaka, N. Inabe, Y. Yanagisawa, Y. Gono, H. Watanabe, H. Otsu, H. Baba, T. Ichihara, Y. Yamaguchi, M. Takechi, S. Nishimura, H. Ueno, A. Yoshimi, H. Sakurai, T. Motobayashi, T. Nakao, Y. Mizoi, M. Matsushita, K. Ieki, N. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Kawada, N. Tanaka, S. Deguchi, Y. Satou, Y. Kondo, T. Nakamura, K. Yoshinaga, C. Ishii, H. Yoshii, Y. Miyashita, N. Uematsu, Y. Shiraki, T. Sumikama, J. Chiba, E. Ideguchi, A. Saito, T. Yamaguchi, I. Hachiuma, T. Suzuki, T. Moriguchi, A. Ozawa, T. Ohtsubo, M. A. Famiano, H. Geissel, A. S. Nettleton, O. B. Tarasov, D. Bazin, B. M. Sherrill, S. L. Manikonda, and J. A. Nolen Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ^{238}U , Physical Review C 86, 054319 (2012)
3. A. Ozawa, T. Uesaka and M. Wakasugi, the Rare-RI Ring Collaboration, The rare-RI ring, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 03C009.
4. S. Naimia, S. Nakamura, Y. Ito, H. Mita, K. Okada, A. Ozawa, P. Schury, T. Sonoda, A. Takamine, M. Wada, H. Wollnik, An rf-carpet electro-spray ion source to provide isobaric mass calibrants for trans-uranium elements, International Journal of Mass Spectrometry 337 (2013) 24-28
5. H. Ueno, H. Miyatake, Y. Yamamoto, S. Tanimoto, T. Shimoda, N. Aoi, K. Asahi, E. Ideguchi, M. Ishihara, H. Izumi, T. Kishida, T. Kubo, S. Mitsuoka, Y. Mizoi, M. Notani, H. Ogawa, A. Ozawa, M. Sasaki, T. Shirakura, N. Takahashi, and K. Yoneda, β -delayed neutron and γ -ray spectroscopy of ^{17}C utilizing spin-polarized ^{17}B , Physical Review C 87, 034316 (2013).
6. Y. Ishibashi, D. Nagae, Y. Abe, T. Nagatomo, A. Ozawa, H. Suzuki, S. Fukuoka, R. Nishikiori, T. Niwa, K. Matsuta, Y. Tagishi, Production of nuclear polarization for unstable nuclei via polarization transfer reaction, Hyperfine Interaction (Proceedings of the 4th Joint International Conference on Hyperfine Interactions and International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2012), Beijing, China, 10-14 September 2012), <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10751-012-0750-0>
7. Dong Kejun, Li Shizhuo, He Ming, Kimikazu Sasa, Yuki Matsushi, Huang Baojian, Ruan Xiangdong, Guan Yongjing, Tsutomu Takahashi, Keisuke Sueki, Li Chaoli, Wu

- Shaoyong, Wang Xianggao, Shen Hongtao, Yasuo Nagashima, Jiang Shan, Methodological study on exposure date of Tiankeng by AMS measurement of in situ produced cosmogenic ^{36}Cl , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 294 (2013) 611-615.
8. Hidetsugu Tsuchida, Shigeo Tomita, Kazushige Nishimura, Ryohei Murakoshi, Masahiro Naitoh, Kimikazu Sasa, Satoshi Ishii, Akifumi Yogo, Akio Itoh, Properties of fast carbon cluster microbeams produced with a tapered capillary, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 293 (2012) 6-10.
 9. 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, 日本加速器学会誌「加速器」, 9 卷 1 号, 2012, 14-21, Kimikazu SASA, Damage Situation by the Great East Japan Earthquake and Post-quake Reconstruction Project of the Tandem Accelerator Facility at the University of Tsukuba, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol.9, No.1, 2012, 14-21.
 10. T.Shizuma, T.Hayakawa, H.Ohgaki, H.Toyokawa, T.Komatsubara, N.Kikuzawa, T.Inakura, M.Honma, H.Nakada Dipole strength distribution in ^{56}Fe , Physical Review C 87, 024301 (2013)
 11. B.Ding, Y.H.Zhang, X.H.Zhou, G.X.Dong, F.R.Xu, M.L.Liu, G.S.Li, N.T.Zhang, H.X.Wang, H.B.Zhou, Y.J.Ma, Y.Sasaki, K.Yamada, H.Ohshima, S.Yokose, M.Ishizuka, T.Komatsubara, K.Furuno High-spin states in ^{127}I , Physical Review C 85, 044306 (2012)
 12. B. Ding, H. X. Wang, H. Jiang, Y. H. Zhang, X. H. Zhou, Y. M. Zhao, S. T. Wang, M. L. Liu, G. S. Li, Y. Zheng, N. T. Zhang, H. B. Zhou, Y. J. Ma, Y. Sasaki, K. Yamada, H. Ohshima, S. Yokose, M. Ishizuka, T. Komatsubara, K. Furuno High-spin level scheme of doubly odd ^{128}I , Physical Review C 86, 034302 (2012)
 13. S.Kubono, N.B.Dam, S.Hayakawa, H.Hashimoto, D.Kahl, H.Yamaguchi, Y.Wakabayashi, T.Teranishi, N.Iwasa, T.Komatsubara, S.Kato, A.Chen, S.Cherubini, S.H.Choi, I.S.Hahn, J.J.He, H.K.Le, C.S.Lee, Y.K.Kwon, S.Wanajo, H.-T.Janka, Alpha-Cluster Dominance in the α p Process in Explosive Hydrogen Burning, Prog.Theor.Phys.(Kyoto), Suppl. 196, 346 (2012)
 14. J. J. He, L. Y. Zhang, A. Parikh, S. W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Kubono, J. Hu, P. Ma, S. Z. Chen, Y. Wakabayashi, B.H. Sun, H.W. Wang, W. D. Tian, R. F. Chen, B. Guo, T. Hashimoto, Y. Togano, S. Hayakawa, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, Key $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)^{21}\text{Na}$ breakout reaction in x-ray bursts: first experimental determination of spin-parities for α resonances in ^{22}Mg via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$, arXiv:1301.4283, (2013)
 15. K. Setoodehnia, A. A. Chen, D. Kahl, T. Komatsubara, J. José, R. Longland, Y. Abe, D. N. Binh, J. Chen, S. Cherubini, J. A. Clark, C. M. Deibel, S. Fukuoka, T. Hashimoto, T. Hayakawa, J. Hendriks, Y. Ishibashi, Y. Ito, S. Kubono, W. N. Lennard, T. Moriguchi, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, A. Ozawa, P. D. Parker, D. Seiler, T. Shizuma, H. Suzuki, C. Wrede, H. Yamaguchi, T. Yuasa, Nuclear structure of ^{30}S and its implications for nucleosynthesis in classical novae, arXiv:1210.1194, (2012)

16. "Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B, **719**, 29-41 (2013).
17. " $\Upsilon(1S+2S+3S)$ production in d+Au and p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and cold-nuclear matter effects", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 242301 (2012).
18. "Transverse Momentum Distribution and Nuclear Modification Factor of Charged Particles in p-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110**, 82302 (2013).
19. "Pseudorapidity density of charged particles p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110**, 32301 (2013).
20. "Coherent J/ψ photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **718**, 1273-1283 (2013).
21. "Double Spin Asymmetry of Electrons from Heavy Flavor Decays in p+p Collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. D **87**, 12011 (2013).
22. "Production of K^* (892) and ϕ (1020) in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. C **72**, 2183 (2012).
23. "Global event properties in Pb + Pb collisions at LHC energies from ALICE", ALICE Collaboration (T. Chujo), Prog. Theor. Phys. Suppl. **193**, 62-66 (2012).
24. "Centrality Dependence of Charged Particle Production at Large Transverse Momentum in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **720**, 52-62 (2013).
25. " J/ψ suppression at forward rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ and 62.4 GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. C **86**, 64901 (2012).
26. "Pion, Kaon, and Proton Production in Central Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 252301 (2012).
27. " D_s^+ meson production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **718**, 279-294 (2012).
28. "Net-Charge Fluctuations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110**, 152301 (2013).

29. "Charge separation relative to the reaction plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110**, 12301 (2013).
30. " $K_s^0 - K_s^0$ correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV from the LHC ALICE experiment", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **717**, 151-161 (2012).
31. "Production of muons from heavy flavour decays at forward rapidity in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 112301 (2012).
32. "Measurement of prompt J/psi and beauty hadron production cross sections at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JHEP **1211**, 65 (2012).
33. "Measurement of Direct Photons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", PHENIX Collaboration (S. Afanasiev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 152302 (2012).
34. "Anisotropic flow of charged hadrons, pions and (anti-)protons measured at high transverse momentum in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **719**, 18-28 (2013).
35. "Neutral pion and η meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and $\sqrt{s} = 7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **717**, 162-172 (2012).
36. "Direct-Photon Production in p+p Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at Midrapidity", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. D **86**, 72008 (2012).
37. "Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. D **86**, 112007 (2012).
38. "Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JHEP **1207**, 191 (2012).
39. "Transverse sphericity of primary charged particles in minimum bias proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. C **72**, 2124 (2012).
40. "Evolution of π^0 suppression in Au+Au collisions from $\sqrt{s_{NN}} = 39$ to 200 GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 152301 (2012).

41. "Nuclear-Modification Factor for Open-Heavy-Flavor Production at Forward Rapidity in Cu+Cu Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. C **86**, 24909 (2012).
42. "Multi-strange baryon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ALICE", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **712**, 309-318 (2012).
43. "Inclusive J/ψ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **718**, 295-306 (2012).
44. "Deviation from quark-number scaling of the anisotropy parameter v_2 of pions, kaons, and protons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. C **85**, 64914 (2012).
45. "Measurement of the Cross Section for Electromagnetic Dissociation with Neutron Emission in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 252302 (2012).
46. "Suppression of high transverse momentum D mesons in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JHEP **1209**, 112 (2012).
47. "Cross sections and double-helicity asymmetries of midrapidity inclusive charged hadrons in p+p collisions at $\sqrt{s} = 62.4$ GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. D **86**, 92006 (2012).
48. " J/ψ Production as a Function of Charged Particle Multiplicity in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **712**, 165-175 (2012).
49. " J/ψ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 72301 (2012).
50. "Light vector meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. B **710**, 557-568 (2012).
51. "Underlying Event measurements in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV with the ALICE experiment at the LHC", ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JHEP **1207**, 116 (2012).
52. "Observation of direct-photon collective flow in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **109**, 122302 (2012).
53. "Ground and excited charmonium state production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. D **85**, 92004 (2012).

54. "Global and Collective Dynamics at PHENIX", T Niida (for the PHENIX Collaboration), J. Phys.: Conf. Ser. 422 012005 (2013).
55. "Elliptic flow of charged pions, protons and strange particles emitted in Pb + Au collisions at top SPS energy", CERES Collaboration (D. Adamova, S. Esumi *et al.*), Nucl. Phys. A **894**, 41-73 (2012).
56. "Nonflow 'factorization' and a novel method to disentangle anisotropic flow and non-flow", Daniel Kikola, Li Yi, ShinIchi Esumi, Fuqiang Wang, Wei Xie, Phys.Rev. C **86**, 014901 (2012).

<招待講演 (国際会議) >

1. Akira Ozawa, Nuclear mass measurements for the r-process in Rare-RI Ring, 1st Visiting NAOJ Fellow Workshop, Element Genesis and Cosmic Chemical Evolution: r-process perspective, 2012, Oct. 17-19, Wako, RIKEN Nishina Center, Japan (招待講演)
2. Akira Ozawa, Rare-RI Ring for mass measurements of exotic nuclei, A workshop on Science with Rare Ion Beams, SCRIBE-2012, 2012, Nov. 7-9, Variable Energy Cyclotron Centre, Sector-1, Block-AF, Bidhan Nagar (Salt Lake), Kolkata 700064, India (招待講演)
3. Kimikazu Sasa, The 6 MV tandem accelerator project for nuclear physics and ion beam applications at the University of Tsukuba, The 8th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Beijing International Convention Center, Beijing, China, 15-19 Oct. 2012 (招待講演) .
4. 江角晋一, "Overview of flow results from ALICE experiment", CIPANP 2012, 2012年06月02日, St. Petersburg, Florida, USA (招待講演) .
5. 江角晋一, "Charge asymmetric correlation measurement in 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX", Workshop On P- and CP-odd Effects in Hot and Dense Matter (2012), 2012年06月25日, Brookhaven National Laboratory, New York, USA (招待講演) .
6. 新井田貴文, "Global and Collective Dynamics at PHENIX", Heavy Ion Collisions in the LHC Era, 2012年06月16日, Quy Nhon, Vietnam (招待講演) .
7. 中條達也, "Jet Physics at LHC, experimental overview and perspective", Nagoya Mini-Workshop 2012 "Phenomenology and Experiments at RHIC and LHC", 2012年09月25日, 名古屋大学 (愛知県) (招待講演) .
8. 坂田洞察, "Jet-Hadron Azimuthal Correlation Measurements in pp and Pb-Pb Collisions at LHC-ALICE", Nagoya Mini-Workshop 2012 "Phenomenology and Experiments at RHIC and LHC", 2012年09月25日, 名古屋大学 (愛知県) (招待講演) .
9. 轟木貴人, "Collective flow and two particle correlations at RHIC and LHC", Nagoya Mini-Workshop 2012 "Phenomenology and Experiments at RHIC and LHC", 2012年09月25日, 名古屋大学 (愛知県) (招待講演) .

10. 江角晋一, "High p_T Hadron Suppression and v_2 in PHENIX", 8th International Workshop on High p_T Physics at LHC, 2012年09月23日, Wuhan, China (招待講演) .
11. 江角晋一, "Heavy Ion results from RHIC-BNL", Hadron Collider Physics Symposium 2012, 2012年11月12日, 京都市 (京都府) (招待講演) .
12. 中條達也, "High Energy Heavy Ion Collisions at LHC", 7th Italy-Japan Symposium on Nuclear Physics, 2012年11月12日, Milano, ITALY (招待講演) .

<招待講演 (国内)>

1. 小沢顕、稀少 RI リングプロジェクト –R プロセス解明に向けて–、物理教室セミナー、2012年9月26日 (水)、埼玉大学、理学部8番教室 (招待講演)
2. Akira Ozawa、Present status of Rare-RI Ring and mass measurements for R-process、RIBF 核物理セミナー、2012、Nov. 27、Wako, RIKEN Nishina Center、Japan (招待講演)
3. K. Sasa、Future prospects of AMS-facility collaboration between MALT, the Univ. Tokyo and UTTAC, the Univ. Tsukuba、平成24年度 MALT 共同利用研究成果報告シンポジウム、2012年9月20日 - 9月21日、東京大学大学院工学系研究科 武田ホール (招待講演)
4. 中條達也, "ALICE 実験・最新結果で迫る QGP の姿", 第21回 Heavy Ion Cafe, 2012年06月16日, 上智大学四谷キャンパス (東京都) (招待講演) .
5. 轟木貴人, "Results on Soft Physics from Quark Matter 2012", 第22回 Heavy Ion Cafe, 第15回 Heavy Ion Pub 合同研究会, 2012年09月06日, 名古屋大学 ES 総合館 (愛知県) (招待講演) .
6. 三明康郎, "高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ相の解明", 素粒子物理・原子核物理分野の「大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン」に関するシンポジウム, 2013年02月08日, 乃木坂, 日本学術会議 (東京都) (招待講演) .

<国際会議発表>

1. D. Nagae, T. Niwa, Y. Ishibashi, Y. Abe, S. Fukuoka, R. Nishikiori, S. Okada, Y. Saito, N. Inaba, A. Ozawa, Y. Aoki, "Development of rotating magnetic field system for the β -NMR method", The 4th Joint Meeting of the International Symposium on Hyperfine Interactions and the International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2012)
2. D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, A. Ozawa, T. Yamaguchi, H. Suzuki, T. Moriguchi, Y. Ishibashi, S. Fukuoka, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Suzuki, F. Suzaki, K. Sato, H. Furuki, N. Ichihashi, S. Miyazawa, Y. Yamaguchi, T. Uesaka, M. Wakasugi, "Time-of-flight detector applied to mass measurements in Rare-RI Ring", 16th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS2012)

3. Kimikazu Sasa, Damage Situation of the 12UD Pelletron tandem accelerator at the University of Tsukuba by the Great East Japan Earthquake, 12th Heavy Ion Accelerator Technology Conference (HIAT2012), Chicago, Illinois USA, June 18-21, 2012. Proceedings of HIAT 2012, Chicago, IL USA, 2012, 80-82.
4. K. Sasa, T. Takahashi, N. Nagashima, and K. Shima, Isotope Dependence of the Equilibrium Charge State of Cl Ions Passing through Carbon Foils, 25th International Conference on Atomic Collisions in Solids, October 21-25, 2012 Kyoto, Japan
5. H. Tsuchida, T. Majima, S. Tomita, K. Sasa, K. Narumi, Y. Saitoh, A. Chiba, K. Yamada, K. Hirata, H. Shibata, and A. Itoh, Production of C₆₀ Microbeams by Single-Microcapillary Methods, 25th International Conference on Atomic Collisions in Solids, October 21-25, 2012 Kyoto, Japan.
6. Daichi Oka, Yasushi Hirose, Hideyuki Kamisaka, Tomoteru, Fukumura, Tetsuya Hasegawa, Seiji Ito, Akira Morita, Hiroyuki Matsuzaki, Katsuyuki Fukutani, Satoshi Ishii, Kimikazu Sasa, Daiichiro Sekiba, Dielectric properties of perovskite oxynitride epitaxial thin films, APS March Meeting 2013, March 18 - March 22, Baltimore, Maryland, USA..
7. T. Komatsubara, Gamma-ray spectroscopy on ²⁶Si – By pass sequence for ²⁶Al production – New Frontiers in Nuclear Astrophysics Castiglion Fiorentino, Italy, June 18-22, 2012,
8. T. Komatsubara, A. Ozawa, T. Moriguchi, Y. Ito, Y. Ishibashi, Y. Abe, T. Yuasa, T. Hayakawa, T. Shizuma, K. Y. Hara, S. Kubono, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Dam N. Binh, A. A. Chen, J. Chen, K. Setoodehnia, T. Kajino, "Study of level structure on ²⁶Si for the astrophysical interest in ²⁶Al production", "The XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos", Proceedings of Science, XII, 206, (2012). Cairns, Australia, Aug. 5-10, (2012).
9. T. Komatsubara, A. Ozawa, K. Sasa, P. Schury, D. Nagae, Y. Ito, Y. Ishibashi, Y. Abe, S. Fukuoka, R. Nishikiori, T. Niwa, H. Mita, Y. Saito, S. Okada, T. Yuasa, T. Onishi, A. Terakado, T. Hayakawa, T. Shizuma, S. Kubono, "Recent research activities of nuclear astrophysics in University of Tsukuba", "The XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos", Proceedings of Science, XII, 168, (2012). Cairns, Australia, Aug. 5-10, (2012).
10. T. Onishi, T. Komatsubara, T. Yuasa, T. Hayakawa, T. Shizuma, S. Kubono, "The study of nucleosynthesis by means of scandium45+p reaction", Poster presentation, "The XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos", Proceedings of Science, XII, 219, (2012). Cairns, Australia, Aug. 5-10, (2012).
11. T. Komatsubara, Origin of ²⁶Al, Element Genesis and Cosmic Chemical Evolution, NAO RIKEN workshop, RIKEN, Japan, Oct 17-19, 2012,
12. S. Hayakawa, S. Kubono, D. Kahl, H. Yamaguchi, D.N. Binh, T. Hashimoto, Y. Wakabayashi, J.J. He, N. Iwasa, S. Kato, T. Komatsubara, Y.K. Kwon, T. Teranishi, S.

Wanajo, Direct measurement of the $^{11}\text{C}(\alpha, p)^{14}\text{N}$ reaction at CRIB: A path from pp-chain to CNO, Proc.Carpathian Summer School of physics 2012, Exotic Nuclei and Nuclear Particle Astrophysics IV. Sinaia, Romania 24 June-7 July 2012, L.Trache, P.G.Isar, Eds. p.339 (2012); AIP Conf.Proc.1498 (2012)

13. 轟木貴人, "Two particle correlation measurements at PHENIX", Hard Probes 2012, 5th international Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions, 2012年05月28日, Cagliari, Sardinia, Italy.
14. 中條達也, "Exploitation of hard electro-magnetic probes and jets to study the QGP with LHC-ALICE", FJPPL2012 (France Japan Particle Physics Laboratory 2012), 2012年05月28日, Clermont-Ferrand, France.
15. 新井田貴文, "Detailed HBT measurement with respect to event plane and collision energy in Au+Au collisions at PHENIX", Quark Matter 2012, XXIII International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2012年08月14日, Washington D.C., USA.
16. 轟木貴人, "Two particle correlation measurements with respect to higher harmonic event planes at PHENIX", Quark Matter 2012, XXIII International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2012年08月17日, Washington D.C., USA.
17. 水野三四郎, "Study of identified particle higher harmonics azimuthal anisotropy in 200GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX experiment (poster)", Quark Matter 2012, XXIII International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2012年08月14日, Washington D.C., USA.
18. 中込宇宙, "The eta dependence of charged particle v_n measurements using the Silicon Vertex detector at RHIC-PHENIX (poster)", Quark Matter 2012, XXIII International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2012年08月14日, Washington D.C., USA.
19. 坂田洞察, 渡邊大介, "Jet-Hadron Azimuthal Correlation Measurements in pp Collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV and 7 TeV with ALICE (poster)", Quark Matter 2012, XXIII International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2012年08月14日, Washington D.C., USA.
20. 水野三四郎, "Study of identified particle higher harmonics azimuthal anisotropy in 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX experiment", ATHIC 2012, The 4th Asian Triangle Heavy Ion Conference, 2012年11月15日, an, South Korea.
21. 中込宇宙, "The η dependence of charged particle v_n using the Silicon Vertex Detector at RHIC-PHENIX", ATHIC 2012, The 4th Asian Triangle Heavy Ion Conference, 2012年11月15日, an, South Korea.
22. 中條達也, "Di-jet energy balance in p+p (multiplicity dep.) and Pb+Pb", ALICE Physics Week at Frascati LNF, April 16-20, 2012, LNF, Frascati, Italy.
23. 坂田洞察, 渡邊大介, "Hadron-jet and pi0-jet correlations in p+p and Pb+Pb", ALICE Physics Week at Frascati LNF, April 16-20, 2012, LNF, Frascati, Italy.

24. 中島朋, 新井田貴文, "Radiation Education with Radon Detector - Detector Development and Implementation at High School -", 11th INTERNATIONAL WORKSHOP on the GEOLOGICAL ASPECTS OF RADON RISK MAPPING, Sep. 9 - 20, 2012, Prague, Czech Republic
25. 中島朋, 新井田貴文, "Radiation Education with Radon Detector (poster)", 11th INTERNATIONAL WORKSHOP on the GEOLOGICAL ASPECTS OF RADON RISK MAPPING, Sep. 9 - 20, 2012, Prague, Czech Republic

<日本物理学会発表>

1. 伊藤由太, Development of a cooling and transport device for online mass measurements with an MRTOF-MS、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 11 日-14 日
2. 伊藤由太, Online Commissioning of MRTOF-MS for mass measurement of short-lived nuclei、第 68 回日本物理学会、広島大学、2013 年 3 月 26 日-29 日
3. 石橋陽子, Development of adiabatic field rotation system to measure a spin polarization of unstable nuclei、第 68 回日本物理学会、2013 年 3 月 26 日-29 日、広島大学
4. 向井 もも, KISS での重い r-過程核の崩壊核分光にむけた高効率共鳴イオン化経路の探索、第 68 回日本物理学会、2013 年 3 月 26 日-29 日、広島大学
5. 湯浅暁玲, 大西貴博, 小松原哲郎, 笹公和, Peter Schury, 早川岳人, 静間俊行, 久保野茂, ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p){}^9\text{Be}$ 反応における astrophysical S-factor の測定、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 (京都市北区上賀茂本山)、2012 年 9 月 11 日 (火) ~ 14 日 (金)
6. 大西貴博, 湯浅暁玲, 小松原哲郎, 笹公和, Peter Henry Schury, 早川岳人, 静間俊行, 久保野茂, スカンジウム 45 + 陽子反応による宇宙元素合成の研究、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 (京都市北区上賀茂本山) 2012 年 9 月 11 日 (火) ~ 14 日 (金)
7. 坂田洞察, "Jet-Hadron Azimuthal Correlation Measurements in pp and Pb-Pb Collisions at LHC-ALICE", 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 12 日, 京都産業大学 (京都府) .
8. 中込宇宙, "RHIC - PHENIX 実験におけるシリコン崩壊点検出器を用いた方位角異方性の η 依存性測定", 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 12 日, 京都産業大学 (京都府) .
9. 渡邊大介, "Neutral pion and jet measurements in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV in ALICE", 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 29 日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県) .
10. 水野三四郎, "RHIC-PHENIX 実験における高次方位角異方性の粒子依存性の研究", 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 29 日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県) .

11. 新井田貴文, "Detailed HBT measurements with respect to the event plane in Au+Au 200 GeV collisions at PHENIX", 日本物理学会第68回年次大会, 2013年03月29日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県) .
12. Jihyun Bhom, "Multiplicity dependence of two particle azimuthal $\Delta\eta$, $\Delta\phi$ correlation in proton-proton collisions at 7 TeV center-of-mass energy with ALICE at LHC", 日本物理学会第68回年次大会, 2013年03月29日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県) .
13. 中島朋, "ラドン検出器を用いた放射線教育 - 教材開発と実践報告 -", 日本物理学会第68回年次大会, 2013年03月29日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県) .

<国内学会発表>

1. 小沢顕、稀少 RI リングプロジェクト –R プロセス解明に向けて–、第31回不安定核セミナー、筑波大学、応用加速器部門3階大会議室、2012年5月14日 (月)
2. 笹公和、末木啓介、高橋努、松村万寿美、佐藤志彦、安倍聡美、北川潤一、山形 武靖、西原 健司、松崎 浩之、福島第一原発事故により放出されたヨウ素 129 の環境中での分布-ヨウ素 131 との相関と炉内の放射能比との比較-、Distribution of iodine-129 released into the environment from the Fukushima No. 1 nuclear power plant accident -Correlation with iodine-131 and comparison with radioactivity ratios in reactors-、日本原子力学会「2013年春の年会」、2013年3月26 - 28日 近畿大学東大阪キャンパス.
3. 笹 公和、筑波大学6MV タンデム加速器導入計画の現状と今後の展望、UTTAC 研究会2013「イオンビームおよび放射性同位元素を利用した共用促進事業とサイエンスのリエゾン」、2013年3月18日 (月)、筑波大学総合研究B棟1階公開講義室0110室.
4. 笹 公和、末木 啓介、高橋 努、松村 万寿美、安倍 聡美、佐藤 志彦、筑波大学6MV AMS システム導入計画の現状、第15回 AMS シンポジウム、2013年3月9-10日、名古屋大学環境総合館レクチャーホール.
5. 笹 公和、末木 啓介、高橋 努、松村 万寿美、安倍 聡美、佐藤 志彦、柴山 尚大、木下 哲一、松四 雄騎、北川 潤一、山形 武靖、西原 健司、松崎 浩之、福島第一原発事故により放出されたヨウ素 129 の陸域環境における輸送と沈着、第15回 AMS シンポジウム、2013年3月9-10日、名古屋大学環境総合館レクチャーホール.
6. 佐藤志彦、末木啓介、笹公和、高橋努、松崎浩之、AMSによる環境中放射性ストロンチウムの迅速定量法の検討、第15回 AMS シンポジウム、2013年3月9-10日、名古屋大学環境総合館レクチャーホール.
7. 末木啓介、笹公和、柴山尚大、佐藤志彦、高橋努、松村万寿美、松崎浩之、村上道夫、山下麗、Mahua Saha、高田秀重、鯉淵幸生、Soulichan Lamxay、沖大幹、千葉県東葛地域大堀川流域における ^{137}Cs 及び ^{129}I の放射能濃度の経時変動、第15回 AMS シンポジウム、2013年3月9-10日、於名古屋大学環境総合館レクチャーホール.
8. 笹公和、末木啓介、高橋努、松村万寿美、佐藤志彦、安倍聡美、木下哲一、北川潤一、山形武靖、松崎浩之、福島県東部地域における福島第一原発事故由来のヨウ素 129 の表層土壌分布、2012年日本放射化学会年会・第56回放射化学討論会、東京工業大学 東工大蔵前ホール、2012年10月3日~5日.

9. 笹公和、石井聡、大島弘行、木村博美、高橋努、田島義一、大和良広、小松原哲郎、関場 大 一 郎、喜多英治、筑波大学 6 MV タンデム加速器システムの設計概要日本原子力学会 2012 年秋の大会、2012 年 9 月 19 日～21 日、広島大学東広島キャンパス
10. 笹 公和、筑波大学に新たに導入される 6MV タンデム加速器での AMS とその展望、研究集会「宇宙線生成核種の連続記録と古宇宙線・古環境変動 II」、2012 年 8/24 - 8/25、弘前大学文京町キャンパス理工学部 1 号館
11. 笹 公和、石井 聡、大島 弘行、木村 博美、高橋 努、田島 義一、大和 良広、小松原 哲郎、関場 大 一 郎、喜多 英治、筑波大学タンデム加速器施設における震災復興プロジェクトの概要、第 25 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2012 年 7 月 20 日（金）～21 日（土）、名古屋大学野依記念学術交流館
12. 笹 公和、石井 聡、大島 弘行、木村 博美、高橋 努、田島 義一、大和 良広、小松原 哲郎、関場 大 一 郎、喜多 英治、筑波大学マルチタンデム加速器施設 (UTTAC) の震災復興現況と 6 MV タンデム加速器導入計画、第 9 回日本加速器学会年会、大阪大学会館・豊中キャンパス、2012 年 8 月 8 日 (水)～11 日 (土)
13. 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、ペロブスカイト型酸窒化物 $ATaO_2N$ ($A=Sr, Ca$) エピタキシャル薄膜の誘電特性、2012 年 秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学城北地区、松山大学文京キャンパス 2012 年 9 月 11 日（火）～14 日（金）
14. 鈴木 温、廣瀬 靖、岡 大地、中尾祥一郎、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 哲也、アナターゼ型 $TaON$ エピタキシャル薄膜の物理特性 II、2012 年 秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学城北地区、松山大学文京キャンパス、2012 年 9 月 11 日（火）～14 日（金）
15. 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、ペロブスカイト型酸窒化物エピタキシャル薄膜の誘電特性、セラミック協会 第 25 回秋季シンポジウム、2012 年 9 月 19 日（水）～21 日（金）、名古屋大学（東山キャンパス）
16. 佐藤志彦、末木啓介、笹公和、箕輪はるか、緒方良至、砂浜における放射性セシウムの動態、放射線安全管理学会、大阪大学吹田キャンパス、2012 年 12 月 4 日（火）～6 日（木）
17. 佐藤志彦、末木啓介、笹公和、箕輪はるか、緒方良至、福島事故由来である放射性核種の土壌中における存在状態の解明 –イメージングプレートを用いた分析–、第 14 回「環境放射能」研究会 2013 年 2 月 26 日（火）～2 月 28 日（木）、高エネルギー加速器研究機構
18. 小松原哲郎、1MV タンデトロンによる宇宙核物理筑波大学 UTTAC 研究会、「イオンビームおよび放射性同位元素を利用した共用促進事業とサイエンスのリエゾン」筑波大学、2013 年 3 月 18 日（月）
19. 中條達也、”巨大加速器 LHC で迫る初期宇宙の世界”，若い世代のための出前講義（筑波大学東日本大震災復興・再生支援プログラム事業）、2012 年 11 月 30 日、気仙沼高等学校（宮城県）

<学位論文（博士論文）>

1. 数理物質科学研究科・博士論文 坂田洞察、Measurements of azimuthal correlation between jets and charged particles at LHC-ALICE experiment, (LHC-ALICE 実験におけるジェット荷電粒子方位角相関測定).

<学位論文（修士論文）>

1. 数理物質科学研究科、修士（理学）、錦織 良（Ryo Nishikiori）、Ca 同位体の荷電変換断面積の測定と荷電核半径の導出 (Measurements of Charge-Changing Cross Sections for Ca Isotopes and Deduction of Charge Radii)
2. 数理物質科学研究科、修士（理学）、丹羽 崇博 (Takahiro Niwa)、不安定核核磁気モーメントにおける符号決定法の開発 (Developments of apparatus to determine the sign of nuclear magnetic moments for radioactive nuclei)
3. 数理物質科学研究科、修士（理学）、三田 浩希 (Hiroki Mita)、イオンガイドガスセルの為の表面電流を用いた静電レンズの研究 (Surface current electrostatic lens for an ion guide gas cell)
4. 数理物質科学研究科、修士（理学）、湯浅 暁玲、(Toshiyuki Yuasa) ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p_0){}^9\text{Be}$ 反応における astrophysical S-factor の測定、(Measurement of astrophysical s-factor for ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p_0){}^9\text{Be}$ reaction)、
5. 数理物質科学研究科、修士（理学）、郡司薫、(Kaoru Gunji)、LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 鉛・鉛衝突における荷電パイ中間子を用いた 2 粒子量子干渉効果の反応平面に対する方位角依存性の研究
6. 数理物質科学研究科、修士（理学）、中込宇宙、(Hiroshi Nakagomi)、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金・金衝突におけるシリコン崩壊点検出器を用いた方位角異方性の η 依存性の研究
7. 教育研究科、修士（理学）、中島朋、(Tomo Nakajima)、ラドン検出器を用いた放射線教育 -教材開発と実践 -
8. 数理物質科学研究科、修士（理学）、船戸龍、(Ryo Funato)、pythia シミュレーションを用いた 200GeV 陽子・陽子衝突における 2 粒子相関分布の粒子多重度依存性の研究
9. 数理物質科学研究科、修士（理学）、堀内聖志、(Satoshi Horiuchi)、LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 鉛・鉛衝突における反応関与部・傍観部を用いた反応平面測定および方位角異方性の研究
10. 数理物質科学研究科、修士（理学）、渡邊大介、(Daisuke Watanabe)、LHC-ALICE 実験における $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 陽子・陽子および鉛・鉛衝突での π^0 中間子-ジェット方位角相関の研究

<学士論文>

1. 理工学群、物理学類、学士、新井 郁也 (Fumiya Arai)、超重元素の質量測定における検出システムと輸送システムの研究 (Research of detection and transportation systems in mass measurements of super-heavy nuclei)
2. 理工学群、物理学類、学士、Sibagat Aldyyarov、高エネルギー RI ビーム検出用シンチレーション検出器の特性評価 (Performance check of scintillation detectors for high-energy RI beams)
3. 理工学群、物理学類、学士、沢畑 克樹 (Katsuki Sawahata)、高エネルギー RI ビームの飛行時間測定用薄膜検出器の特性評価 (Performance check of foil detectors for high-energy RI beams time-of-flight)
4. 理工学群、化学類、学士、柴山 尚大、「千葉県東葛地域の大堀川における ^{137}Cs 及び ^{129}I の長期変動」Long-term Time Variation of Radioactive Cesium-137 and Iodine-129 in the Ohori River, Toukatsu area, Chiba Prefecture
5. 理工学群、物理学類、学士、泉 大希、「5MV タンデム加速器を用いた宇宙線起源 ^{36}Cl の検出法の研究」、Study of the Detection Method of Cosmogenic ^{36}Cl by the 5 MV Tandem Accelerator.

<科学研究費取得状況>

1. 若手研究 (B)、磁気双極子モーメントの符号決定手法の開発、代表者：長江大輔、4,420,000 円
2. 基盤研究 (A) 「加速器質量分析法を用いた人為起源の長寿命放射性核種分析による環境影響評価」、研究期間：2012 - 2015 年度、研究経費：2012 年度：12480 千円 (直接経費：9600 千円, 間接経費：2880 千円)、研究代表者：笹 公和、研究分担者：末木啓介、松崎浩之、松四 雄騎、松村宏
3. 挑戦的萌芽研究 「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」、研究期間：2011 - 2013 年度、研究経費：2012 年度：910 千円 (直接経費：700 千円, 間接経費：210 千円)、研究代表者：笹 公和、研究分担者：末木啓介、松四 雄騎
4. 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」、研究期間：2010 - 2012 年度、研究代表者 松崎浩之、研究分担者 笹 公和、堀内一穂、横山祐典、柴田康行、村松康行、本山秀明、川村賢二、研究者分担金 笹 公和 2012 年度: 1,600 千円
5. 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」、「水・土砂移動に伴う放射性物質の移行過程の理解」、研究期間：2012 - 2016 年度、研究代表者：恩田 裕一、研究分担者：笹 公和、等、研究者分担金：笹 公和 2012 年度: 1,100 千円、
6. 基盤研究 (C) 「M-type 花崗岩の熱水流体の組成と挙動」、研究期間：2012 - 2014 年度、研究代表者：黒澤正紀、研究分担者：笹 公和、研究者分担金：笹 公和 2012 年度: 300 千円

7. 基盤研究 (C) 「ビッグバン元素合成におけるリチウム合成機構の解明」代表者：小松原 哲郎、連携研究者：早川 岳人、静間 俊行、平成 24 年度 2,900,000 円 (間接経費 870,000 円)
8. 基盤研究 (S) 「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」、2008 年度～2012 年度、代表者：三明康郎、分担者：江角晋一、中條達也、稲葉基 (筑波技術大)、浜垣秀樹 (東京大) 2012 年度：8,200 千円 (直接経費)、2,460 千円 (間接経費)

<外部資金取得状況>

1. JST/CREST 「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」、平成 23 年度採択課題、「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」(代表沖大幹) CREST 移流拡散チーム 末木グループ 研究分担 笹 公和、恩田裕一、研究者分担金 笹 公和 2012 年度：500 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)、小沢 顕、笹 公和、江角晋一、中條達也、2,000 千円 (2012 年度)
3. 日仏素粒子物理学研究所 (FJ-PPL) , 研究課題：”Exploitation of hard electro-magnetic probes and jets to study the QGP with LHC-ALICE” 代表者：三明康郎、分担者：江角晋一、中條達也、他 2012 年度：1,000 ユーロ

<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 (2012 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 (2012 年度)

VII-1. 非平衡統計物理グループ

教授	有光 敏彦
助教	吉田 恭
博士後期課程大学院生	小松崎 慎人, 武智 公平, 大日向 正志, 真山 祐児
博士前期課程大学院生	程 コウ (~2012年7月31日), 阿部 将大, 小口 拓郎

【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 [2], 講演 [1, 3]

Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) は、『間欠性の本質は, Navier-Stokes 方程式のスケール不変性に起因する速度場の特異性が実空間にマルチフラクタル分布していることの現れである』との仮説に基づいて, 裾引き 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量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_+ 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発散 (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リング指数 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 に関してスケールリング的振る舞いをするのが分かった。Incoherent 運動は, coherent 運動の周りの揺らぎであり, 乱流に特有なゆ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データを提供を受け, 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, 新しいスケール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 の裾部分と中心部分の有する情報の抽出を行い, それらの部分の解析を進めた。その結果, 渦の混んでいる領域の PDF には, 『乱流のコ

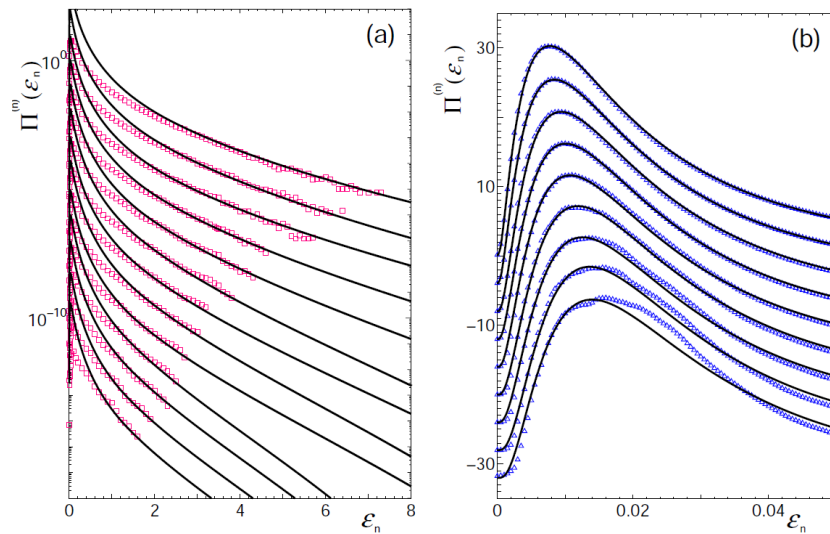


図 1: 4096³DNS スナップショット・データ (金田, 石原ら) より得られた乱流渦の可視化図を 8³(= 512) 分割し、渦の混んでいる領域 と渦の空いている領域における PDF を抽出し、その相違を解析したもの。(a) の□は、渦の混んでいる領域の PDF, (b) の△は、渦の空いている領域の PDF、いずれも実線は、系全体の PDF を解析した理論曲線より得られたもの (詳細は論文 [2] 参照)

ヒーレントな運動 (乱流系全体から抽出した PDF の裾野部分) に関する情報が含まれ、渦の空いている領域の PDF には、「乱流に特有なインヒーレントな運動 (乱流系全体から抽出した PDF の中心部分)」に関する情報が含まれることがわかった。つまり、「間欠性に由来する PDF 裾野部分」と「NS 方程式のスケール変換不変性を破る項 (散逸項) に由来する PDF 中心部分」に分けて解析するという MPDFT の仮説の妥当性が、検証された。そこで、さらなる、詳細な解析を進めている (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)

MPDFT の「乱流とは全ての δ スケール・Cantor 集合と同等な階層構造を持つ渦構造の重ね合わせと見做すことができる」という仮説の検証を目的に、1 次元離散力学系における $\delta^K (K \gg 1)$ 周期軌道の階層構造と不安定性の関係の解析を行っている。 δ^K 超安定周期軌道 (δ^K -PSSO) は、系がカオス状態となる制御パラメータ領域内の δ 周期の窓の中に存在する。 δ 周期の窓に内包される δ^K 周期の窓の無限の入れ子構造を反映し、 δ^K -PSSO は δ スケール・Cantor 集合と同じマルチフラクタル構造を持ち、累積軌道拡大率が冪的に増大するという特徴を持つ。この軌道の中の間欠性が顕著な領域に関して、累積軌道拡大率の冪的不安定性の冪指数 $1/(1-q)$ が $1/(1-q) = (1/\alpha_- - 1/\alpha_+) \ln \delta / \ln(2 - 1/\delta)$ というスケーリング関係式に従うことが明らかとなっている。ただし、 α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は δ^K -PSSO のマルチフラクタルスペクトル $f(\alpha)$ の零点である。

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

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

依存性が

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

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

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

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

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

(3) 量子流体乱流の統計解析 (吉田, 有光) 論文 [3], 解説・紀要 [1], 講演 [2, 5]

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

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

完結近似方程式は、GP 方程式中で線形項が支配的で非線形項が十分小さい場合には、その範囲で有効な弱波動乱流理論の式と一致することが示された。完結近似方程式の特徴は、弱波動乱流理論の適用範囲外の強乱流状態つまり非線形項が支配的である場合にも適用可能だということである。GP 方程式では運動エネルギーと相互作用エネルギーを合わせた全エネルギーおよび粒子数が保存量である。強乱流状態でその双方それぞれがカスケードする場合のエネルギースペクトルのべき則を求めた。特にエネルギーカスケードの場合エネルギースペクトルは k^{-2} 則、ただし k は波数、であり、このべき則は先行研究の数値シミュレーションの結果とも整合している。また完結近似の理論解析では、統計的定常性を維持するために k^{-2} 則に補正項が必要であることが示唆された。完結近似理論の結果の数値シミュレーションによる定量的な検証などは今後の課題である。

(4) 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 [1]

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、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は対応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。

【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 [4], 講演 [4]

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

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

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) Bateman 模型の正準量子化 (阿部 (院生), 有光) 講演 [6]

古典減衰振動子系を Lagrange 形式や Hamilton 形式で扱う理論として, Bateman 模型が存在する。Bateman は, 全体としてエネルギーが保存するように, 正準共役な位置変数 X と運動量変数 P の他に補助的な系 (ミラー系) の正準共役な位置変数 \bar{X} と運動量変数 \bar{P} を導入し, 古典減衰振動子の運動方程式を導くハミルトニアンを考えた。 X と P の間, \bar{X} と \bar{P} の間に正準交換関係を課し, Heisenberg 方程式を用いて分散の時間発展を計算すると, 時刻無限大で Heisenberg の不確定性関係が破れ, 正しい熱平衡状態には行き着かないという問題が生じる。

本研究では, NETFD を用いて, 量子減衰振動子の解析を行った。この NETFD の体系を用いることにより, 量子減衰振動子を記述する2つの異なるタイプのハットハミルトニアンを導出した。この2つのタ

イブの大きな違いは、回転波近似を施しているかいないかの違いである。回転波近似を施したハットハミルトニアンに乱雑力演算子を加えて、伊藤型量子確率 Liouville 方程式を考える。これを Stratonovich 型量子確率 Liouville 方程式に変換すると、その時間発展推進子に Bateman 模型のハミルトニアンに対応したハットハミルトニアンが現れる。このことから、Bateman 模型のハミルトニアンは Hilbert 空間に作用する演算子ではなく、Liouville 空間に作用する演算子と解釈すべきであることを明らかにした。

(3) 環境下にある量子鋏系 (程, 阿部 (院生), 有光) 学位論文 (修士) [1]

量子鋏とは、古典的な状態 $|\text{in}\rangle_3$ を入力すれば、出力状態 $|\text{out}\rangle_1$ として量子力学的状態である真空状態 $|0\rangle_1$ と 1 光子状態 $|1\rangle_1$ の重ね合わせ状態が取り出せる装置である。本研究では、ビームスプリッター BS1、BS2 を通過した光が散逸の影響を受ける場合について調べた。散逸 Heisenberg 方程式を解析的に解くことで、BS1、BS2 を通過した後の光子に対する生成消滅演算子の表式を得ることが出来た。この表式を用いて、測定後の状態を計算した結果、散逸が存在する場合でも、コヒーレント光の強度とビームスプリッターとの相互作用の強さを調節することで、任意の重みで真空状態 $|0\rangle_1$ と 1 光子状態 $|1\rangle_1$ が切り出せることが明らかとなった。入射状態として熱的な状態も扱った。その結果、コヒーレント光と同様に熱的な状態に対しても、真空状態 $|0\rangle_1$ と 1 光子状態 $|1\rangle_1$ の重ね合わせ状態が切り出せることが明らかとなった。

(4) 脳皮質における非平衡相転移 (大日向 (院生), G. Vitiello (U of Salerno))

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 (メソスコピック), 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 (電氣的, 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。

< 論文 >

- [1] Kohei Takechi, Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Numerical simulation of 2D granular particles and its analyses by means of the micropolar fluid model”, *Central European J. Phys.* **10** 684–691 (2012).
- [2] T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. takechi, Y. Kaneda and T. Ishihara: “Study of two elements constituting turbulence by a multifractal theory for probability density functions - Through the analyses for 4096³ DNS”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **410** 012083 (2013).
- [3] Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Inertial range structure of Gross-Pitaevskii turbulence within a spectral closure approximation”, submitted.
- [4] S. Kitajima, T. Arimitsu, M. Obinata and K. Yoshida: “Quantum teleportation for continuous variables via a partially entangled state constructed under the environment”, in preparation to submit.

< 著書 >

- [1] 金田行雄編「乱流の計算科学 - 乱流解明のツールとしての大規模数値シミュレーション」(計算科学講座第5巻) 共立出版, 2012. (吉田恭が第3.3節「さまざまな外力下での乱流」を担当)

< 解説・紀要 >

- [1] 吉田恭: 「非線形 Schrödinger 方程式に従う乱流の統計理論に向けて」, 京都大学数理解析研究所講究録 1823(2013) 149-157.

< 講演 >

- [1] T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. takechi, Y. Kaneda and T. Ishihara: “Study of two elements constituting turbulence by a multifractal theory for probability density functions - Through the analyses for 4096³ DNS”, International Conferense on Mathematicl Modeling in Physical Sciences, 2012年9月3-7日. Budapest, Hungary.
- [2] 吉田恭, 有光敏彦: 「量子流体乱流の完結近似 II」, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月19日, 横浜国立大学, 横浜.
- [3] 武智公平, 有光直子, 有光敏彦, 金田行雄, 石原卓: 「レイノルズ数の異なる 40963 DNS 乱流のマルチフラクタル PDF 理論による比較解析」, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月19日, 横浜国立大学, 横浜.
- [4] 大日向正志, 北島佐知子, 有光俊彦, 吉田恭: 「不完全ホモダイン測定」, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月19日, 横浜国立大学, 横浜.
- [5] 吉田恭, 有光敏彦: 「量子流体乱流における保存量のカスケード」, 京都大学数理解析研究所研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理」2013年1月10日, 京都大学, 京都.
- [6] 阿部将大, 有光敏彦: 「NETFD による Bateman 模型の正準量子化」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月27日, 広島大学, 東広島.

< 卒業論文 (学士) >

- [1] 筑波大学卒業論文: 原田慧 (有光) 「複雑ネットワークにおける確率的ツリー・モデルと Tsallis 分布」 (2013) 3月.
- [2] 筑波大学卒業論文: 酒井一樹 (有光) 「量子鍵分配プロトコルとその比較検討」 (2013) 3月.

< 学位論文 (修士) >

- [1] 筑波大学修士論文: 程コウ (有光) 「量子鉄の非平衡熱場理論による定式化」 (2012) 7月.

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 グラフェンの特異な電子状態の理論（一電子問題から多体問題へ）

グラフェンの最も特徴的な特性の一つがゼロギャップ半導体であること、つまり、エネルギーギャップが波数空間で閉じる点があることである。一般に価電子帯の最大エネルギー、伝導帯の最低エネルギー近傍での有効理論は有効質量近似で行われるが、ゼロギャップ半導体の場合、有効質量は定義できず、有効理論は質量ゼロのディラック方程式となる。このようにバンドギャップがゼロとなることは2次元では偶然には起こらず、対称性等の存在を示唆する。理想的なグラフェンにおいてはハニカム格子の結晶の対称性により、それを理解することも可能であるが、より一般の立場からは伝導帯、価電子帯の有効2バンド系に対するいわゆるカイラル対称性に2次元ゼロギャップ半導体の存在理由を帰することもできる。

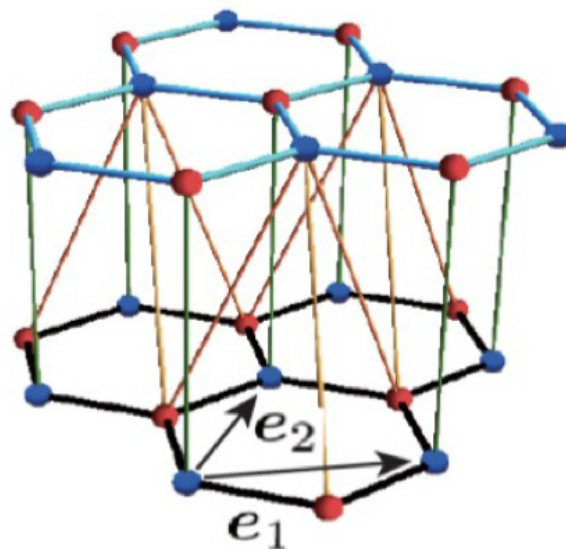


図 1: 多層グラフェンにおけるカイラル対称なホッピング

この一般的な立場に立つとき、グラフェンの種々の特異な特性を容易かつ物理的起源が明らかな形で理解することができる。例えば、ゼロギャップとなる波数はブリルアンゾーン内 K 点、K' 点という非等価な 2 点に存在するが、それはカイラル対称なモデルにおけるフェルミオンダブリングと呼ばれる一般的な議論の最も単純な例となる。これはいわゆるトポロジカルな議論なので、有限の大きさの摂動に対して変更されることのない議論となる。例えば、グラフェンに有限の大きさの歪みを加えても、ギャップレスの点是对称性の高い K 点、K' 点からずれることはあっても、ギャップがすぐに閉じないこととなる。プ

リルアンゾーン内2点でギャップが閉じることは、カイラル対称性に保護されているのである。一般に2次元の荷電粒子が一様な磁場下におかれる場合、その電子状態はランダウ準位をつくるが、グラフェンの場合その準位構造にも特異な特性があらわれ、磁場の強度によらず常にゼロエネルギーにランダウ準位が固定されて存在することとなるが、これもまたカイラル対称性が保護するトポロジカルな特性のもう一つの例である。結晶の対称性と異なり、カイラル対称性は、系に物理的な乱れがあっても保護されることがある。その典型的な例が、単層グラフェンに固有とされるリップル構造としてのグラフェンのうねりである。このうねりは一見全くランダムに見えるが、カイラル対称性は保ち、この場合ゼロエネルギーランダウ準位の特異な性質は保たれたままとなる。

以上グラフェンの特異な電子状態に関して、本年度は、カイラル対称性をキーワードとした普遍的な議論を行い、多層グラフェンを含め一般的な観点からの論文を公表した。更に、この議論はグラフェンのいわゆる一電子問題としての特性に関してであるが、更に、近年グラフェンの多体問題も大きな興味をあつめている。この、グラフェンにおける多体問題、電子関連の問題は、我々がこの数年精力的に研究を進めているテーマの一つである。前述のようにグラフェンにおいてはカイラル対称性は重要な意義をもつが、それは一電子問題に限らず、多体問題においても更に重要となる。関して我々はカイラル凝縮相というあらたな多体の電子状態をグラフェンの基底状態に対して提唱するとともにその物理的意義を明らかとする研究を進めている。その一つの重要な帰結として、いわゆる占有率0の量子ホール状態において励起ギャップが有限となる実験事実があるが、関してカイラル凝縮相の観点から実験と整合的な理論を提出した。今年度はより実験に即したスピン非偏極のカイラル凝縮状態を基底状態の可能な相として提案すると共に実験結果と比較し、これもまた実験と整合的な結果を得ている。

2 トポロジカル秩序の概念とその物性論における応用

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 のランダウフェルミオン系、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。

さらに上記のいわゆるトポロジカル相においてはバルクの相が特徴をもたないにも関わらず、系に境界、不純物等幾何学的な局所的な空間摂動が加えられた場合、摂動が加わっ

た場所の近傍に特徴的な局在状態 (多体問題としては局所モード) が生まれる。これがいわゆる「バルク・エッジ対応」といわれる概念であり、我々が広く提唱してきたものである。

以上のベリー接続、バルクエッジ対応、これらの概念を用いて研究を進めてきた。に関して、以下幾つか例をあげよう。

なお、本年度は、トポロジカル秩序に関してその一般論の構築を進めるとともに、バルクエッジ対応の理論を発展させ、に関して複数の招待講演を行うとともに日本物理学会会誌に総説を公表し、周知につとめた。

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

2.1 トポロジカル相におけるクラマース縮退の意義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。関連して、研究が進展し、現在論文を準備中である。

2.2 短距離量子もつれ相における対称性が保護するトポロジカル秩序

トポロジカル相においては、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トポロジカル相に対するベリー位相の量子化の理論 [*] はこの状況において具体的なトポロジカル秩序変数を構成するところみとなる。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。本年度は、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、現在論文をまとめつつある。

2.3 グラフェンフレークのダイマー状態

グラフェンの特性の一つとして境界を持つグラフェンにおいて存在する特徴的な局在状態がある。このようなバルクが非自明な状態 (ゼロギャップ半導体等) における特徴的な局在状態の存在は、一般的に「バルク・エッジ対応」とよばれる普遍的な観点から近年議論されることが多いが、この「バルク・エッジ対応」は初貝が量子ホール相に対して適用したものがその最初の例である。近年グラフェンもバルクなものでなく有限形状のものに多くの興味が集まりつつある。これをグラフェンフレークと呼んだとき、この系には多様な境界が存在し、バルク・エッジ対応の観点から見たとき極めて重要な系となる。

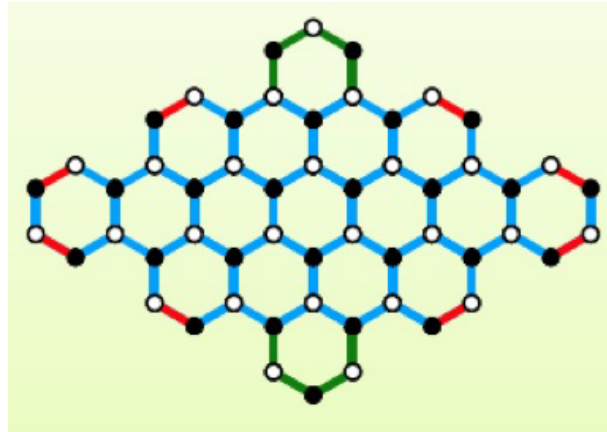


図 2: グラフェンフレークにおけるボンド秩序変数

この問題に関して Z_2 ベリー位相という少し変わったトポロジカルな量を持ち込むことで、グラフェンフレークのアームチェア端における 2 量体化に関する極めて明快な結果を得た。現在これに関して論文を執筆中であり、幾つかの会議にてその成果を発表中である。

< 論文 >

1. Y. Hatsugai, T. Morimoto, T. Kawarabayashi, Y. Hamamoto and H. Aoki, “ Chiral symmetry and its manifestation in optical responses in graphene: interaction and multilayers ”, *New J. Phys.* 15, 035023 (26 pages) (2013) , invited paper in “ Focus on graphene optics ”.
2. 初貝安弘、「トポロジカル秩序とベリー接続」日本物理学会誌「解説」68, 19-28 (2013)
3. T. Shiokawa, G. Fujita, Y. Takada, S. Konabe, M. Muraguchi, T. Yamamoto, T. Endoh, Y. Hatsugai and K. Shiraishi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 04CJ06 (4 pages) (2013).
4. Y. Hamamoto, H. Aoki, and Y. Hatsugai, “ Chiral condensate with topological degeneracy in graphene and its manifestation in edge states ”, *Phys. Rev. B* 86, 205424 (6 pages) (2012).
5. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, “ Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields ”, *Phys. Rev. B* 85, 165410 (5pages) (2012)
6. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai , T. Morimoto and H. Aoki, “ Generalized chiral symmetry for tilted Dirac cones ”, *Int. J. Mod. Phys. Conf. Series* 11, 145-150 (2012)

< 講演:国際会議 >

1. (Invited) Y. Hatsugai, “ Symmetry protection in topological phases ”, 2013 EMN West Meeting on Topological Insulators, Jan. 8 (2013) Houston, U.S.A.
2. (Invited) Y. Hatsugai, “ Topological phases and bulk-edge correspondence ”, The 317-th MANA special Seminar, March 6 (2013) NIMS, Tsukuba, JAPAN.

3. (Invited) Y. Hatsugai, “ Symmetry and order parameters for topological phases ”, Seminar at M. Ueda Group, Univ. Tokyo, Jan. 24 (2013) Tokyo JAPAN.
 4. (Invited) Y. Hatsugai, “ Fun of graphene for physicists ”, 4-th Tsukuba-Hsinchu Joint symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, Dec.18 (2012), Tsukuba JAPAN.
 5. (Invited) Y. Hatsugai, “ Berry connection and bulk-edge correspondence in topological phases ”, 36-th International conference of theoretical physics:correlation and coherence at different scales, Sep. 15 (2012), UStron, Poland.
 6. (Invited) Y. Hatsugai, “ Chiral symmetry and topology in graphene ”, Topology in physics and material science, Aug. 29 (2012), NIMS, Tsukuba, JAPAN
 7. (Invited) Y. Hatsugai, “ Bulk-Edge Correspondence in Condensed Matter and Its Application ”, 2012 Villa Conference on Topological Insulators, Orland USA.
 8. (Invited) Y. Hatsugai, “ Characterization of Topological Phases ”, Special lecture at MANA, March 6 (2012) NIMS, Tsukuba JAPAN.
-
9. Sho Tanaya, Yuji Hamamoto, Satoru Konabe, Kenji Shiraishi, and Yasuhiro Hatsugai, “ Edge states of graphene and silicene ribbons using a multi-orbital tight-binding model ”, 4-th Tsukuba-Hsinchu Joint symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, Dec,17 (2012) Tsukuba, JAPAN
 10. Risa Sumi, Yuji Hamamoto, and Yasuhiro Hatsugai, “ Electronic structure of twisted bilayer graphene ”, 4-th Tsukuba-Hsinchu Joint symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, Dec,17 (2012) Tsukuba, JAPAN
 11. Christoph M. Puetter, Satoru Konabe, Yasuhiro Hatsugai and Kenji Shiraishi, “ Semiclassical Klein Tunneling with Berry Phase Corrections in Graphene ”, 2012 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS12), Dec. 6, Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA
 12. T. Kawarabayashi, T. Honda, H. Aoki, and Y.Hatsugai, “ Chiral Symmetry and Fermion Doubling in the Zero-mode Landau Levels of Massless Dirac Fermions with Disorder ”, ICPS 2012-31st International Conference on the Physics of Semiconductors, July 31 (2012), Zurich, Switzerland
 13. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, “ Stability of zero-mode Landau levels in bilayer graphene against disorder : role of the chiral Symmetry ”, The 20th International Conference on ”High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, HMF-20, July 24 (2012) Chamonix Mont-Blanc, France.
 14. Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki, and Y. Hatsugai, “ Chiral symmetry and many-body effect in multi layer grapheme ”, The 20th International Conference on ”High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, HMF-20, July 24 (2012) Chamonix Mont-Blanc, France.
 15. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, “ Chiral Symmetry and Robustness of Zero-mode Landau Levels in Bilayer Graphene ”, DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Netherland, June 4. (2012), DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Netherland
 16. Y. Hamamoto, H. Aoki, Y. Hatsugai, “ Many-body problem in graphene quantum Hall systems from a perspective of chiral symmetry ”, The eighth international nanotechnology conference on communication and cooperation, May 8 (2012), AIST, Tsukuba, JAPAN

< 講演:国内会議 >

1. (集中講義) 初貝安弘, 「バルクエッジ対応の物理」 広島大学大学院集中講義 2012 年 06 月 27 日
2. (招待講演) 初貝安弘, 「ベリー接続とエンタングルメント」 日本物理学会 2012 年秋季大会 (領域 11, 領域 01 合同) シンポジウム量子多体系におけるエンタングルメント、2012 年 09 月 19 日、横浜国立大学, 横浜

3. 鷲見理沙, 濱本雄治, 初貝安弘, Twisted Bilayer Graphene のチャーン数, 日本物理学会第 68 回年会 2013 年 03 月 26 日 広島大学
4. Christoph Minol Puetter, Satoru Konabe, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, Semiclassical Klein Tunneling with Berry phase corrections in Graphene, 68-th JPS Annual Meeting 2013 年 03 月 28 日 Hiroshima Univ.
5. 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, ケクレ型ボンド秩序があるグラフェンの $n=0$ ランダウ準位の乱れに対する安定性、日本物理学会第 68 回年会 2013 年 03 月 26 日 広島大学
6. 新井正男, 初貝安弘, 「周期系における軌道磁化」、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 09 月 18 日、横浜国立大学, 横浜
7. 濱本雄治, 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘, 「磁場中二層グラフェンの多体効果とエッジ状態」 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 09 月 18 日 横浜国立大学, 横浜
8. 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, 「磁場中の 2 層グラフェンにおけるゼロモードのトポロジカルな安定性 — trigonal warping の効果 —」, 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 09 月 横浜国立大学, 横浜
9. Y. Hatsugai, Y. Avishai, " Explicit charge-flux duality in some 3D topological phases ", JPS Fall meeting, Sep.18, Yokohama, Yokohama National University, JAPAN.

< 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, "Progress of Theoretical and Experimental Physics" 編集委員
3. 初貝安弘, 日本学術振興会、特別研究員等審査会専門委員会委員
4. 初貝安弘, 日本学術振興会、国際事業委員会書面審査委員
5. 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. 関大地: 有限形状グラフェンの Z_2 ベリー位相 (数理物質科学研究科、卒業論文、2012.3)

< 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, 2012 年度:6630 千円(直接経費:5100 千円, 間接経費:1530 千円)(研究代表者: 初貝安弘)
2. 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, 2012 年度:1690 千円(直接経費:1300 千円, 間接経費:390 千円)(研究代表者: 初貝安弘)
3. 科学研究費 基盤研究 (C)「磁場中の電子状態計算と位相不変量による電子物性」研究課題番号:23540460, 2012 年度:390 千円(直接経費:300 千円, 間接経費:90 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), 2013 年 3 月 17 日—2013 年 3 月 23 日(卓越した大学院拠点形成支援補助金)

VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 (1名)

本研究グループでは、メゾ系・ナノ系がもつ量子性に起因して現れる興味深い基礎量子物性・量子輸送現象を、様々な「場の量子論」の手法により理論的研究を進めている。継続して研究を進めている系として、電氣的にスピン輸送が制御可能な「非平衡ラシュバ量子ドット干渉計」がある。本年度は並行して、非平衡量子ドット系を扱う理論手法と量子ホールプラトー転移に関する研究を行った。本年度の成果は以下のとおりである。

【1】非平衡量子ドット系の理論的手法

(1) 多端子非平衡量子ドット系の解析的摂動計算 (論文 [3], 学位論文 [1])

量子ドット系の量子輸送現象の解析は、ドット系の電子相関とバイアス電圧による非平衡性を同時に考慮する必要があり、理論的な取り扱いが困難な問題の一つである。電子間相互作用を近似的に扱う手法として、電子間相互作用を摂動として扱う摂動論は標準的な手法であるが、非平衡量子ドットにおいては、得られたダイアグラムの寄与を数値積分することに留まっていた。本研究では、一般的に多端子リードと接合する非平衡量子ドットについて、相互作用の2次までの非平衡摂動計算を遂行し、量子ドットの遅延自己エネルギー $\Sigma^R(\omega)$ を(二重対数関数を使用した)完全に解析的な形で評価することができた。任意のゲート電圧や多端子リードと結合している状況で非平衡摂動計算が解析的に評価されたのはこれが初めてである。

(2) 非平衡揺らぎの有効場理論 (講演 [2])

非平衡揺らぎ(ショットノイズ)の解析は電流揺らぎを評価することにより行われる。そのため電流やスピン流と異なり、電子間相互作用の結節補正が大きな寄与をする可能性があり、理論計算を行う際に無視することができない。一方、スレーブボゾン法等の通常平均場近似を使うと、電子間相互作用は自己エネルギー補正として考慮されるのみで、相互作用結節の寄与は取り込まれない。我々は相互作用結節補正を平均場理論の枠組みで取り込む手法として、完全計数統計に用いられる計数場を導入し、計数場に依存した自己エネルギーを使う方法を開発し、その性質を詳しく調べた。自己エネルギーの計数場依存性はWard恒等式と呼ばれる一般的関係により支配され、汎関数繰り込み群の際に現れるフロー方程式と類似の構造を持つ。この構造のため、自己エネルギーの計数場依存性は相互作用結節補正を考慮することと等価であることがわかった。

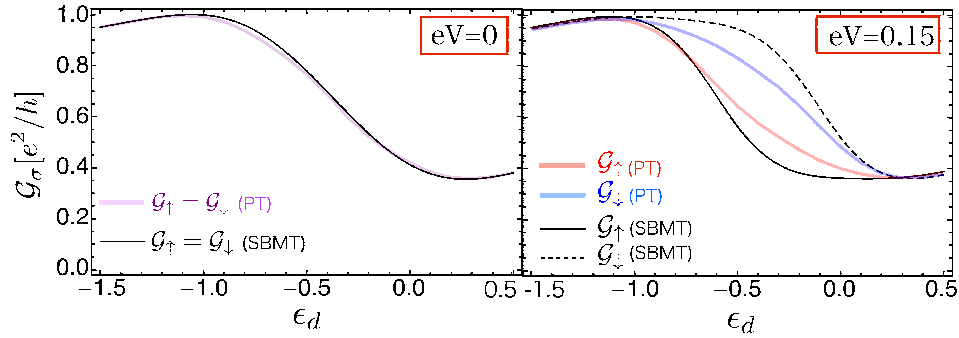


図1 コンダクタンスのゲート電圧依存性の摂動論 (PT) とスレーブボゾン平均場理論 (SBMT) との比較 ($U/\Gamma = 2$, $\phi_{so} = \pi/4$)。 (左) バイアス電圧 = 0 の時 (右) 有限バイアス電圧の時。

【2】非平衡 Rashba 量子ドット干渉計のスピンの制御

(1) 非平衡近藤効果と電気的スピン流生成 (論文 [1,2,4], 講演 [3,4], 学位論文 [1])

これまで有限相互作用スレーブボゾン法による自己無撞着計算により、干渉計に量子ドットを埋め込んだ系を使うと、Rashba 型スピン軌道相互作用と有限バイアスの相乗効果により電気的にスピン分極やスピン流を生成可能であることが理論的に明らかになってきた。本年度は、従来の計算手法と独立な近似手法として、非平衡摂動計算を行い、従来の有効場理論からの結果と比較検討を行った (図 1)。非平衡摂動論の適用範囲は、これまでの有効場理論に比べ限定的ではあるものの、両者の結果は整合的であり、その妥当性を確認できた。低バイアス領域においてはスピン流を解析的の評価を行い、その依存性を解析的に明らかにした。量子ドット干渉計について非平衡系の 2 次摂動計算を解析的に評価したのは本研究が初めてである。摂動論の結果を N 重縮退を持つ Rashba ドット系に拡張すると、 $N_d = 1$ に対応するゲート電圧付近では、単一準位ドット系と同様にスピン流が非平衡生成され、その大きさは縮退度に比例し増大することがわかった。従って多重縮退準位をもつ量子ドット系はスピン流生成により有利であることが明らかになった。

(2) 非平衡スピン流生成：第三端子による電気的検知 (講演 [5])

非平衡ラシュバ量子ドット干渉計において電気的に生成されるスピン流を実験的に確認するためには、通常、磁気応答や強磁性リードによる検知といった磁氣的測定手法を必要とする。本研究では量子ドットにスピン流が存在することを電気的に確認する手法として第三端子によるコンダクタンス測定 (図 2) を提案した。これは左右のリードにかかるバイアスを一定に保持しながら、弱く結合した第三端子の化学ポテンシャルを走査してコンダクタンスを測定するものであり、以下のようにドットの非平衡状態密度と比例することが知られている。

$$G_3|_{\mu_3} \approx -\frac{2q_e}{\pi\hbar} \sum_{\sigma} \gamma_{3\sigma} \text{Im} G_{\sigma\sigma}^R(\mu_3)$$

非平衡ラシュバ量子ドット干渉計のスピン流の有無は、遅延グリーン関数のスピン依存性の有無と一対一に対応しているので、 G_3 のディップ構造を観測することで、量子ドット系がスピン流を生

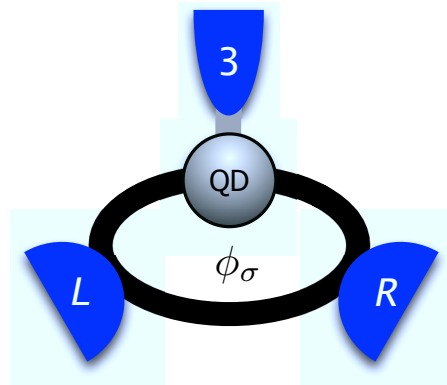


図2 第三端子法によるコンダクタンス測定概念図。 ϕ_σ は Rashba 電場により有効的にスピン依存磁束が現れることを示す。

成していることを電氣的に確認する (間接的) 手段となり得ることを示す。

【3】量子ホールプラトー転移の臨界指数とモジュラー不変性 (講演 [1])

量子ホール系のプラトー転移はトポロジカル量子転移の典型例であり、その転移の様子はヘテロ半導体やグラフェンにおいて活発に調べられている。局在長の発散を特徴づける臨界指数 ν と動的臨界指数 z に関して、実験による観測値は $1/(\nu z) \approx 0.42$ 程度であり、これは $z = 1$ を仮定すると $\nu \approx 2.38$ である。数値計算 (Chalker-Coddington 模型) による臨界指数評価の評価は、以前には $\nu \approx 2.3$ と報告されており、実験と良い一致を見せていたが、最近の注意深い再解析の結果は $\nu = 2.607 \pm 0.08$ であり、むしろ実験値と食い違いを見せる。

Landau 準位による不変性と磁束付加による不変性を仮定すると、コンダクタンスの2変数スケーリング関数にある種のモジュラー関係性が有ることを示すことが出来る。そこで、スケーリング関数が性質の良いモジュラー関数で書けると考えると、臨界指数の性質をかなり制限することが出来る。1つの候補は Lutken らによるもので、その値を今回、関数のモジュラー性から解析的に評価すると

$$\nu = \frac{3^2 2^9 \pi^4 \ln 2}{\Gamma(1/4)^8} \times \frac{1}{c} \approx \frac{10.42050633\dots}{c}$$

となった。中心電荷として $c = 4$ を仮定すると、この値は $\nu = 2.60512\dots$ であり、数値計算で得られている値と極めて近い値になる。ただし、このようなモジュラー不変性を用いた評価の是非、マルチフラクタル指数との関係、摂動論により得られる β 関数の漸近形との関連等、多くの点が今だ十分に理解されていない状態である。

研究業績

<論文>

1. N. Taniguchi, *Spin current manipulation through a Rashba dot by tunable nonequilibrium Fano-*

Kondo effect, J. Physics Conf. Series **400**, 04060 (2012).

2. N. Taniguchi and K. Isozaki, *Spin current generation as a nonequilibrium Kondo effect in a spin-orbit mesoscopic interferometer*, J. Phys. Soc. Jpan **81**, 124708 (2012).

3. 須能梓・谷口伸彦 (投稿準備中)

4. 谷口伸彦・須能梓 (投稿準備中)

< 学位論文 >

1. 修士論文：須能梓：修士（理学）「量子ドット干渉計におけるスピン流の非平衡生成：電子間相互作用の摂動論による解析」（筑波大学大学院数理物質研究科 2013 年 2 月）.

< 講演 >

1. K. Slevin, T. Ohtsuki and N. Taniguchi, “Critical exponent of the plateau transition in the integer quantum hall effect” (International conference on topological quantum phenomena, May 16-20, 2012, Nagoya).

2. 谷口伸彦, 「非平衡量子ドット系における計数場ワード恒等式」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 20 日, 横浜国立大学.

3. N. Taniguchi, *Nonmagnetic spin current generation as nonequilibrium Kondo effect in a spin-orbit nano interferometer*, March meeting, American Physical Society, 2013 年 3 月 22 日, Baltimore (USA).

4. 須能梓・谷口伸彦, 「量子ドット干渉計におけるスピン流の非平衡生成：摂動論による解析」日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学.

5. 谷口伸彦, 「ラシュバ量子ドット干渉計における非平衡スピン分極の三端子電氣的探査」日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学.

< 著書等 >

1. 新井正男・井上純一・鈴木秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 第二版 (上)」(2012 年 6 月、吉岡書店).

2. 新井正男・井上純一・鈴木秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 第二版 (下)」(2012 年 6 月、吉岡書店).

< 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：5名

委託院生：1名

卒研究生：0名

【1】ガラス転移とジャミング転移

(1) ジャミング転移の中の隠れた秩序 (尾澤, 黒岩, 池田, 宮崎) 論文 [1, 3] 講演 [1-3, 5-9, 15]

昨年度に引き続き、ガラス転移とジャミング転移を統一する枠組みを検証することにより、ガラス転移の平均場描像の定量的な検証を試みた。

Random First Order Transition theory (RFOT) と呼ばれるガラス転移の平均場理論描像が30年前から提唱されている。このシナリオはスピングラス理論にヒントを得て構築されたものであり、一定の説得力を持っていて、定性的な議論でしばしばガラス転移研究で登場する。しかし、その正当性を裏付けるための定量的な検証は驚くほど少なかった。我々は、RFOT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ことに着目し、剛体球系のジャミング転移を精査することにより、RFOTの数値的検証を行ってきた。剛体球液体では、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、 $1/\phi$ を自由エネルギーに見立てた多谷構造を持つと考えることができる。このランドスケープの多谷構造の谷底の値こそ、ジャミング転移点 ϕ_J に他ならない。この描像から予想されることは、熱平衡状態の剛体球液体の密度 ϕ_{eq} が動的転移点 ϕ_{mct} を超えると、それに対応する谷底の値である ϕ_J の値が上昇することである。我々は、この予想通り、2次元および3次元剛体球液体の ϕ_J が、 $\phi_{eq} = \phi_{mct}$ を境に、上昇することを確かめた。従来は、剛体球が力学的に安定であると同時に、最もランダムな配置が ϕ_J であり、その値は常に64%であると信じられてきたが、この値は64%より大きく成り得るのである。では、64%より高密度なランダムな配置とは何か? 最も素朴な予想は、64%を境に部分的な結晶化が始まり、結晶秩序がランダムな配置内に混入することである。我々は、この予想を検証するために、結晶化の程度を表現するために最もよく使われる配向秩序パラメータ Q_6 や Q_4 、 Ψ_6 などを数値的に計算した。その結果を右図に示す。矢印であらわした $\phi_{eq} \approx \phi_{mct}$ 付近で Q_6 や Q_4 が、シャープに変化していることがわかる。しかしこの変化は、部分的に結晶相が出現したと仮定して予想される変化に比べてはるかに小さく、この値を高密度側に外挿しても、最密充填密度における値にはならない。結局、我々が得た高密度のジャミング状態は、結晶秩序を持たないアモルファス状態にあると考えられる。同時に、 Ψ_6 の距離の相関関数を求めると、明らかに相関長が ϕ_{mct} を境に変化していることも観測された (右図下)。以上の結果は、動的転移点を境にし

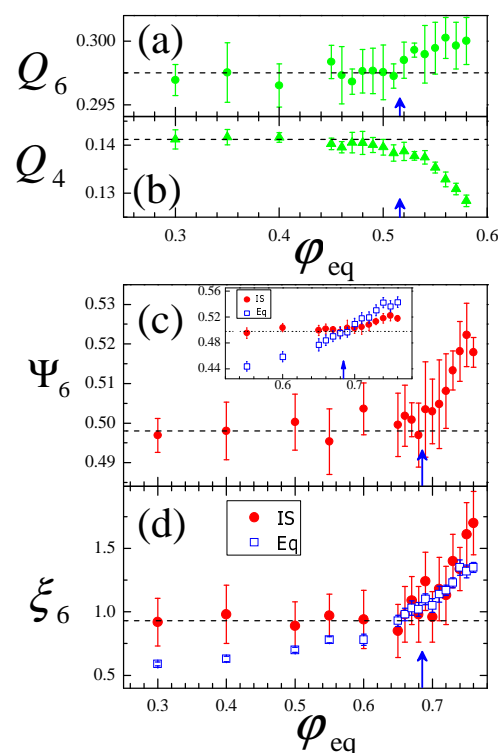


図 1: 2,3 次元剛体球系のジャミング状態における方向秩序変数 (Q_6 , Q_4 , Ψ_6) の、初期密度 ϕ_{eq} 依存性 (上 3 図) と、相関長 (下図)。

て、系の中に、「アモルファス中の秩序構造」が現れることを示唆している。しかし、その正体はいまだ分かっておらず、その説明は今後の課題である。

(2) 拘束系のブラウン運動 (黒岩, 宮崎) 講演 [12,13]

運動の自由度の拘束は、剛体の力学や、数珠つなぎになった高分子系、またゲージ固定された量子系など、自然科学のあらゆる分野でしばしば遭遇する。

我々は、いわゆるホロノミック拘束条件が課された系における確率過程の一般論を展開した。もともと、解析しやすいスピン系のモデルとしてしばしば議論される球形モデルのランジュバン方程式を定式化することを目的として始めたプロジェクトである。一般に拘束がある場合には、拘束による変数の通減を明示的に行い、その後で残った自由度に対してランジュバン方程式を構築することが普通である。たとえば、長さ l の棒を持つ振子の運動の揺らぎを記述したければ、変数として x と y を使うのではなく、拘束 $x^2 + y^2 = l^2$ という条件のもと、極座標の θ に対するランジュバン方程式を書きくればよい。しかし、自由度と拘束条件の数が多いと、むしろラグランジュ未定定数を導入した方が分かりやすい。しかし、未定定数は (ラグランジュ関数の作用のような) 決定論の極値問題では使えるが、揺らぎの世界では問題が生じる。主な困難の一つは、揺らぎも拘束条件を満たすことから、ランダム力が additive ではなく multiplicative となる点である。そのために、確率過程の揺らぎの解釈によって、ランジュバン方程式が変わってしまう。このことは、高分子の教科書で一部議論されてきた問題であるが、曖昧さが多くの混乱を招いていた。我々は、この議論を力学系の議論から焼き直し、高分子系やスピン系によらず、正準変数であれば常に成立する一般的な方程式を導出することに成功した。

【2】超ソフトなコロイド分散系の特異なダイナミクス

(1) クラスタガラス (菅江, 宮崎) 講演 [11]

粒子どうしが重なれるほど弱い斥力を持つ系、いわゆる ultra-soft 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。たとえば、粒子の相互配置の角度によらない等方的相互作用であるにも関わらず、カゴメ格子状の結晶相を示したり、高密度で結晶相が融解し液化するリエントラント現象などが知られている。この中で、我々は特に、高密度で結晶相の格子点に複数の粒子が入り込む、いわゆる超結晶あるいはクラスタ結晶と呼ばれる相に注目している。クラスタ結晶相が実在し得ることは、熱力学的議論によりわかっており、また数値計算によっても確認されている。我々が特に注目しているのは、基底状態としての結晶相ではなく、クラスタ結晶に対応する無秩序相、つまりクラスタガラス相である。ガラスは、粒子が他粒子と重なりあえないことが理由で渋滞現象を起こした状態であるから、粒子が硬い (相互作用が強い短距離斥力である) ことが前提であると考えられている。しかし、ultra-soft 相互作用系はその性質を持たないため、この系のガラス転移を調べることは、ガラス研究に新しい視点をもたらすことが期待されるのである。我々は、多分散性を持つ ultra-soft 相互作用系を分子動力学シミュレーションにより調べ、高密度低温において、右図に示すようなアモルファス状態を発見した。相関関数の緩和や粒子配置の相関などの解析により、この状態がガラス転移点の近傍にあることが期待され、今後の検証が課題となっている。

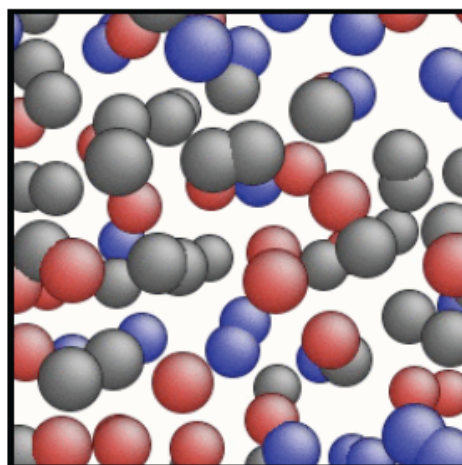


図 2: クラスタガラス (と思われる) 状態のスナップショット。粒子がダイマーのように凝縮している。

(2) レプリカ理論とモード結合理論 (池田, 宮崎) 講演 [10]

高密度における ultra-soft 相互作用系は、相互作用が多くの粒子を覆うほど長距離に及ぶため、長距離相互作用系とみなすこともできる。このため、この系は高密度極限において平均場模型になっている可能性が高い。ガラス転移における平均場理論は、熱力学的側面についてはレプリカ理論が、動力学的側面についてはモード結合理論が提案されている。熱力学と動力学は、熱平衡状態においては深く結びついている筈で、二つの理論は独立ではない。しかし、レプリカ理論とモード結合理論は全く異なる研究コミュニティから全く異なるアイデアを基にして発展した理論であり、その間に整合性がなく、矛盾があることが近年大きな問題になっていた。我々は、この矛盾を解決するヒントとして、液体系として理想的な極限である長距離相互作用系を考えることにより検証した。その結果、平均場極限でかつ熱力学的なスピノーダル線近傍では、二つの理論が一致することを見出した。スピノーダル線近傍でしか検証しない理由は、平均場近似だけでなく、液体論特有の高次の相互作用項に邪魔されずに、解析的に二つの理論の比較が可能であるからである。

(3) 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 [14]

柔らかい相互作用系のもう一つの特徴は、短距離で無限大に発散する斥力がないために、大きさが有限である点である。このため、ポテンシャル関数はフーリエ変換可能である。従って、 $T = 0$ の基底状態では、実空間の状態と波数空間の状態は、お互いに長さのスケールを反転した状態が等価となる「双対性」の性質が見られる。我々は昨年度に引き続き、この双対性が有限温度においてどれほど成立しているのか、あるいは動力学にその双対性の影響はどのように現れるのかを調べるために、適当な ultra-soft 相互作用系とそのフーリエ変換した系の相互作用系の、有限温度においてのシミュレーションを行った。その結果、片方の系の動径分布関数が、もう一方の系の波数の関数である静的構造因子に定性的に一致するような状態が、多く見つかった。しかし、この一致は全ての温度・密度で成立しているわけではなく、また一致するとしても、スケール因子や温度の換算に関しては、不定性が残り、単純な液体の積分方程式理論では説明できないこともわかった。

<論文>

1. Misaki Ozawa, Takeshi Kuroiwa, Atsushi Ikeda, and Kunimasa Miyazaki, "Jamming Transition and Inherent Structures of Hard Spheres and Disks", *Phys. Rev. Lett.* **109**, 205701 (5pp) (2012).
2. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "Ultra-soft potential system as a mean-field model of the glass transition", *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, Supplement A SA006 (9pp) (2012).
3. Misaki Ozawa, Takeshi Kuroiwa, Atsushi Ikeda, and Kunimasa Miyazaki, "Jamming and Glass Transitions viewed from the Mean Field Pictures", In *AIP Conf. Proc.*, Eds. Michio Tokuyama and Irwin Oppenheim, (AIP 2013) vol. **1518**, pp. 128-133

<講演>

1. 尾澤 岬, "ガラス転移 vs ジャミング転移: 平均場描像による統一的理解" (「つくばソフトマター研究会 2013」, 2013年3月11日, つくば).
2. 宮崎 州正, "ガラス転移研究の最近の発展と今後の課題" (「つくばソフトマター研究会 2013」, 2013年3月11日, つくば).

3. 宮崎 州正, "ガラス転移とジャミング転移の平均場描像" (物性研共同利用・CCMS・元素戦略合同研究会「計算物性物理学の新展開」, 2013年1月10日, 柏).
4. 宮崎 州正, "やわらかい粒子のガラス転移" (計算機センター特別研究プロジェクト『結晶成長の数理』第七回研究会 -ソフトマターと結晶成長-, 2012年12月25日, 学習院大学, invited).
5. K. Miyazaki, "Unifying concept of the glass and jamming transitions" (Workshop on the Open Problems of the Glass Transition and Related Topics, 2012年12月16日-20日, 福岡).
6. K. Miyazaki, "Jamming and Glass Transitions viewed from the Mean Field Pictures" (The 4th International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems, 2012年12月5日, 仙台, invited).
7. 宮崎 州正, "ガラス転移の平均場描像" (第61期金属ガラス部門・分子動力学部門合同委員会, 2012年9月7日, 大阪, invited).
8. 宮崎 州正, "ガラス転移とジャミング転移の統一的理解" (基研研究会 2012 非平衡系の物理 -その普遍的理解を目指して, 2012年8月1日-8月4日, 京都, invited).
9. K. Miyazaki, "Mean Field Picture of Glass (and Jamming) Transition" (WPI-AIMR Workshop, Structure and Dynamics of Glass -Bridging mathematics and material science-, 2012年6月27日-6月29日, 仙台, invited).
10. 池田晴國, 宮崎州正, "柔らかいポテンシャルの密度極限におけるガラス転移の MCT 及びレプリカ法による解析" (日本物理学会 2013 年春季年会, 26pXH-5, 2013年3月26日, 広島大学).
11. 菅江祥子, 宮崎州正, "Generalized Hertzian ポテンシャル液体のガラス転移" (日本物理学会 2013 年春季年会, 26pXH-8, 2013年3月26日, 広島大学).
12. 黒岩健, 宮崎州正, "拘束条件のもとでのブラウン運動と overdump 極限" (日本物理学会 2013 年春季年会, 29aXC-10, 2013年3月29日, 広島大学).
13. 黒岩健, 宮崎州正, "拘束条件のもとでの確率過程と p スピン球形模型への応用" (日本物理学会 2012 年秋季大会, 19aAC-3, 2012年9月19日, 横浜国立大学).
14. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正, "Ultrasoft ポテンシャル液体の特異な熱力学相と双対性" (日本物理学会 2012 年秋季大会, 20aAF-5, 2012年9月20日, 横浜国立大学).
15. 尾澤岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正, "剛体球液体の Inherent structure の構造とダイナミクス II" (日本物理学会 2012 年秋季大会, 21aAF-1, 2012年9月21日, 横浜国立大学).

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 (B) (平成 24 年度～平成 26 年度、研究代表者：宮崎州正)「ガラス転移とジャミング転移の平均場描像の確立」

<集中講義>

1. 宮崎州正, 京都大学基礎物理学研究所, 集中講義, 2012年11月21-22日

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 神谷 克政

研究員 Cristoph M. Puetter、洗平昌晃

大学院生 博士前期課程 6名、 博士後期課程 8名

2. 概要

半導体ナノ物性グループは本年度は、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・ナノテクノロジーの研究と宇宙生命連携の研究を行った。

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 SiC 熱酸化によって C-C ボンドが界面フロントに必ず形成されることを第一原理計算によって示した。本研究成果は、熱酸化によって形成された SiC/SiO₂界面の特性がなぜ悪いのかという長年にわたる問題を原子レベルから世界で初めて明らかにしたもので、パワーデバイス業界から大きな注目を集めている。

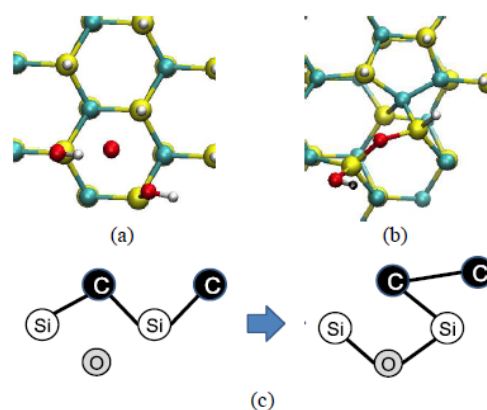


図 1: SiC の熱酸化の原子レベルの機構の模式図

【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。昨年度我々は、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世界に先駆けて明らかにした。本年度我々は、高性能の抵抗変化型メモリの設計指針を明らかにした。それは HfO₂ と電極の間に酸素空孔が形成されにくい Al₂O₃ 層を挿入することによって、抵抗変化型目盛の ON-OFF 比が飛躍的に向上することを示し、さらに Al₂O₃ 層の最適な厚さ等に関する設計も第一原理量子論によって行った。

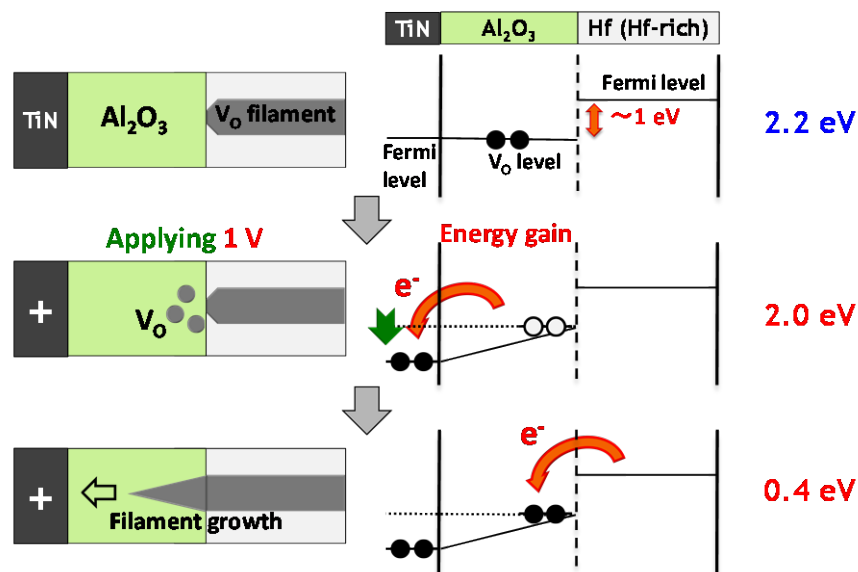


図 2 : 高性能の抵抗変化メモリ設計の指針

【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昨年度に引き続いて考察した。具体的には昨年度行った3つのアミノ酸以外のアミノ酸の円偏光二色性の計算を行った。その結果、昨年度検討した3種のアミノ酸と同様に、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可能性が高いことを明らかにした。

【4】 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。その結果、電子は多くの電子から構成される波束として運動し、さらに一つの波束に含まれる電子数には限界があることも示した。

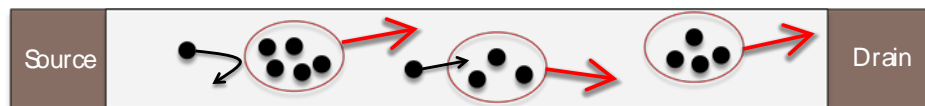


図 3 : 多電子波束による新しい伝導機構の模式図

<発表論文>

1. 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)
2. K. Kamiya, Y. Ebihara, M. Kasu, and K. Shiraishi, "Efficient Structure for Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes with High Emission Efficiency: A First-Principles Study of AlN/GaN Superlattice", *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, Art. No. 02BJ11 (2012).
3. 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).
4. Yasuhiro Ebihara, Kenta Chokawa, Shigenori Kato, Katsumasa Kamiya, Kenji Shiraishi, "Intrinsic origin of negative fixed charge in wet oxidation for silicon carbide", *Applied Physics Letters* **100**, 212110 (3 pages) (2012).
5. Takashi Yamauchi, Moon Young Yang, Katsumasa Kamiya, Kenji Shiraishi, Takashi Nakayama, "Theoretical study of Si-based ionic switch", *Applied Physics Letters* **100**, 203506 (4 pages) (2012).
6. 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*, DOI: 10.1002/qua.24074 (2012).
7. Katsumasa Kamiya, Yasuhiro Ebihara, Kenta Chokawa, Shigenori Kato, and Kenji Shiraishi, "Origins of Negative Fixed Charge in Wet Oxidation for SiC", *Materials Science Forum*, 740-742, 409-412 (2013).
8. Kenta Chokawa, Shigenori Kato, Katsumasa Kamiya, and Kenji Shiraishi, "A New-Type of Defect Generation at a 4H-SiC/SiO₂ interface by Oxidation Induced Compressive Strain", *Materials Science Forum*, 740-742, 469-472 (2013).
9. Shigenori Kato, Kenta Chokawa, Katsumasa Kamiya, and Kenji Shiraishi, "Theoretical Study of N incorporation Effect during SiC Oxidation", *Materials Science Forum*, 740-742, 455-458 (2013).
10. Taro Shiokawa, Genki Fujita, Yukihiro Takada, Satoru Konabe, Masakazu Muraguchi, Takahiro Yamamoto, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, "Dynamical Study of Multi-Electron Wave Packet in Nanoscale Structure", 52, 04CJ06 (2013).
11. Katsumasa Kamiya, Moon Young Yang, Takahiro Nagata, Seong-Geon Park, Blanka Magyari-Köpe, Toyohiro Chikyow, Keisaku Yamada, Masaaki Niwa, Yoshio Nishi, and Kenji Shiraishi, "Generalized Mechanism of the Resistance Switching in Binary-Oxide-Based Resistive Random-Access Memories", *Physical Review B*, 87, 155201 (5 pages) (2013).
12. Katsumasa Kamiya and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of Alkanes Adsorbed on Carbon Nanotubes", *Japanese Journal of Applied Physics*, 52, 04CN07 (3 pages) (2013).
13. Kenji Shiraishi, Keita Yamaguchi, Moon Young Yang, Seong-Geon Park, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Blanka Magyari-Köpe, Masaaki Niwa, and Yoshio Nishi, "Computational Study toward Micro Electronics Engineering", *Proceedings of 2012 28th International Conference on*

<学術講演>

1. 長川健太、加藤重徳、真栄力、神谷克政、白石賢二、酸化による C-C 欠陥の形成と SiC MOSFET の性能劣化の理論的考察、第 21 回 SiC 研究会講演会、2012 年 11 月、大阪市中央公会堂、大阪府.
2. 長川健太、加藤重徳、真栄力、神谷克政、白石賢二、SiC 酸化による Si-Si 結合欠陥の形成と結晶多形による違いの考察、第 21 回 SiC 研究会講演会、2012 年 11 月、大阪市中央公会堂、大阪府.
3. 神谷克政、長川健太、個別討論会「SiC-MOS デバイス研究開発に関する最新動向と技術課題」、第 21 回 SiC 研究会講演会、2012 年 11 月 19～20 日、大阪市中央公会堂、大阪府。(パネル討論)
4. 長川 健太, 加藤 重徳, 真栄 力, 神谷 克政, 白石 賢二、酸化により引き起こされる SiC の本質的欠陥 第 18 回 ゲートスタック研究会 -材料・プロセス・評価の物理- 2013 年 1 月 25～26 日、ニューウェルシティー湯河原、静岡県
5. 真栄 力, 長川 健太, 神谷 克政, 白石 賢二、第一原理計算を用いた結晶多形の異なる薄膜 SiC における歪みによる電子構造変化の考察、第 21 回 SiC 研究会講演会、2012 年 11 月、大阪市中央公会堂、大阪府.
6. 真栄 力, 長川 健太, 神谷 克政, 白石 賢二、第一原理計算を用いた結晶多形の異なる薄膜 SiC における歪みによる電子構造変化の考察と MOSFET の最適面方位の提言、第 18 回 ゲートスタック研究会 -材料・プロセス・評価の物理-2013 年 1 月 25～26 日、ニューウェルシティー湯河原、静岡県
7. C. Shinnei, K. Chokawa, K. Kamiya and K. Shiraishi, Effect of Strain to the Electronics Structures of SiC Thin Film with Various Poly Types and Suggestion of Suitable MOSFET Direction, Workshop and IEEE EDS Mini-colloquium on Nanometer CMOS Technology (WIMNACT) 37 2013 年 2 月 18 日、東京工業大学、東京都
8. <招待講演> 白石賢二, 長川健太, 海老原康裕、加藤重徳、真栄力、神谷克政、第一原理計算に基づく SiC-MOSFET の設計指針、第 21 回 SiC 研究会講演会、2012 年 11 月、大阪市中央公会堂、大阪府.
9. <招待講演> Kenji Shiraishi, Katsumas Kamiya, Yasuhiro Ebihara, Kenta Chokawa, and Shigenori Kato, Atomistic investigation of SiC/SiO₂ interfaces for the SiC-MOSFET power devices, The Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), Orlando, Florida, USA, 12 月 11 日～14 日
10. <招待講演> K. Shiraishi, K. Chokawa, S. Kato, C. Shinnei, and K. Kamiya, Guiding Principles toward SiC-MOSFET for Future Power Device Applications, Workshop and IEEE EDS Mini-colloquium on Nanometer CMOS Technology (WIMNACT) 37 2013 年 2 月 18 日、東京工業大学、東京都
11. <招待講演> K. Shiraishi, T. Shiokawa, G. Fujita, Y. Takada, M. Muraguchi, T. Yamamoto, T. Endoh, Y. Hatsugai, “Theoretical study of multi-electron wave packet dynamics in semiconductor nano-structures”, 2nd International Conference on Small Sciences,

- Orland, Florida, Dec. 16-19, 2012.
12. 高田幸宏、塩川太郎、尹永扱、小鍋哲、初貝安弘、白石賢二、山本貴博、「古典-量子クロスオーバー系における電子波束ダイナミクス」、第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学、松山市、2012 年 9 月 14 日
 13. 塩川太郎、藤田弦暉、高田幸宏、小鍋哲、村口正和、山本貴博、遠藤哲郎、初貝安弘、白石賢二、「一次元非一様ポテンシャル中の波束ダイナミクス」、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012 年 9 月 18 日～21 日
 14. 藤田弦暉、塩川太郎、高田幸宏、小鍋哲、村口正和、山本貴博、遠藤哲郎、初貝安弘、白石賢二、「ナノ構造中の多電子波束ダイナミクスにおける電子間相互作用の効果」、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012 年 9 月 18 日～21 日
 15. 塩川太郎、藤田弦暉、高田幸宏、小鍋哲、村口正和、山本貴博、遠藤哲郎、初貝安弘、白石賢二、
「多電子波束を用いた円電流ダイナミクスへの電子間相互作用の効果」、日本物理学会 2013 年年会、広島大学、2012 年 3 月 26 日～29 日
 16. 藤田弦暉、塩川太郎、高田幸宏、小鍋哲、村口正和、山本貴博、遠藤哲郎、初貝安弘、白石賢二、「スピン自由度を考慮した多電子波束ダイナミクスにおける電子間相互作用の効果」、日本物理学会 2013 年年会、広島大学、2013 年 3 月 26 日～29 日
 17. Yukihiro Takada, Taro Shiokawa, Young Taek Yoon, Satoru Konabe, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi Takahiro Yamamoto, “Multi-Electron Wave Packet Dynamics for Electron Transport in Classical-Quantum Crossover Regions”, IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), September 23-28, 2012, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
 18. Taro Shiokawa, Genki Fujita, Yukihiro Takada, Satoru Konabe, Masakazu Muraguchi, Takahiro Yamamoto, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai Kenji Shiraishi, “Multi-Electron Wave Packet Dynamics with Long-range Coulomb Interaction”, 2012 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2012), Kohala Coast, Hawaii, USA, December 2-7th, 2012 .
 19. C. M. Puetter, S. Konabe, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, “Semi-classical Klein tunneling with Berry curvature effects in graphene”, 2012 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2012), Kohala Coast, Hawaii, USA, December 2-7th, 2012.
 20. Takefumi Kamioka, Hiroya Imai, Yoshinari Kamakura, Kenji Ohmori, Kenji Shiraishi, Masanori Niwa, Keisaku Yamada, Takanobu Watanabe, ” Current fluctuation in sub-nano second regime in gate-all-around nanowire channels studied with ensemble Monte Carlo/molecular dynamics simulation”, IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, USA, Dec. 11, 2012.
 21. Katsumasa Kamiya, Moon Young Yang, Blanka Magyari-Köpe, Masaaki Niwa, Yoshio Nishi, and Kenji Shiraishi, ”Physics in Designing Desirable ReRAM Stack Structure -Atomistic Recipes Based on Oxygen Chemical Potential Control and Charge Injection/Removal”, IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, USA, Dec. 11, 2012.
 22. Taro Shiokawa, Yukihiro Takada, Young Taek Yoon, Satoru Konabe, Masakazu Muraguchi, Mitsuhiro Arikawa, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, “Applied

- Electric Field Dependence of Multi-electron Wave Packet Dynamics”, The Eighth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Tsukuba, Japan, May 8–11, 2012.
23. Taro Shiokawa, Yukihiro Takada, Satoru Konabe, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, “The Effect of Coulomb Interaction in Multi-Electron Wave Packet Dynamics”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29–August 3, 2012.
 24. Yukihiro Takada, Young Taek Yoon, Taro Shiokawa, Satoru Konabe, Mitsuhiro Arikawa, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, “Effectiveness of Time-Dependent Hartree-Fock Approaches for Multi-Electron Wave Packet Dynamics in Nanoscale Structures”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29–August 3, 2012.
 25. Christoph M. Puetter, Satoru Konabe, Kenji Shiraishi, “Wavepacket dynamics in grapheme”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29–August 3, 2012.
 26. Taro Shiokawa, Genki Fujita, Yukihiro Takada, Satoru Konabe, Masakazu Muraguchi, Takahiro Yamamoto, Tetsuo Endoh, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, “Effect of Coulomb Interaction in Electron Wave Packet Dynamics in Nanoscale Devices”, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, Kyoto, Japan, September 25–27, 2012.
 27. <招待講演> Kenji Shiraishi, Moon Young Yang, Katsumasa Kamiya, Blanka Magyari-Köpe, Masaaki Niwa, and Yoshio Nishi, “First Principles Guiding Principles for the Switching Process in Oxide ReRAM”, 2012 IEEE 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Oct. 29–Nov. 1 2012, Paradise Resort Hotel, Xian, China.
 28. <招待講演> Kenji Shiraishi, Moon Young Yang, Katsumasa Kamiya, Hiroyoshi Momida, Blanka Magyari-Köpe, Takahisa Ohno, Masaaki Niwa, and Yoshio Nishi, “On-Off Switching Mechanism of Oxide Based ReRAM by Ab Initio Electronic Structure Calculations”, 2nd International Workshop on Resistive RAM, October 8–9, 2012, Stanford University, Stanford, USA.
 29. <基調講演> Kenji Shiraishi, Keita Yamaguchi, Moon Young Yang, Seong-Geon Park, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Blanka Magyari-Köpe, Masaaki Niwa, and Yoshio Nishi, “Computational Study toward Micro Electronics Engineering”, 2012 28th International Conference on Microelectronics, May 13–16 2012, University of Nis, Nis, Serbia.
 30. <招待講演> Katsumasa Kamiya, “First-Principles Studies on Proton Transfer Mechanisms in Cytochrome c Oxidase”, 2012 International Conference on Small Science, December 2012, Wald Disney World Swan and Dolphin, Orlando FL, USA.
 31. <招待講演> Blanka Magyari-Köpe, Katsumasa Kamiya, Kenji Shiraishi, and Yoshio Nishi, “Atomic-size Effects of the Conductive Filaments Formation and Rupture in Resistance Change Based Memory Devices”, 2012 International Conference on Small Science, December

2012, Wald Disney World Swan and Dolphin, Orlando FL, USA.

32. <招待講演> Katsumasa Kamiya, "On-off Switching Mechanism of Oxide Based ReRAM by First Principle Calculation", NCCA VS Thin Film Users Group, November 2012, SEMI Global Headquarters, San Jose, USA.

4. 受賞

1. 長川健太：若手奨励賞（服部賞）、第 18 回ゲートスタック研究会（材料・プロセス・評価の物理），2013 年 1 月 26 日，口頭発表 東レ総合研修センター，静岡県。
2. ヤンムンヨン：Best Poster Paper Award, Workshop and IEEE EDS Mini-colloquium on Nanometer CMOS Technology (WIMNACT) 37 2013 年 2 月 18 日、東京工業大学、東京都
3. ヤンムンヨン：優秀発表賞，2012 年度韓国物理学会（秋学術論文発表会），2012 年 10 月

5. 学位論文

博士論文

1. 田中潤一：エッチングプロセスにおける気相および表面反応の研究
2. 鈴木輝夫：ナノスケール Si 半導体デバイスのコンポーネントレベル ESD に関する研究

修士論文

1. 吉崎智浩：4H-SiC 中の点欠陥の理論的検討
2. 近藤大生：Q/N に富んだペプチドがつくるアミロイド線維の構造安定化機構の計算科学的解析
3. 田口真彦：Theoretical study on the absorption spectrum of light-harvesting antenna in photosynthesis based on time-dependent density functional theory and its application for the detection of biomarker in extrasolar planets

VII-6 ナノ構造物性グループ

1. メンバー

准教授	岡田晋
研究員	小鍋哲、富田陽子
学生	大学院生 2名、学類生 3名

2. 概要

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

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

3. 研究成果

【1】カーボンナノチューブにおける多重励起子生成機構の解明

本論文では、単層カーボンナノチューブにおいて、多重励起子生成(一つの光子から複数個の励起子が生成されるプロセス)の微視的機構を調べた。多重励起子生成については、10数年にわたりゼロ次元物質である量子ドットの分野で注目され、現象の理論的解明が試みられてきたが、これまで未解決である。これは、理論と実験との比較が困難なことや、理論モデリングが複雑なことが原因である。本研究は、カーボンナノチューブに注目する事で、量子ドットにおける理論解析の困難を克服し、多重励起子生成の微視的機構を明らかにした(図1)。

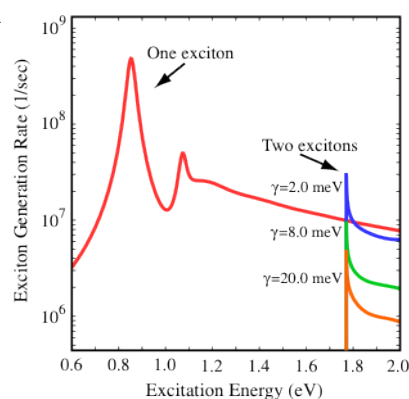


図1

【2】カーボンナノチューブにおける励起子-キャリア散乱抑制機構の解明

本論文では、キャリアドープした半導体カーボンナノチューブにおいて、励起子の位相緩和ダイナミクスを調べるため、励起子-キャリア弾性散乱率を計算した。その結果、低次元性に伴う多体効果により、励起子-キャリア散乱が強く抑制されることがわかった(図2)。一般に、ドープした半導体では、この散乱は主要な励起子位相緩和プロセスであり、光吸収スペクトルの形状を決める。しかし、本研究により、従来の半導体光物性の常識が相互作用効果の強いナノスケール物質では全く成り立たないことが明らかになった。

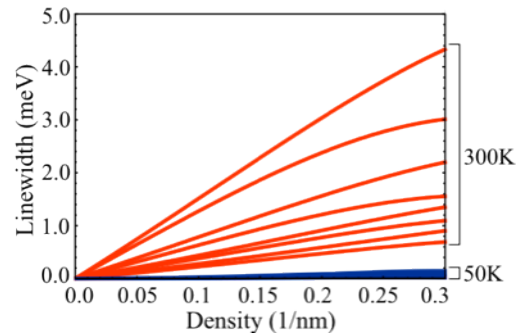


図2

【3】カーボンナノチューブにおける光電流の見積もり

本論文では、単層カーボンナノチューブにおいて、多重励起子生成機構による電流生成を理論的に調べた。カーボンナノチューブでは、多重励起子生成が高效率に起こることが知られているが、それがどの程度電流生成に寄与するかは明らかではなかった。本研究により、多重励起子生成に起因し電流生成も高效率に生じることがわかった(図3)。

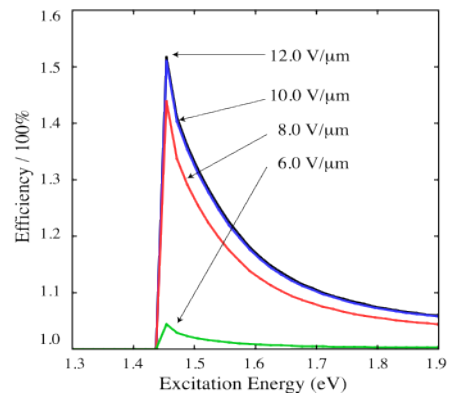


図3

【4】有限長カーボンナノチューブにおける特異な電界遮蔽効果

CNTは半導体デバイスとしての応用が期待されている。デバイス中においてはCNTは本質的に種々の異種物質との複合構造を形成している。そのなかで、電界はデバイスの機能制御において最も重要な広義異種物質である。ここでは、CNTを用いた電界効果トランジスタにおいて考えられる電界効果として、ソースドレイン電極間に架橋されたCNTの電界下における基礎物性を密度汎関数理論に基づく第一原理計算と有効媒質遮蔽モデルを用いて明らかにした。その結果、CNTのキャップ、終端水素に起因するC-C結合の結合交代が外部電界に対する遮蔽において非常に重要な影響を及ぼす事が明らかになった。すなわち、結合長の短い2重結合にかかわる炭素原子において電界遮蔽が強くおこり、結合長の比較的長い単結合領域において電界遮蔽が弱い事が明らかになった。さらに、ジグザグ端を有する有限長ナノチューブにおいては、其の端近傍において異常な電界遮蔽、すなわ

ち電界に対する過剰な遮蔽現象が生じる事が明らかになった。この事は、仮に電極からオーミックにキャリアが注入されたとしても、CNTのジグザグ端近傍においてキャリアが多重散乱を受ける事を示しており、デバイス設計において電極とのコンタクト形状の制御が非常に重要である事を明らかにしたものである。

【5】小さいフラーレンからなる新奇ナノカーボン物質

本研究では、炭素原子数が28個からなるC₂₈フラーレンに着目し、C₂₈フラーレン多面体からなる3次元ネットワーク構造の安定性と電子構造を密度汎関数論に基づく第一原理計算から明らかにした。その結果、C₂₈多面体から形成されるダイヤモンド構造を有する新奇炭素同素体の可能性が明らかになった。また、複数個の準安定構造が存在すること、それら全てが1eV程度の狭いバンドギャップを有する半導体であることが明らかになった。また、それらの準安定相は圧力誘起相転移において構造転移が可能であり、圧力によるバンドギャップエンジニアリングの可能性のある新しい炭素固体相である事を示した。

【6】2層グラフェンの電界による電子物性制御

2層グラフェンは面鉛直方向の電界下において有限のバンドギャップを形成する事が知られている。ここでは、外部電力を必要としない、有限ギャップを有する半導体化された2層グラフェン実現の方法を第一原理計算から理論的に予言した。すなわち、2層グラフェンを上面、下面をそれぞれ正のイオン性液体と負のイオン性液体とでサンドイッチすることにより、イオン性液体間の電気的なポテンシャル差を用いる事により2層グラフェンに有限のバンドギャップを誘起する事が可能となる。また、正、負のイオン性液体のイオン種の組み合わせにより、真性半導体、p型半導体、n型半導体と半導体のキャリアタイプの制御が可能である事を明らかにした。

4. 教育

集中講義:

名古屋大学 理学研究科物質理学専攻(化学系) 化学特別講義 7

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞 (賞の名称、受賞者名、タイトル、年月日)

1. 日本物理学会若手奨励賞、小鍋哲、カーボンナノチューブにおける励起子多体効果の理論、2012年3月
2. MNC25 Young Author's Award, 小鍋哲、Multiple exciton generation in graphene nano-ribbon, 2012年11月

外部資金 (名称、氏名、代表・分担の別、採択年度、金額、課題名)

1. 戦略的創造研究推進事業CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」(科学技術振興機構)(2009年度~2014年度)「計算科学によるグラファイト系材料の基礎物性解明とそのデバイス応用における設計指針の開発」(総額:82,100千円)

6. 研究業績

(1) 研究論文

1. Satoru Konabe and Susumu Okada: "Multiple Exciton Generation by A Single Photon in Single-Walled Carbon Nanotubes" *Physical Review Letters*, **108**, 227401 (2012).
2. Takuma Shiga, Satoru Konabe, Junichiro Shiomi, Takahiro Yamamoto, Shigeo Maruyama, and Susumu Okada: "Graphene-Diamond Hybrid Structure as Spin-Polarized Conducting Wire with Thermally-Efficient Heat Sinks" *Applied Physics Letters*, **100**, 233101 (2012).
3. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada: "Electronic Structure Modulation of Graphene by Metal Electrodes" *Japanese Journal of Applied Physics*, **51**, 085102 (2012).
4. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada: "Electronic Properties of Carbon Nanotubes under an Electric Field" *Applied Physics Express*, **5**, 095101 (2012).
5. Donghui Guo, Takahiro Kondo, Takahiro Machida, Keigo Iwatake, Susumu Okada, and Junji Nakamura: "Landau levels under zero magnetic field on potassium intercalated graphite" *Nature Communications*, **3**, 1068 (2012).
6. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada: "Modulation of Electron-states of Graphite Thin Films by the Nearly Free Electron States of Metal Surfaces" *Japanese Journal of Applied Physics*, **51**, 100203 (2012).
7. Satoru Konabe and Susumu Okada: "Robustness and Fragility of Linear Dispersion Band of Bilayer Graphene under an Electric Field" *Journal of the Physical Society of Japan*, **81**, 113702 (2012).
8. Mina Maruyama and Susumu Okada: "Elemental semiconductors of fused small fullerenes: Electronic and geometric structures of C28 polymers" *Journal of the Physical Society of Japan*, **81**, 114719 (2012).
9. Satoru Konabe, Kazunari Matsuda, and Susumu Okada: "Suppression of Exciton-Electron Scattering in Doped Single-Walled Carbon Nanotubes" *Physical Review Letters*, **109**, 187403 (2012).
10. Soon-Kil Jung, Toshiya Okazaki, Susumu Okada, and Sumio Iijima: "Modest Response of Metallic Single-Walled Carbon Nano-tubes to C60 Encapsulation Studied by Resonance Raman Spectroscopy" *Journal of Physical Chemistry C* **116**, 23844–23850 (2012).
11. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada: "Electron-state engineering of bilayer graphene by ionic molecules" *Applied Physics Letters*, **101**, 233106 (2012).
12. Masafumi Kubota, Shigenori Hayashi, Mototsugu Ogura, Yuichiro Sasaki, Susumu Okada, and Kikuo Yamabe: "Effects of Plasma Irradiation in Arsenic Plasma Doping Using Overhang Test Structures" *Japanese Journal of Applied Physics*, **52**, 021301 (2013).
13. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada: "Absence of Edge State near the 120 deg Corner of Zigzag Graphene Nanoaribbons" *Physical Review B* **87**, 045424 (2013).
14. Rieko Moriya, Kazuhiro Yanagi, Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada: "Charge Manipulation in Molecules Encapsulated Inside Single-Wall Carbon Nanotubes" *Physical Review Letters* **110**, 086801 (2013).

(2) 招待講演

岡田晋: "グラファイト複合構造体の物性" ニューダイヤモンドフォーラム 平成24年度第1回研究会「ナノカーボンの最新研究」東京大学(東京)2012年6月15日

(3) 新聞発表

1. 日刊工業新聞、 “ナノチューブ太陽電池：シリコン上回る計算 “、2012年5月30日
2. 日刊工業新聞、 “グラフェンの半導体化：シミュレーションで解明 “、2012年12月3日

VII-7. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：久保敏弘

研究員：Christoph Peutter

大学院生：博士前期課程1名

【1】半導体中のスピンの量子物性と量子情報処理への適用

(1) 量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットのコヒーレント操作 (論文[5]、国際会議[3, 7]、国内会議シンポジウム講演[7])

半導体量子ドットに閉じ込められた少数電子系は、高い制御性を持ち、電子スピンのコヒーレンスが比較的長い為、量子ビットとしての利用の可能性が検討されている。特にマイクロ波等によるコヒーレント制御に関して、近年大きな進展があった。通常電子スピン共鳴では振動磁場を用いてスピンの検出、制御が行われるが、集積化された単一電子スピンの選択的制御には困難が伴う。そこで我々が最近提案したのは振動電場を用いる「電気双極子スピン共鳴」である。通常スピンは電場と相互作用しないが、電気双極子とスピンの間に結合をもたらすと振動電場で電子スピンのコヒーレント操作が可能となる。今年度はこの量子ドット中の電子スピンのコヒーレント操作で課題となる、動的核スピン偏極のメカニズムに関して報告した。また現在まで2量子ドットのスピンの初期化は実現しているが、3量子ドット以上での初期化の可能性に関して理論的に検討した。特に3量子ドットでは、スピン選択則による初期化以外にコヒーレントポピュレーショントラッピングによるスピン無依存の初期化が起こる事を指摘した。

(2) 半導体におけるスピン・軌道相互作用とグラフェンにおける電子・フォノン相互作用 (論文[3, 6, 8]、国際会議[2, 4, 5, 8])

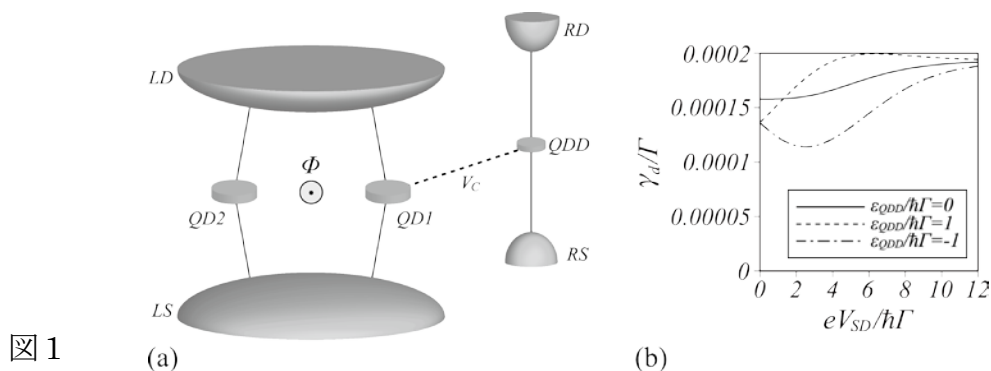
固体中での電子スピンの制御、伝導に関して検討を続けている。InGaAsを用いた微細構造である、量子ポイントコンタクトの伝導特性において、通常観測されるコンダクタンスの $2e^2/h$ を単位とする量子化に加えて、零磁場でその半分の値のコンダクタンス構造を観測した。また同時に電流ノイズを測定し、理論的モデルと合わせて検討する事により、スピン・軌道相互作用に起因する自発的スピン偏極のメカニズムを提案した。またInAs量子ドットにおけるスピン・軌道相互作用およびLandé g-因子が外部電極により制御可能である事を実証し、コヒーレントなスピン操作に適用可能である事を報告した。また新奇な材料であるグラフェンの基礎的な特性についても検討を加えた。特に電子・フォノン・光子の相互作用が絡み合ったラマン特性について解析を加え、グラフェン特有のバンド構造であるDiracコーンの寄与を詳しく取り入れると実験結果を適切に説明できる事を示した。

【2】環境が量子系にもたらすデコヒーレンスと量子統計

(1) 量子ドット電荷計による位相緩和の起源 (論文[1]、国際会議[1])

近年の半導体微細加工技術・低温技術の進展に伴って、量子力学における測定の反作用と言う概念がメゾスコピック系において議論されるようになってきた。我々は図1(a)に示すようなAharonov-Bohm(AB)干渉計の両方の経路に1つずつ量子ドット(QD)が埋め込まれた系を考え、QDが量

量子ドット電荷計(QDD)と静電的に結合することで誘起される位相緩和を議論し、その起源を理論的に明らかにした。非平衡2次摂動理論の範囲における我々の解析によれば、位相緩和の原因はQDDにおける電荷ゆらぎであることが明らかになった。一方、量子ポイントコンタクトの電荷計の場合には、位相緩和の起源は電流ゆらぎである。これらの起源の違いが、位相緩和率(γ_d)のバイアス電圧(V_{SD})依存性に現れることも示した。量子ポイントコンタクト電荷計では、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加する。一方、QDDでは、印加されたバイアス電圧が小さい領域においては、バイアス電圧とともに位相緩和率は単調に増加するだけではなく、減少することもある(図1(b)) Γ は量子ドット電荷計(あるいはQDD)と電極の結合の強さ)。QDDに対する上記のようなバイアス電圧依存性は、(1)QDDのエネルギー準位の位置、(2)QDDと電極との結合強度の対称性、(3)バイアス電圧の印加の仕方に依存することを示し、QDDにおける電荷ゆらぎの挙動から理解することが出来ることを示した。



(2) 部分的位相緩和と電圧端子を持つ系の熱電特性 (論文[9]、国際会議[6])

量子輸送の議論には電子の位相緩和過程を注意深く解析する事が必要である。今年度は環境が系のコヒーレンスに対して部分的位相緩和をもたらす条件について検討を加えた。モデルとしては、局在準位がトンネル結合した系を考え、位相緩和する系の部分空間が系と環境との結合ハミルトニアンとどのような関係に有るかを明らかにした。特に磁束による永続的電流状態は環境からの影響に非常に脆弱である事を示した。一方位相緩和を制御された形で系に導入する事は、その特性を理解する上で重要である。我々は二端子素子に電圧端子を弱く結合させたデバイスにおける、量子伝導特性について検討を加えた。量子コヒーレンスの特徴付ける AB 振動の振幅や、Onsager 相反定理に代表される統計力学的関係について電圧端子の効果を調べた。

<論文>

(査読論文)

1. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, "Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector", arXiv:1210.3089 [cond-mat]. (Submitted to Phys. Rev.)
2. Hiroyuki Shibata, Tatsushi Akazaki, Yasuhiro Tokura, "Fabrication of MgB2 nanowire single-photon detector with meander structure", APEX 6, 023101 (2013).
3. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, "The origin of Raman D Band: Bonding and Antibonding Orbitals in Graphene", Crystals 3, 120 (2013).
4. Hiroyuki Shibata, Tatsushi Akazaki and Yasuhiro Tokura, "Ultrathin MgB2 films fabricated by

- molecular beam epitaxy and rapid annealing”, *Supercond. Sci. Technol.* 26 035005 (2013).
5. Toshiaki Obata, Michel Pioro-Ladriere, Yasuhiro Tokura and Seigo Tarucha, “The photon- assisted dynamic nuclear polarization effect in a double quantum dot”, *New J. Phys.* 14, 123013 (2012).
 6. Ken-ichi Sasaki, Keiko Kato, Yasuhiro Tokura, Satoru Suzuki, and Tetsuomi Sogawa, “Dirac Cone Migration –Decay and Frequency Shift of Inter and Intravalley Phonons in Graphene–”, *Phys. Rev. B (RC)* 86, 201403 (2012).
 7. Nobuyuki Matsuda, Hanna Le Jeannic, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, William John Munro, Kaoru Shimizu, Koji Yamada, Yasuhiro Tokura, Hiroki Takesue, “A monolithically integrated polarization entangled photon pair source on a silicon chip”, *Scientific Reports*, 2 817 (2012).
 8. Makoto Kohda, Shuji Nakamura, Yoshitaka Nishihara, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Junichiro Ohe, Yasuhiro Tokura, Taiki Mineno and Junsaku Nitta, “Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures”, *Nature Communications* 3, 1082, doi:10.1038/ncomms2080 (2012).
 9. Amnon Aharony, Shmuel Gurvitz, Yasuhiro Tokura, Ora Entin-Wohlman, and Sushanta Dattagupta, “Partial decoherence in mesoscopic system”, *Physica Scripta T151*, 014018 (2012).

(解説論文)

1. Yasuhiro Tokura, “Phonon Cavity Quantum Electrodynamics and Phonon Microlaser”, *PSJ Online: News and Comments* [January 18, 2013].

<講演：国際会議>

1. T. Kubo and Y. Tokura, “Backaction Dephasing Induced by a Quantum Dot Detector”, March Meeting of the American Physical Society, Baltimore, Maryland, USA, 2013. 3. 18.
2. K. Sasaki, Y. Tokura, S. Suzuki, and T. Sogawa, “Understanding of the 2D Raman Band with Shifted Dirac Cones”, APS March Meeting, Baltimore, USA, 18–22 March (2013) G7–12.
3. <招待講演> Yasuhiro Tokura and Toshihiro Kubo, “Initialization of quantum spins under non-equilibrium bias condition”, 3rd Japan-Israel Binational Workshop on Quantum Phenomena, Okinawa, Japan, 11–14, March (2013) .
4. Yasuhiro Tokura and Shun Takahashi, “Anisotropy of the Spin-Orbit interaction in an InAs Quantum Dot”, the sixth International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, (AMN6), Auckland, New Zealand, 11–15 February (2013).
5. Kenichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, “Mechanism of the doping dependence of Raman 2D band –Dirac-cone migration–”, the International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2012” (nanoPHYS’ 12), International House of Japan, Tokyo, Japan, 2012 Dec.17–19.
6. T. Kubo and Y. Tokura, “Thermoelectric transport in partially coherent three-terminals”, International Workshop on Quantum Noise and Measurement in Engineered Electronic Systems (QNM12) Dresden, Germany, 8 – 12 October (2012).
7. <招待講演>A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Electrically tunable spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), ETH Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd (2012) 7.5.
8. M. Kohda, S. Nakamura, Y. Nishihara, K. Kobayashi, T. Ono, J. Ohe, Y. Tokura, and J. Nitta,

“Electronic Stern-Gerlach experiments by Rashba spin orbit interaction”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), ETH Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd (2012) 66. 2.

9. Hanna Le Jeannic, Nobuyuki Matsuda, Hiroki Takesue, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, Toshifumi Watanabe, Koji Yamada, Sei-ichi Itabashi, and Yasuhiro Tokura, “Monolithically- integrated polarization-entangled photon pair source on a silicon-on-insulator photonic circuit”, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2012, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA, May 6-11 (2012) QF2F. 2.

〈講演：国内会議〉

1. 久保敏弘、都倉康弘「量子ドット電荷計を含む環境との結合による位相緩和と位相対称性」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 20.
2. 松田信幸、Hanna Le Jeannic, 福田浩、土屋泰、山田浩治、都倉康弘、武居弘樹「集積型偏光もつれ光子対源」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 19.
3. 佐々木健一、加藤景子、都倉康弘、鈴木哲、寒川哲臣「グラフェンにおけるラマンスペクトルと電子スペクトルのドーピング依存性」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 19.
4. 都倉康弘、A. Aharony, S. Gurvitz, O. Entin-Wohlman, S. Dattagupta, 「環境と結合した量子ドット系の部分的位相緩和」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 20.
5. 都倉康弘, “Decoherence by noisy environment”, General meeting of FIRST QIP Project/Quantum Cybernetics, Tokyo, Dec. 15, 2012.
6. 久保敏弘、都倉康弘, “Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector & Phase Symmetry”, General meeting of FIRST QIP Project/Quantum Cybernetics, Tokyo, Dec. 15, 2012.
7. 〈シンポジウム招待講演〉都倉康弘「2重量子ドットにおける核スピン偏極」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 26.
8. 松田信幸、倉持栄一、武居弘樹、清水薫、都倉康弘、納富雅也「フォトニック結晶結合共振器における強束縛モード分散の観測」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 28.
9. 佐々木健一、都倉康弘、寒川哲臣「グラフェンのトポロジカル欠陥におけるラマン D バンドの励起メカニズム」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.
10. 久保敏弘、都倉康弘「量子ドット電荷計による位相緩和」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.
11. 天羽真一、都倉康弘、黒澤元、久保敏弘、近藤裕佑、樽茶清悟、河野公俊、大野圭司「スピントロニクス中の電流閉塞状態の遷移と電流の 2 値的振る舞い」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 28.
12. 都倉康弘、久保敏弘「多重量子ドットスピンの初期化の可能性」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.

〈社会還元等〉

1. 都倉康弘「半導体を用いた量子情報処理」FIRST 夏期研修会 2012. 8. 14 ホテルブリーズベイマリーナ 宮古島、沖縄

〈外部資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究(研究領域提案型)課題番号: 21102003 「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究」平成24年度: 5,330千円(直接経費: 4,100千円、間接経費: 1,230千円)(平成21年度～平成25年度、研究代表者: 都倉康弘)
2. 内閣府 最先端研究開発プログラム「量子情報処理」(中心研究者: 山本喜久)「スピン量子コンピュータの理論研究」平成24年度: 16,034千円(直接経費: 14,710千円、間接経費: 1,324千円)(平成21年度～平成25年度、研究担当者: 都倉康弘)

〈その他〉

セミナー: 久保敏弘「メゾスコピック系における量子コヒーレンスの制御」超伝導エレクトロニクスグループセミナー 産業技術総合研究所、茨城 2013. 1. 18.

VIII 生命物理グループ

教授 白石賢二

助教 庄司光男

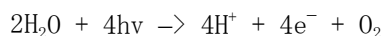
大学院生 4名 (数理物質科学研究科後期過程2名、前期課程2名)

卒研究生 2名

生命物理グループでは生体内で重要な働きをしている蛋白質、核酸等に注目し、その特異的機能を理論的に解明することを目的としている。平成24年度では、光合成酸素発生中心(PSII-OEC)、トレオニン合成酵素(TS)、DNA トポイソメラーゼについて、高精度計算手法(QM/MM)により、その特異的反応機構を生み出す分子メカニズムの解明を行った。また、異常型プリオン蛋白質の立体構造評価研究においては、全原子分子動力学法(MD)により構成アミノ酸特有の特徴(ケミカルトレンド)を明らかにした。これらの研究には膨大な計算を高速に実行する必要がある為、並列効率を向上させてスーパーコンピュータ(T2K-Tsukuba等)を活用した。さらなる高速化と次世代計算機環境への展開として、GPUによるQM計算の高速化について取り組んだ。宇宙生命分野においてはL型アミノ酸生成過程と系外惑星のバイオマーカーについての理論的研究を行った。

【1】 光合成酸素発生中心(PSII-OEC)の電子状態についての理論的研究(庄司光男)

光合成は光エネルギーを化学エネルギーに変換するシステムであり、個々の現象は秒スケールの現象であるが、分子進化や多様性まで考慮すれば、極めて大きな時間的空間的スケールに及ぶ極めて複雑かつ生命にとって極めて重要なシステムの1つである。光合成は蛋白質複合体の集合体で構成されており、各複合体は光捕集、電子伝達、ATP生成と糖生成(酸素固定反応)の働きを担っている。電子伝達系では重要な化学反応として光合成システムIIにおける酸素発生中心(PSII-OEC)をもち、水の分解反応を行っている。



この反応では電子を水から引き抜いているが、本反応は極めて難しい化学反応である。実際、すべての人工触媒においてPSII-OECよりも高い触媒効率と耐性を持つものは未だ存在していない。2011年に沈教授(岡大)、神谷教授(大阪市大)により原子分解能(1.9Å)のX線構造解析がなされ、初めて活性中心構造とその周りの水分子の位置が明らかになった。活性中心はCaMn4O5クラスターが歪んだ椅子型構造を取っていた。しかしながらその構造は以前に報告されていた構造と大きく異なっていたため、多くのグループによりその構造妥当性が検討された。

我々はOECの構造妥当性を検証するため、量子古典混合法(QM/MM)法を用いて、精密に理論的検討を行った。特にプロトン位置はX線では決定できないが、プロトン化によってOECの電子状態や構造が大きく変化するため、すべての可能な電荷・スピン・プロトン化状態を求め、PSII-OECの構造特性について明らかにした。

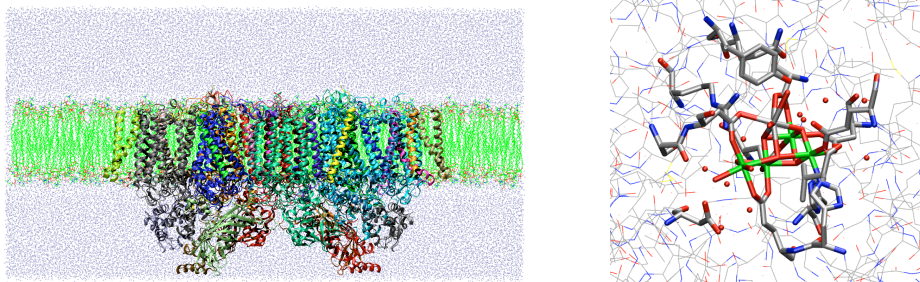


図1. 光合成システム II(左図)と水分解サイト(右図)

【2】トレオニン合成酵素の特異的反応機構の理論的説明 (庄司光男)

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

そこで、反応特異性に関わる反応過程に対して高精度理論解析(QM/MM計算)を行った。プロトン化状態と活性中心における水の存在を調べ、可能な反応経路を網羅的に探索を行った。その結果、自由エネルギーが実験値と 3kcal 以内の誤差で一致し、中間体の UV スペクトル形状も完全に実験と一致した。これにより、反応制御因子を明らかにするとともに各中間体の構造特性も初めて明らかにした。

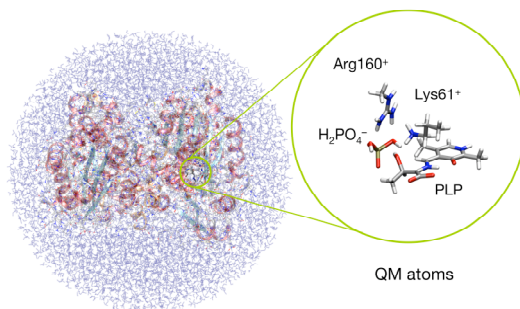


図2. トレオニン合成酵素の QM/MM モデル: (左)全系, (右)QM 領域

【3】DNA トポイソメラーゼ II における DNA 再結合反応の理論的説明 (花岡恭平)

DNA トポイソメラーゼ II (topoII) は DNA の切断と再結合を行う事で、非常に長い DNA の構造的ストレスを緩和している。この反応では、DNA と酵素の共有結合中間体が生成し、細胞にとって危険な状態が一時的に生じる。通常この中間体は再結合反応によって速やかに解消されるが、いくつかの重要な抗生物質や抗がん剤は再結合反応を阻害することで共有結合中間体を蓄積させ、癌細胞や細菌を死滅させる。したがって DNA トポイソメラーゼの再結合過程の解明は新たな抗がん剤や抗生物質をデザインする上でも非常に重要である。

本研究では量子古典混合法(QM/MM)により topoII の DNA 再結合反応機構を解明する事を試みた。

反応は DNA 3'0 の脱プロトン化から始まり、このプロトンは切断された DNA の間を移動し、さらに周囲の水、アルギニン残基を経由して、DNA から解離したタイロシン残基に移るといふ多段階プロトン移動経路(substrate-mediated proton transfer: SMPR)を持つ事を明らかにした。経路するアミノ酸残基はアルギニンだけであるが、これはアルギニンの変異により再結合反応が阻害され細胞が死滅するという実験と一致している。そのため、本結果は上記のプロトン移動経路を阻害することで新しい抗がん剤や抗生物質がデザインできることを示唆する。

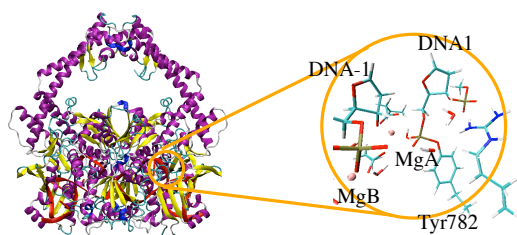


図3. DNA-topoII の全体構造と活性中心構造

【4】系外惑星における生命指標検出に向けた理論的検討 (田口真彦)

近年、太陽系外惑星の数は大きく追加されており、ハビタブルゾーン内に入る惑星の観測にも成功し、地球に類似した惑星の発見が期待されている。それに伴い、惑星のスペクトルから生命の痕跡(バイオマーカー)をいかに検出するかについても非常に注目がなされている。バイオマーカーには様々な指標が提案されているが、その中でも red edge がある。これは、植物の反射スペクトル由来し、700-750nm 付近の近赤外領域に見られる特徴的な急勾配である。この勾配の由来は様々なスケールでの要因が関わっているが、主要な要因としては光合成色素の1つであるクロロフィルの吸収スペクトルである。

系外惑星における生命指標の可変性を明らかにするためには、地球における red edge 相当のスペクトルの環境依存性を明らかにすることが極めて重要と考えられる。特にクロロフィルの吸収スペクトルがタンパク質環境やアミノ酸配位子によりどの程度可変性があるのかについて高精度計算法(QM/MM法)により理論的に評価した。その結果、タンパク質環境は約+9nm シフトさせており、アミノ酸の配位により約+13nm シフトさせている事を明らかにした。これらの結果をもとに、系外惑星における植物の光吸収について考察をおこなった。

【5】異常型プリオン蛋白質の立体構造予測 (近藤大生)

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。これらは哺乳類ではアルツハイマー病やパーキンソン病のような神経疾患を引き起こすことが知られて

いる（ポリグルタミン、ポリアスパラギン、酵母プリオン Sup35 等）。これらのタンパク質の立体構造は未だに決定されていない。しかし、X線回折や末端残基の微結晶構造から、 β -helix モデルと in-register モデルの2つの主要な構造モデルが提案されている。また、プリオン蛋白質はグルタミン(Q)やアスパラギン(N)を組成として多く持つ事が分かっている。そこで、グルタミン組成を仮定し、 β -helix と in-register モデルを構築し、全原子分子動力学計算(MD)法を用いて、1 μ s-MD を行う事で自由エネルギーを算出し、正確な構造安定化機構を明らかにすることを試みた。

β -helix モデルは一巻き 20 個のアミノ酸を有し、ピッチが約 4.7 Å のヘリックス構造をしており、ヘリックス内部に水が存在した。一方、in-register モデルは、2つの β シートが合い向かい合い、非常に密にかみ合うことでシート間の水を排除していた。共に安定な構造であり、自由エネルギー差は数 kcal のオーダーとなった。 β -helix モデルではグルタミン側鎖は親水的な役割をしており、in-register モデルでは疎水的役割で構造安定化に寄与している事を明らかにした。

【6】GPGPUによる計算加速（梅田宏明）

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ィ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おり、CPU単体の演算性能向上は見込めない段階に達し、超並列やヘテロ並列計算による高速化が必須となる時代になってきている。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)計算であり、その中でも二電子積分ルーチンが最も重い。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OpenFMOにおける二電子積分ルーチンをGPU対応させることを試みた。その結果、GPU利用により最大CPU1Coreに対して最大22倍の演算加速性能を得られるようになった。本研究はCCS研究員の梅田宏明さんが主に研究を進め、朴泰介先生、埴敏博先生、庄司の協同研究体制でなされた。

<論文>

- 1a. [M. Shoji](#), K. Hanaoka, D. Kondo, A. Sato, H. Umeda, K. Kamiya, K. Shiraishi, A QM/MM study of nitric oxide reductase-catalyzed N₂O formation, *Molecular Physics*, accepted 2013.
- 2a. K. Yamaguchi, [M. Shoji](#), H. Isobe, Y. Kitagawa, S. Yamada, T. Kawakami, S. Yamanaka, M. Okumura, Theory of chemical bonds in metalloenzymes XVI. Oxygen activation by high-valent transition metal ions in native and artificial systems, *Polyhedron*, In Press.
- 3a. [M. Shoji](#), H. Isobe, S. Yamanaka, Y. Umena, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen and K. Yamaguchi, Theoretical insight in to hydrogen-bonding networks and proton wire for

- the CaMn_4O_5 cluster of photosystem II. Elongation of Mn-Mn distances with hydrogen bonds, Catal. Sci. Technol., 3, 1831(2013)
- 4a. K. Yamaguchi, Y. Kitagawa, H. Isobe, M. Shoji, S. Yamanaka, M. Okumura, Theory of chemical bonds in metalloenzymes XVIII. Importance of mixed-valence configurations for Mn_5O_5 , CaMn_4O_5 and $\text{Ca}_2\text{Mn}_3\text{O}_5$ clusters revealed by UB3LYP computations. A bio-inspired strategy for artificial photosynthesis, Polyhedron, 57, 138(2013).
- 5a. K. Yamaguchi, S. Yamanaka, H. Isobe, T. Saito, K. Kanda, Y. Umena, K. Kawakami, J.-R. Shen, N. Kamiya, M. Okumura, H. Nakamura, M. Shoji and Y. Yoshioka, The nature of chemical bonds of the CaMn_4O_5 cluster in oxygen evolving complex of photosystem II: Jahn-Teller distortion and its suppression by Ca doping in cubane structures, Int. J. Quantum Chem., 113, 453(2013).
- 6a. 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 $\text{CaMn}_4\text{O}_4\text{X}(\text{H}_2\text{O})_4$ (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., 113, 525 (2012).
- 7a. 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 CaMn_4O_5 cluster of PSII refined to 1.9 Å X-ray resolution, Int. J. Quantum Chem., 112, 253(2012).
- 8a. H. Isobe, M. Shoji, S. Yamanaka, Y. Umena, K. Kawakami, N. Kamiya, J.-R. Shen and K. Yamaguchi, Theoretical illumination of water-inserted structures of the CaMn_4O_5 cluster in the S2 and S3 states of oxygen-evolving complex of photosystem II: full geometry optimizations by B3LYP hybrid density functional Dalton Trans., 41, 13727(2012).

<学位論文>

- 1b. 近藤大生、Q/N に富んだペプチドがつくるアミロイド線維の構造安定化機構の計算科学的解析、修士論文。
- 2b. 田口真彦、Theoretical study on the absorption spectrum of light-harvesting antenna in photosynthesis based on time-dependent density functional theory and its application for the detection of biomarker in extrasolar planets、修士論文。

<卒研発表>

- 1c. 氏家謙、分子動力学法によるトレオニンシンターゼの基質結合自由エネルギー計算
- 2c. 田中弥、高度好熱菌ウリジンシチジンキナーゼ (ttCK) の特異的基質認識機構の理論的解明

<講演>

- 1d. ○庄司光男、花岡恭平、氏家謙、田中弥、栢沼愛、梅田宏明、町田康博、村川武志、林秀

- 行、トレオニン合成酵素におけるリン酸脱離以降の反応経路についての理論的検証、日本農芸化学会、東北大学、2013/03/26、口頭。
- 2d. ○田口真彦、小松勇、佐藤皓允、蘇垠成、庄司光男、栢沼愛、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、光化学系 II アンテナ部の光捕集機構についての量子化学的研究、第 93 回日本化学会春季年会、立命館大学、2013/3/22、3G3-06(口頭)。
- 3d. ○栢沼愛、花岡恭平、近藤大生、田口真彦、庄司光男、ニトリルヒドラターゼの触媒機構に関する理論的研究、第 93 回日本化学会春季年会、立命館大学、2013/3/22、ポスター。
- 4d. ○庄司光男、磯部寛、山中秀介、山口兆、沈建仁、QM/MM 法による光合成酸素発生中心の S2 中間体の電子状態についての理論的研究、第 93 回日本化学会春季年会、立命館大学、2013/3/22、1PA-098(ポスター)。
- 5d. ○田口真彦、小松勇、佐藤皓允、蘇垠成、庄司光男、栢沼愛、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、生命指標となりうる光合成の光吸収スペクトル帰属についての理論的研究、2013 年日本天文学会春季年会、埼玉大学、2013/3/20、P53b(ポスター)。
- 6d. ○小松勇、梅村雅之、庄司光男、矢花一浩、白石賢二、神谷克政、栢沼愛、田口真彦、佐藤皓允、蘇垠成、系外惑星バイオマーカー検出を目指した光合成機構のエネルギー移動計算、2013 年日本天文学会春季年会、埼玉大学、2013/3/20、P74a(口頭)。
- 7d. ○M. Shoji, H. Isobe, S. Yamanaoka, N. Kamiya, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, A QM/MM study on the S2 spin state of the oxygen-evolving complex, 第 5 回 OCARINA シンポジウム、大阪市立大学、2013/3/5、oral(invited)。
- 8d. ○M. Shoji, K. Hanaoka, D. Kondo, H. Umeda, K. Kamiya, K. Shiraishi, A QM/MM study of nitric oxide reductase-catalyzed N2O formation, Sanibel Symposium, Florida, 2013/2/17-22, poster.
- 9d. ○田口真彦、小松勇、佐藤皓允、蘇垠成、庄司光男、栢沼愛、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、時間依存密度汎関数法に基づく光合成アンテナ部の吸収スペクトルの研究とそれをういた系外惑星における生命指標検出に向けての検討、Supercomputer workshop 2013、分子科学研究所 2013/1/22-23。
- 10d. ○花岡恭平、庄司光男、近藤大生、田口真彦、神谷克政、白石賢二、QM/MM 法を用いた II 型 DNA トポイソメラーゼによる DNA 再結合反応の解明、Supercomputer workshop 2013、分子科学研究所、2013/1/22-23。
- 11d. ○近藤大生、花岡恭平、田口真彦、神谷克政、庄司光男、河合繁子、田口英樹、白石賢二、Gln や Asn を多く含むミスフォールドしたタンパク質の構造安定化機構に関する理論的研究、Supercomputer workshop 2013、分子科学研究所、2013/1/22-23。
- 12d. ○庄司光男、花岡恭平、近藤大生、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 N2O 生成機構についての理論的研究、Supercomputer workshop 2013、分子科学研究所、2013/1/22-23。
- 13d. ○田口真彦、小松勇、佐藤皓允、蘇垠成、庄司光男、栢沼愛、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、光合成光捕集複合体 II における光励起状態についての理論的研究、第 85 回日本生化学会大会@福岡国際会議場、2012/12/16、ポスター。
- 14d. ○花岡恭平、庄司光男、近藤大生、田口真彦、栢沼愛、神谷克政、白石賢二、アゴニスト結合型ビタミン D 受容体の溶液中のダイナミクスと活性制御機構、第 85 回日本生化学会大会@福岡国際会議場、2012/12/16、ポスター。

- 15d. ○近藤大生, 花岡恭平, 田口真彦, 神谷克政, 庄司光男, 河合(野間)繁子, 田口英樹, 白石賢二、Q/Nに富んだペプチドがつくるアミロイド線維の構造安定化機構の理論的解析、第85回日本生化学会大会@福岡国際会議場、2012/12/16, ポスター。
- 16d. ○庄司光男, 花岡恭平, 近藤大生, 田口真彦, 栢沼愛, 梅田宏明, 鴨志田良和, 神谷克政, 白石賢二, 村川武志, 林秀行, トレオニン合成酵素におけるリン酸脱離以降の反応機構についての理論的説明、第85回日本生化学会大会@福岡国際会議場、2012/12/16, ポスター。
- 17d. ○花岡恭平, 庄司光男, 近藤大生, 田口真彦, 栢沼愛, 神谷克政, 白石賢二, アゴニスト結合型ビタミンD受容体のマイナーコンフォメーション、第35回日本分子生物学会年会@福岡国際会議場、2012/12/11, ポスター。
- 18d. ○田口真彦, 小松勇, 佐藤皓允, 蘇垠成, 庄司光男, 栢沼愛, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二、光合成光化学系IIにおけるアンテナ部の光捕集機構についての理論的研究、第35回日本分子生物学会年会@福岡国際会議場、2012/12/11, ポスター。
- 19d. ○庄司光男, 花岡恭平, 近藤大生, 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N2O生成機構についての理論的研究、第3回協定講座シンポジウム@神戸大学統合研究拠点、2012/11/29, ポスター。
- 20d. ○花岡恭平, 庄司光男, 近藤大生, ヤンムンヨン, 神谷克政, 白石賢二, QM/MM法によるII型DNAトポイソメラーゼのDNA再結合反応の解明、第3回協定講座シンポジウム@神戸大学統合研究拠点、2012/11/29, ポスター。
- 21d. ○近藤大生, 花岡恭平, 田口真彦, 神谷克政, 庄司光男, 河合繁子, 田口英樹, 白石賢二、Q/Nに富んだペプチドがつくるアミロイド線維の構造安定化機構の計算科学的解析、第3回協定講座シンポジウム@神戸大学統合研究拠点、2012/11/29, ポスター。
- 22d. ○田口真彦, 小松勇, 佐藤皓允, 蘇垠成, 庄司光男, 栢沼愛, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二, 光合成アンテナ部の光捕集機構についての理論的研究とそれをを用いた系外惑星における生命指標検出に向けての検討、第3回協定講座シンポジウム@神戸大学統合研究拠点、2012/11/29, ポスター。
- 23d. ○田口真彦, 小松勇, 佐藤皓允, 蘇垠成, 庄司光男, 栢沼愛, 神谷克政, 梅村雅之, 矢花一浩, 白石賢二, 系外惑星における生命指標としての光合成色素についての理論的研究、第5回アストロバイオロジーワークショップ、2012/11/23, 24, 口頭。
- 24d. ○小松勇, 梅村雅之, 庄司光男, 矢花一浩, 白石賢二, 神谷克政, 栢沼愛, 田口真彦, 佐藤皓允, 蘇垠成, 系外惑星のバイオマーカー検出に向けた光合成アンテナ機構の励起状態計算、第5回アストロバイオロジーワークショップ、2012/11/23, 24, 口頭。
- 25d. ○Mitsuo Shoji, Hiroshi Isobe, Shusuke Yamanaka, Kizashi Yamaguchi, Jian-Ren Shen, Ground spin state of the oxygen-evolving complex at the S2 state, Structure and Dynamics of Photosynthetic Systems, Okayama, 2012/10/22, poster.
- 26d. ○Kyohei Hanaoka, Mitsuo Shoji, Daiki Kondo, Akimasa Sato, Moon Young Yang, Katsumasa Kamiya, and Kenji Shiraishi, QM/MM simulation revealed a substrate mediated proton relay mechanism in DNA religation reaction catalyzed by Type II DNA topoisomerase, CCP2012, Kobe, 2012/10/13, poster.
- 27d. ○M. Shoji, K. Hanaoka, D. Kondo, H. Umeda, M. Kayanuma, K. Kamiya, K. Shiraishi, S. Nakano, K. Katayanagi, QM/MM法による同化型亜硝酸還元酵素の反応機構についての理論的研究、第50回日本生物物理学会年会、名大、2012/9/22。

- 28d. ○花岡恭平・近藤大生・庄司光男・梁文榮・神谷克政・白石賢二 II 型 DNA トポイソメラーゼによる DNA 再結合反応に対する基質を介するプロトンリレー機構、第 6 回バイオ関連化学合同シンポジウム、北大、2012/9/6, ポスター。
- 29d. ○花岡恭平、近藤大生、庄司光男、梁文榮、神谷克政、白石賢二、酵母 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、第 12 回日本蛋白質科学会年会、名古屋国際会議場、2012/6/20, ポスター。
- 30d. ○庄司光男、花岡恭平、近藤大生、梁文榮、梅田宏明、神谷克政、白石賢二、一酸化窒素還元酵素(NOR)における N2O 生成酵素についての理論的研究、第 12 回日本蛋白質科学会年会、名古屋国際会議場、2012/6/20, ポスター。
- 31d. ○Mitsuo Shoji, Kyohei Hanaoka, Daiki Kondo, Hiroaki Umeda, Katsumasa Kamiya, Yasutaka Kitagawa, Kenji Shiraishi, QM/MM study on the catalytic mechanism of nitric oxide reductase, 2012 International Congress of Quantum Chemistry (ICQC2012), June 25 - 30, 2012, Boulder, Colorado, poster.
- 32d. ○佐藤皓允、庄司光男、神谷克政、梅村雅之、矢花一浩、白石賢二、Theoretical Investigation of a Mechanism of Chirality Induction for Amino Acids in the Early Solar System, 日本地球惑星科学連合大会, 2012/5/24, 口頭。

<その他(発表等)>

- 1f. 庄司光男、花岡恭平、第 2 回つくば科学研究コンテスト、審査員、2013/3/20。
- 2f. 花岡恭平、Q/N に富んだペプチドがつくるアミロイド線維の安定化機構の理論的解析、つくばソフトマター研究会 2013, 2013/3/11。
- 3f. 田口真彦、光合成アンテナ部の吸収スペクトルの理論的研究とそれを用いた系外惑星における生命指標検出に向けての検討、つくばソフトマター研究会 2013, 2013/3/11。
- 4f. 庄司光男、生体酵素反応の理論的解明、つくばソフトマター研究会 2013, 2013/3/11。
- 5f. Mitsuo Shoji, Computational Bioscience with Supercomputers、阪大タンパク研、セミナー、2013/3/7(招待)。
- 6f. 庄司光男、将来展望ワークショップ@大阪大学、2012/10/20。
- 7f. 庄司光男、CCS 見学会(富山県立富山南高等学校) 2012/10/17。
- 8f. 佐藤皓允、第 7 回夏の学校 宇宙ライフサイエンス若手の会、2012/8/25, ポスター発表。
- 9f. 庄司光男、トレオニン合成酵素における反応制御機構の理論的解明、第 4 回拠点シンポジウム@秋葉原、2012/7/12。
- 10f. Mitsuo Shoji, Computational Bioscience Utilizing Supercomputers: Performance and Applications, INe8 での CCS-Tsukuba の紹介、CCS-Tsukuba, 2012/5/11。

<外部資金>

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

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, 主に遷移金属化合物を対象とした機能性物質系 (二次電池, 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」, 「バナジウムポリアニオン系」, 並びに「コバルト酸化物系」の研究状況を簡潔に整理する. 2012年度, 本グループが対象とした物質群を図1に示す.

【1】バナジウム酸化物系

(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, 二次電池, 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. 二次電池放電試料は, 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.

2010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. 本研究室で発明された次世代二次電池正極材料 $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ 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 $C \approx 170 \text{ A h kg}^{-1}$ およびエネルギー密度 $P \approx 670 \text{ W h kg}^{-1}$ 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, $C \approx 260 \text{ A h kg}^{-1}$ および $P \approx 10^3 \text{ W h kg}^{-1}$ 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 $Li_xV_2(PO_4)_3$ およびその関連型, 並びにタボライト型 $LiVPO_4F$ 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.

二次電池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, 本系の相関金属状態およびCuイオン振動に関する微視的解析を行った.

a) ポリアニオン系

- $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ($x < 9$)

特開2012-146630に記載された $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ 系の多電子反応は, $V_3P_8O_{29}$ 当り3モル以上のLi脱離挿入あるいは数%の酸素欠損導入に基づいている. これは, $Li_9V_3^{3+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2 \Leftrightarrow Li_6V_3^{4+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2 \Leftrightarrow Li_3V_3^{5+}(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ 間のLi脱離挿入に対応する. X線四軸回折の手法により, $7.5 < x < 9$ の単相組成領域におけ

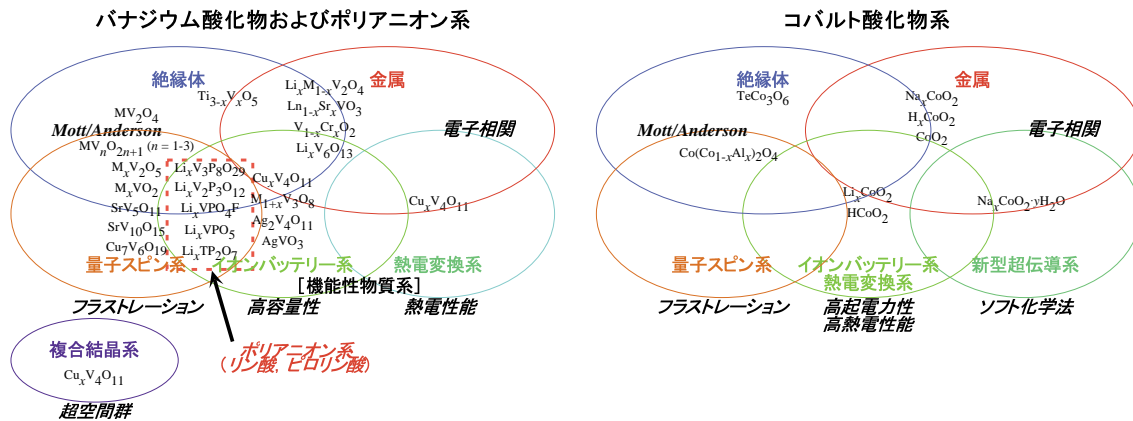


図 1: 2012 年度, 本グループが研究対象としたバナジウム酸化物およびポリアニオン系, 並びにコバルト酸化物系の物質群.

る精密構造を決定するとともに, Li の拡散径路を評価した. さらに V イオンの結晶場が中間的結晶場にあることを示し, V 原子のイオン性と充放電電位の関係を明らかにした (学会発表 2, 6; 特開 1; 継続)

- $\text{Li}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ ($x > 9$)
 前記 $\text{Li}_6\text{V}_3^{4+}(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2 \Leftrightarrow \text{Li}_3\text{V}_3^{5+}(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ の過程に関しては, エネルギー変換効率および充放電特性等に問題がある. これらを克服するには, 電位は減少するものの, V^{2+} イオンを含む組成の活物質を創製することが重要である. 従来の固相反応法あるいはフラックス法による活物質合成では, $\text{Li}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ 系の最大 Li 濃度は $\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 当り 9 モルに限られたが, 今回, Li 濃度が 9 モルを超える系をソフト化学法により合成することに成功した. X 線四軸回折の手法により, その精密構造を決定するとともに, その組成領域で極めて再現性のよい充放電特性が得られることがわかった (学位論文 2; 特願 5; 継続)
- $\text{Li}_{9-x}\text{Ag}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ ($0 < x \leq 1$)
 充放電特性 (理想的 Li 濃度領域 = $\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 当り 9 ~ 3 モル) を改良することを目的として, $\text{Li}_{9-x}\text{Ag}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ 系等を創製した. $\text{Li}_{9-x}\text{Ag}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ - Li 負極の場合, Ag イオンの一部が不可逆的に脱離した後, $\text{Li}_{9-x}\text{Ag}_{x-\delta}\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2 + \delta\text{Ag} \Leftrightarrow \text{Li}_{9-x-y}\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2 + y\text{Li} + \delta\text{Ag}$ の反応を示した (学会発表 6; 特願 4)
- $\text{Ag}_x\text{VP}_2\text{O}_7$ ($0.7 < x \leq 1$)
 Li イオン二次電池あるいは全固体型二次電池への応用を念頭に, $\text{Ag}_x\text{VP}_2\text{O}_7$ 系を開発した. $\text{Ag}_x\text{VP}_2\text{O}_7$ - Li 負極の場合, $\text{Ag}_x\text{VP}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{Ag}_{x-\delta}\text{VP}_2\text{O}_7 + y\text{Li} + \delta\text{Ag} \Leftrightarrow \text{Ag}_{x-\delta}\text{Li}_y\text{VP}_2\text{O}_7 + \delta\text{Ag}$ の化学反応が実現した (特願 3)
- タボライト型 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ ($0 \leq x \leq 2$)
 $x = 1$ の組成は, 格子定数と磁性から, 次の A 型と B 型に分類される. A 型は 11 K で低次元スピン系特有の帯磁率極大を持ち, 9.8 K で反強磁性転移を示す. スピン格子緩和率は, 3d スピンからの寄与が支配的である. B 型の帯磁率極大温度は A 型より低い. $x = 1$ を除く $0 \leq x \leq 2$ 組成がソフト化学法により合成され, それらの評価が行

われるとともに、充放電特性との関係が検討された（学位論文 1；学会発表 4；継続）

- ナシコンおよびナシコン関連型 $\text{Li}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ($0 < x \leq 3$)
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（論文 1；学会発表 3；継続）

b) 複合結晶系

- $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$
 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系は、その結晶構造および物性の特異性に基づいて、2006 年に多機能性複合結晶として発表された当研究室オリジナルの物質系で、リチウムイオン二次電池正極活物質であり熱電変換材料である。今年度、本系の相関効果を微視的見地から解明した。さらに Orbach 過程に基づくスピンドYNAMIKS の解析から、Cu イオンの振動状態を評価したところ、Cu の高速イオン振動が明らかにされた。このことから、新しい機能性として全固体型電池用正極材料への応用が期待される（論文 2；特願 2；継続）
- $(\text{Cu}_{1-z}\text{M}_z)_x\text{V}_4\text{O}_{11}$
 $x = 2.2$, $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Ag}$ 単結晶および多結晶に関する物性解析（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

- $\text{Li}_x\text{Zn}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$
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（保留）
- $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$
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 $\text{Na}_{0.7}\text{VO}_2$ のスピン $\frac{1}{2}$ -3 量体転移機構に関する NMR .
 (保留)

c) タボライト型 Li_xVOPO_4

- Li_xVOPO_4
 スピンギャップ転移の機構解明 (論文印刷中 ; 学会発表 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、特に二次電池の観点から精力的に研究されている。一方で、本系には、組成変化による金属-絶縁体転移現象や量子スピン効果等の問題がある。また類似の構造を持つ $\text{Na}_{0.3}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$ における超伝導の発見は、 Na_xCoO_2 も含めた本系の基礎研究を活発化させている。

(1) 機能性物質系

- Li_xCoO_2
 これまでに $0.5 < x \leq 1$ と $x = 0$ の構造・物性研究を行ってきた。今回 $0 < x < 0.5$ における種々の組成をソフト化学的に合成することに成功し、評価を行っている (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。本成果に基づく二次電池性能向上の検討 (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 (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、二次電池等の観点から 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)

〈 論 文 〉

1. Masashige Onoda and Hajime Hirose, Crystal structures and 3d electron configurations for the $\text{Li}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ insertion electrode system with a semi-double-electron reaction
Journal of the Physical Society of Japan **81**, 094801 (9pp) (2012).
2. Masashige Onoda, Masaki Kohno, and Kazuto Sekine, Correlated metallic states with intermediately oscillated Cu chains in the multifunctional composite crystal system $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$
Journal of the Physical Society of Japan **82**, 014802 (8pp) (2013).
3. 小野田雅重, 平成 23 年度知的財産活用プロジェクト: 次世代二次電池正極材料の開発
平成 23 年度 ILC センター紀要, pp. 209–212 (2012).

〈 学位論文 〉

1. 石橋剛彦, タボライト型二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ 系の磁性と NMR
数理解析科学研究科修士 (理学) 論文, 2013 年 3 月
本研究の対象物質 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ 系はポリアニオン系正極材料に属し, 擬一次元的スピンネットワークを持つ. 本系の結晶構造と基礎物性の解明を目的として, 試料合成, X 線回折, 電気化学, 帯磁率, 並びに ^7Li -NMR 測定を行った: 1) $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ ($x = 1$) は, 格子定数と磁性から, A 型と B 型に分類された. A 型は 11 K で低次元スピン系特有の帯磁率極大を持ち, 9.8 K で反強磁性転移を示した. スピン格子緩和率は, 3d スピンからの寄与が支配的であった. 2) B 型の帯磁率極大温度は A 型より低く, 反強磁性相互作用が抑制されていた. 3) $0 \leq x \leq 2$ 組成はソフト化学処理により合成され, $0 \leq x \leq 0.7$ は LiVPO_4F , $\text{Li}_{0.67}\text{VPO}_4\text{F}$, VPO_4F , 並びに新型相の混相であった. VPO_4F が主相の組成と $x = 0.67$ が主相の組成で強磁性的相互作用が見られた. 4) $1 < x \leq 2$ は $x = 1$ および 2 の混相であった.
2. 稲垣誠, 新型二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 系の開発と磁性
数理解析科学研究科修士 (理学) 論文, 2013 年 3 月
 PO_4 四面体を含むリチウムイオン二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ 系を開発し, その充放電特性と磁性, 並びにリンの欠損効果を追究した: 1) 本系は約 4 V の平坦電位と見かけ上 260 A h kg^{-1} の高い容量を示し, 20 回以上の充放電サイクル後も 80 % の容量を保つとともに, 大きな構造の変化は生じないことが明らかにされた. 2) 充電試料の組成分析から, 実際の容量は見かけの値より低下していることが示唆された. 3) g 因子から, V^{3+} の結晶場は Russell–Saunders 結合を壊すほどには大きくないことがわかった. このことは, P 原子の電気陰性度が高く, 誘起効果によって M–O 間のイオン性が大きくなることに対応する. 4) P 濃度を連続的に変化させ作成した試料においても, V イオンが 3 価になるように酸素が欠損することが明らかにされた. 5) V^{2+} を含む $x = 10$ 組成の合成に成功した.

〈 学会発表 〉

1. 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 II
日本物理学会 2012 年秋季大会・横浜国立大学常盤台キャンパス・2012 年 9 月 20 日・20pCD11
2. 小野田雅重, 池田聡, 二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 系における充電組成の結晶構造と電子状態
日本物理学会 2012 年秋季大会・横浜国立大学常盤台キャンパス・2012 年 9 月 20 日・20pCD12
3. 小野田雅重, 廣瀬元, 二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_2\text{P}_3\text{O}_{12}$ 系の結晶構造と電子状態
日本物理学会 2012 年秋季大会・横浜国立大学常盤台キャンパス・2012 年 9 月 20 日・20pCD13
4. 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 III
日本物理学会 2012 年秋季大会・横浜国立大学常盤台キャンパス・2012 年 9 月 20 日・20pCD14
5. 小野田雅重, 池田聡, パナジウムポリアニオン系における低次元磁性 I
日本物理学会第 68 回年次大会・広島大学東広島キャンパス・2013 年 3 月 26 日・26pXW5
6. 齋藤裕亮, 小野田雅重, パナジウムポリアニオン系における低次元磁性 II
日本物理学会第 68 回年次大会・広島大学東広島キャンパス・2013 年 3 月 26 日・26pXW6

〈高校生・中学生対象授業，講演等〉

1. 小野田雅重，次世代二次電池正極材料の開発
科学技術週間事業「環境・エネルギーのための科学と技術：体験実験とポスター展」・2012年4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-
附属駒場高等学校2年生筑波大学研究室訪問・2012年7月
3. 小野田雅重，物性実験研究と物質科学
平成24年度受験生のための筑波大学説明会ポスター展示・2012年7月
4. 小野田雅重，物質科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
茨城県立下妻第一高等学校2年生「出前講義」・2012年11月
5. 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・2013年2月

〈産学連携等〉

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 $\text{Li}_9\text{V}_3\text{P}_{8-\delta}\text{O}_{29-\delta'}$ の高度化および関連物質系の開発（2012-2013）
2. 小野田雅重，研究基盤総合センター分析部門研究助成，次世代二次電池正極材料の開発（2012-2013）

〈特許公開・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，特開2012-146630
2. 小野田雅重，固体電解質および二次電池，特願2012-201897
3. 小野田雅重，正極活物質および二次電池，特願2013-003204
4. 小野田雅重，正極活物質および二次電池，特願2013-013263
5. 小野田雅重，負または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2013-019820

〈特記事項〉

1. 小野田雅重，遷移金属酸化物系の研究，Marquis Who's Who in the World 2013 (30th Pearl Anniversary Edition)，2012年11月

IX - 2. 半導体物性グループ

教授 舛本 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
 大学院生 11名

【1】 半導体量子構造のスピノ光物性 (舛本泰章, 富本慎一)

(1) 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, 川名啓介, 村上瑛, 舛本泰章) [論文3,6]

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。ひと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

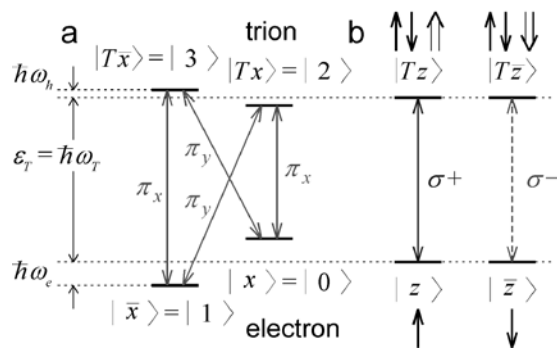


図1: 1電子ドープ量子ドットの4準位系

リオンスピン状態間($|Tx\rangle$ と $|Tx̄\rangle$)のコヒーレンスである。他のひと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。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ドYNAMICS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

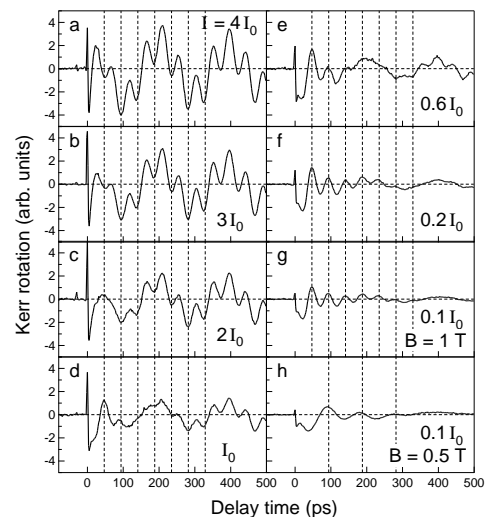


図2: 1電子ドープInP/InGaP量子ドットにおけるTRKRの励起強度依存性の測定結果

スピンの歳差運動による。一方、弱励起の場合(f)または(g)では、同じ周期で逆位相の振動が200 ps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出来る。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、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。

(2) ZnO中の電子スピンの長時間コヒーレンス

(冨本慎一, 村上瑛, 舛本泰章, 加藤裕幸^A, 佐野道宏^A, 松本貴裕^A ^Aスタンレー電気)

半導体中の中性ドナー原子(D⁰)に束縛された電子のスピンは、量子ドット中の電子と同程度の長いスピンコヒーレンス時間(T₂^{*})を持つ。また、ドナー束縛励起子(D⁰X)状態とD⁰との間の遷移(D⁰X-D⁰間遷移)は均一な周波数を持つため、空間的に遠く離れた場所にある別個の電子のスピン状態間の量子もつれ(エンタングルメント)を、光子を介して生成出来ると期待される。ウルツ鉱型結晶構造をもつZnOでは、結晶場とスピン軌道相互作用の影響で価電子帯がΓ点においても3つに分裂しており、D⁰Xの内部状態が比較的単純であるという特長がある。本研究では、ドナー原子としてGaを含むZnOで時間分解カー回転(TRKR)測定を行い、D⁰のT₂^{*}を調べた。

図4に、温度T=1.8 K、磁場B=0.5 T(フォークト配置)で測定したTRKRの時間変化を示す。試料は、サファイアのa面基板上にMBE法で成長したZnOの薄膜(厚さ1.4 μm)であり、7×10¹⁷ cm⁻³の濃度でGaを含んでいる。ポンプ・プローブ光の波長(370 nm)はD⁰X-D⁰間遷移に共鳴している。負の遅延時間においても振動が観測されており、レーザーパルスの繰り返し間隔(12.2 ns)と同じ程度の長いコヒーレンス時間を持つことが分

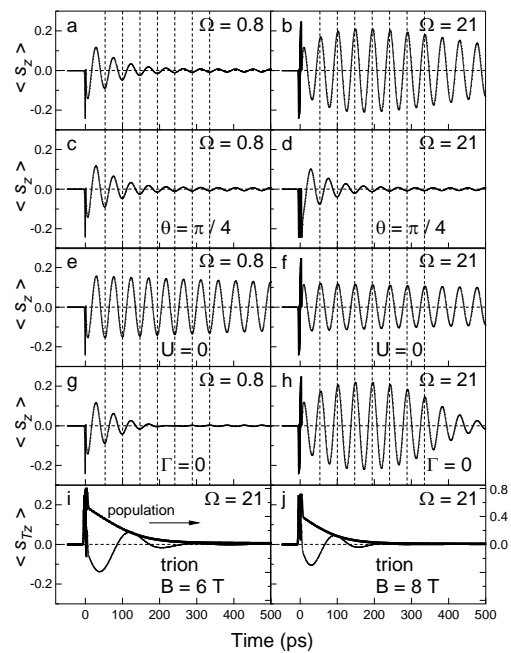


図3: 4準位系の密度行列を用いたモデルによる電子スピンの期待値 $\langle s_z \rangle$ の時間発展の計算結果(Ω は励起光強度を表すパラメータ)

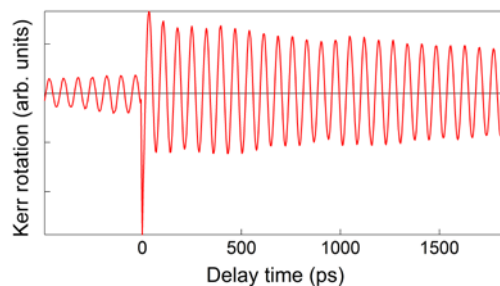


図4: GaをドーブしたZnO薄膜におけるTRKRの測定結果

かる。T₂*を正確に求めるために、共鳴スピン増幅 (RSA) 測定を行った (図5)。これは、遅延時間を-250 psに固定して、TRKRを磁場の関数として測定する実験である。実験結果 (点) のB=0 T近傍に現れているピークに理論式をフィッティング (実線) することで、T₂*は12 nsと求められた。ドナー原子に束縛されている電子のスピンは、その付近の結晶格子中のイオンがもつ核スピンと相互作用しており、それがスピン緩和の原因である。核スピンが電子に及ぼす影響を、有効磁場の大きさとして定量的に評価するために、TRKRの磁場依存性の測定をファラデー配置でも行った (図6)。実験結果はB=0 T付近にディップを示す。この幅から有効磁場の大きさは1.3 mTと求まった。

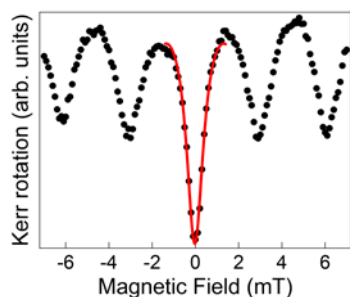


図5: RSA の測定結果

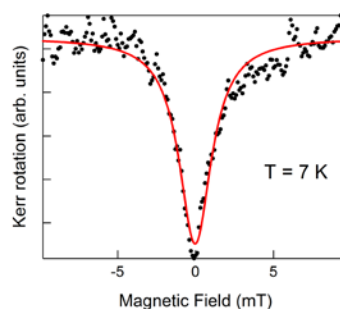


図6: ファラデー配置での測定結果

【2】 量子ドットの分光研究 (池沢道男, 舛本泰章)

(1) エネルギーの揃った GaAs:N 等電子トラップからの単一光子発生

(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) [論文4,9]

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。これを改善するために、昨年度、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、NN_Aと呼ばれる特定の発光中心を再現性良く得られるようになった。この発光中心を利用して、エネルギーの揃った単一光子を得ることを試みた。

試料成長は減圧 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) を使った。200 nm 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 100 nm の GaAs キャップ層を積層した。δ ドープした N の面密度 [N]_{2D} は 1.8×10¹² cm⁻² である。サンプル面内での NN_A発光中心の分布と、その発光中心の発光スペクトル (温度 5K) を図 7(a)(b)にそれぞれ示す。個々の NN_Aは空間には十分離れて存在しており、また、その発光エネルギーの不均一性は 100μeV 以下と、極めてよく揃っていることがわかる。発光は二つの直線偏光成分から成るが、すべての NN_Aについて低エネルギー側のピークが[110]方向となっており、偏光の方向も良く揃っている。この点は、GaP に N をドープしたときに形成される NN ペアとは異なっているようである。NN_A発光中心を一つ選び、その発光の強度相関測定を行

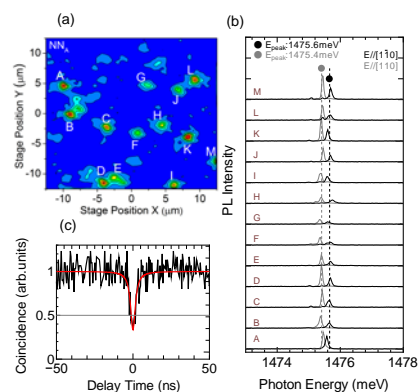


図7: (a)δドープ GaAs:N 試料内の NN_A 発光中心の分布。(b) 各々の NN_A の PL スペクトル。(c) 一つの NN_A について得られたアンチバンチング信号。

った結果が図 7(c)である。明瞭なアンチバンチングが観測され、GaAs からエネルギーの揃った単一光子を初めて得ることができた。

(2) GaAs:N 等電子トラップに束縛された励起子の均一幅 (準共鳴励起)

(張遼, 池沢道男, 佐久間芳樹^A, 舛本泰章^A物質・材料研究機構) [論文 10]

等電子トラップに束縛された励起子のコヒーレンス時間 T_2 が発光寿命 T_1 の2倍で与えられる上限値に達する事は、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。我々は、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($h/\pi T_2$)を調べている。

昨年度の研究で、GaAs:N 中の等電子トラップに束縛された励起子の均一幅は、低温で、高品質の量子ドットと同程度に長いことが分ったが、2K 以下の低温でも寿命広がりまでは達していなかった。その原因として、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こっているためと考えられた。それを調べるため、より共鳴に近い条件でフーリエ分光測定を行った。試料は MOCVD 法により一原子層の窒素をデルタドープした GaAs($[N]_{2D}=2.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$)である。温度 5K で単一不純物発光中心に対して励起スペクトル (PLE)を測定した。図 8(a)の様に GaAs のバンドギャップ内に鋭い吸収ピーク (約 1508.8 meV) が現れ、この吸収ピークで励起すると、図 8(b)の様に 1878meV の非共鳴励起の時と比べて発光スペクトルがかなり単純になり、この単一発光中心だけが選択的に励起されていることが分かった。しかし、予想に反して、この温度ではフーリエ分光測定で二つの励起方法で位相緩和時間に図 8(c)の様に大きな違いがなかった。原因としては、準共鳴励起のエネルギーが十分に低くなく、連続的な吸収バンドの裾を励起してしまっているために、スペクトル拡散が十分抑えられていない可能性や、測定温度が十分低くなかったために、フォノンの影響の方が大きい可能性などが考えられる。

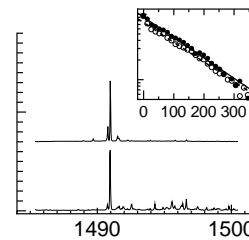
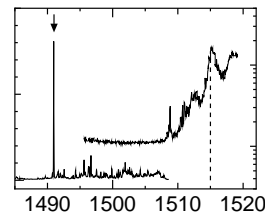


図 8: (a) ある単一発光中心の発光スペクトルと励起スペクトル。(b) 非共鳴励起と準共鳴励起の発光スペクトル比較。下(NR)は 1878meV の非共鳴励起の PL で、上(QR)は 1508.8meV での準共鳴励起の PL である。(c) 非共鳴励起と準共鳴励起のフーリエ分光の結果。

(3) 単一等電子トラップの共鳴励起による単一光子の発生

(池沢道男, 佐久間芳樹^A, 舛本泰章^A物質・材料研究機構)

単一の二準位系を、狭い線幅を持つレーザー光で共鳴的に励起したときに、レーザー光と同程度の高いコヒーレンスを持つ単一光子が得られる事が知られている。励起条件によっては寿命広がり幅よりも狭くなりうるため、物質の性質に縛られない、超コヒーレントな単一光子の発生法として興味深い。我々は、GaAs 中の単一の窒素等電子不純物について、狭線幅レーザーによる共鳴励起を行った。

試料は、窒素デルタドープ GaAs 薄膜で、励起光源には、リング型共振器の cw チタンサファイアレーザー（線幅 約 5MHz）を用いた。励起光の不要な散乱光が検出系に入り込まないように、励起光は試料の側面から入射させ、試料表面で全反射させるようにした。試料からの共鳴蛍光は、共焦点光学系とピンホールを用いて単一の発光中心からの信号を空間的に選択した。

図 9(a)は低分解能の分光器を用いて測定された、温度 5K における典型的な単一発光中心の共鳴蛍光のスペクトル（実線）と、共鳴蛍光強度の励起スペクトル（黒丸、白丸）である。発光は 330 μ eV 程度分裂した直交する二つの偏光成分からなり、それぞれで幅 30 μ eV 程度の鋭い共鳴構造が確認された。共鳴の幅は均一幅を反映しており、温度とともに増大することも確認されている（図 9(b)）。また、その幅は発光のフーリエ分光によって求めた均一幅と同程度である。このような共鳴条件下で、光子の強度相関を測定したところ、明らかなアンチバンチングが観測され、単一の発光中心の共鳴励起による単一光子発生が初めて観測された。線幅が実際に自然幅よりも狭くなっているかどうかは、今後フーリエ分光法などにより研究する必要がある。

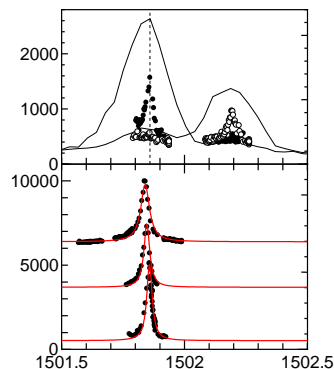


図9: (a)実線は5Kでの共鳴励起下での単一発光中心の発光スペクトル。励起エネルギーは縦点線で示す。直交する2つの偏光成分が見られる。黒丸と白丸はそれぞれのピークで検出したときの検出偏光の異なる PLE スペクトル。(b)低エネルギー側の共鳴構造の温度依存性。温度上昇とともに幅が広がり、低エネルギーシフトする。

【3】新しい半導体ナノ構造（舛本泰章）

(1) 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1, 7, 8]

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伝導性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、色素増感太陽電池の色素を量子ドットに置換した量子ドット増感太陽電池で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導電性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、

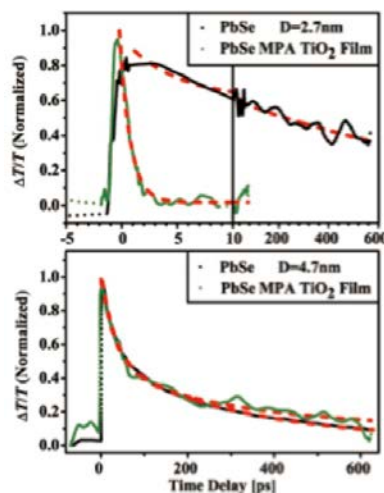


図 10 : PbSe 量子ドットからポーラス TiO₂ への高速電子移動に伴う減衰が直径 2.7nm のドットでは見られるが 4.7nm のドットでは見られない。

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10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 に吸着しない PbSe 量子ドット中の電子寿命に比べて 10⁶ 倍短く、高効率が可能であることを明らかにした [論文1, 8]。

次に、バンドギャップの高い ZnS をシェルにし CuInS₂ をコアとする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。シェルを付けない場合、直径が 2.5nm から 4.0nm にわたる CuInS₂ 量子ドットでは、電子の量子化 LUMO 準位はポーラス TiO₂ の LUMO 準位より高く CuInS₂ 量子ドットからリンクしたポーラス TiO₂ へおこる電子移動を反映して CuInS₂ 量子ドットの発光寿命がポーラス TiO₂ に分子リンカーを用いてリンクすると大幅に短くなった。電子移動の速度は 4.5-6.0 × 10⁷ s⁻¹、効率は 83%-69% である。シェルでコアをカバーすることで、非輻射過程が抑制され発光効率が増加しシェルの厚さが増加するにつれ CuInS₂ コアからポーラス TiO₂ への電子移動速度が遅くなるのが観測された。図11に示すように、電子移動の速度がシェル厚に依存して指数関数的に減少することから電子がシェルをトンネル過程で透過している事が明らかになった [論文7]。

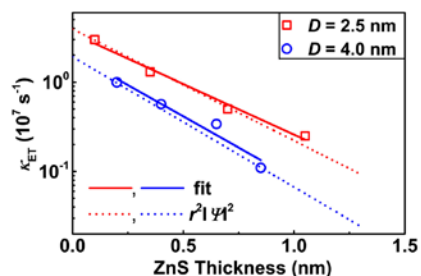


図 11: CuInS₂/ ZnS 量子ドットからポーラス TiO₂ への電子移動速度を 2 種類のコア直径 (D) に対してシェル厚の関数としてプロット。シェル厚 (d) の関数として exp(-βd) で実験データは良く表され、電子がシェルをトンネル過程で透過している事を示している。コア直径 (D) が 2.5nm から 4.0nm に増加すると β は 1.1nm⁻¹ から 1.4nm⁻¹ に増加するのはシェル表面での電子波動関数の染み出し分の増加として説明できる。

【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、柴田、野村)

前年度までに私達のグループでは、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であることを示した。この手法により量子ホール端状態の空間分布を得ることに成功した。本年度は、局所光励起により局所的にスピン注入するために、スピン偏極した光照射手法の開発を実施した。局所的に光照射をするために、光近接場プローブには光ファイバーをエッチングにより先端を先鋭化し、金属蒸着をした上で開口部をもうけたものを用いた。高い光透過率を有する 2 段テーパ型的光近接場プローブを作製した。特に、本研究目的のために素材の改良を進め、さらに集束イオンビーム (FIB) 加工により真円度の高い開口部を作製して偏光の乱れを極小に留めるようにした。一般に通常のシングルモード光ファイバー中の伝搬光ではファイバーの曲げ等による屈折率の異方性が生じる。また、前述の改良にも関わらず近接場光プローブ先端部の形状の軸対称からのずれによる異方性が残る。これらの異方性は吸収が小さい場合には補正することが可能である。そこで、私達は Berek 補償子を挿入し、屈折率の異方性を補正した。その際、光ファイバーの曲げ等が変化しないように経路を固定した。まず、室温において出射光が直線偏光、円偏光となり条件を探索した。次に、スピン偏極している電子占有数奇数近傍において、量子ホール端状態への光照射から円偏光となる条件を探索してスピン注入を行い、初期的なデータを取得した。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) 量子井戸中荷電励起子と二次元電子系のクロスオーバーに関する研究 (野村) [論文 11]

二次元電子系において、乱雑静電ポテンシャルが支配する低電子密度での局在状態が電子密度の増加に伴って二次元電子ガス状態へと変化すること、光励起下の二次元電子+正孔系において、低電子密度領域で存在する荷電励起子状態が電子密度増加に伴って二次元電子ガス正孔状態へとクロスオーバーすることの対応関係は、両者の生じる電子密度が重なり合っているためこれまで不明瞭であった。本研究では、極低温において電子密度と電場をパラメータとした発光スペクトルを測定し、電子密度の増加に伴う二次元電子系の遮蔽長の減少と、荷電励起子中の電子-正孔間のクーロン引力の遮蔽に伴う荷電励起子半径増大との対応関係を明らかにし、遮蔽長が荷電励起子半径とほぼ一致する電子密度を境にして荷電励起子状態と二次元電子ガス正孔状態がクロスオーバーすることを見出した。

図 12 に示すように、電場下における発光線幅の変化から荷電励起子有効半径 a^* の電子密度依存性を求めた。スクリーニング長は非線形遮蔽モデルにより見積もられる。 a^* はスクリーニング長が減少する電子密度 $2 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ を超えたところで急激に増大することを見いだした。これは二次元電子ガスの遮蔽によって荷電励起子が二次元電子ガス - 正孔状態へとクロスオーバーしていることを示している。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所赤崎達志氏のグループとの共同研究である。

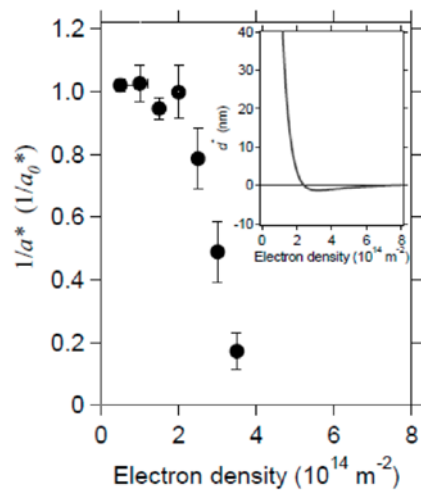


図 12: 荷電励起子半径の逆数の電子密度依存性. 挿入図: スクリーニング長の電子密度依存性。

(3) 半導体二次元電子系の分数荷電準励起子状態の観測 (野村)

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ている。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が今まで明確なデータは示されていなかった。分数量子ホール領域の分光学的研究は従来 10 T 以上の強磁場で行われ、基底状態は完全スピン偏極状態とされていた。私達は、散乱の要因となるドナー層がなくゲート電圧によって高移動度、極低電子密度の二次元電子系を誘起可能な試料を用いて、極低温において電子占有数 $1/3$ 近傍の発光スペクトルを 6 T 以下の比較的小さい磁場において円偏光分解してスピン状態を含めた発光分光の研究を行った。その結果、 $\nu = 1/3$ 近傍の σ^- 円偏光発光に、明確に分離された 4-5 つの発光ピークを初めて観測した。その内の一つは準電子励起の存在する $\nu \geq 1/3$ においてのみ観測され、 $\nu < 1/3$ には見られなかった。この発光ピークは $T \geq 700 \text{ mK}$ の高温で消失した。これらの結果は、球面上のスピン自由度を含む電子と正孔の有限系での厳密対角化に基づく数値計算結果と比較された。その結果、 $\nu = 1/3$ 近傍で電子系のスピン偏極度が低下すること、電荷 $e/3$ の準電子の関わる発光が $\nu > 1/3$ で見られることが初めて示された。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、光励起下での基底状態の全スピンの低下した状態をとりやすいことが、従来、報告されていない分数荷電準励起子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、NRC Canada, Pawel Hawrylak 氏のグループとの共同研究である。

(4) <電子-電子間、電子-正孔間相関効果制御によるスピン分裂の解明> (野村) [論文 12]

二次元電子系では有効 g 因子が電子間相互作用により変化することが知られている。磁場 (B) 中ではランダウ準位電子占有率 ν に応じて、上向きスピンと下向きスピンの電子数の差が ν 奇数において極大になり、有効 g 因子が極大となる。これまでの研究では数 T から 20 T 程度の強磁場において行われてきた。私達は、低電子密度において移動度の高い試料を用いて、従来研究例の皆無であった 1 T 以下の低磁場にて発光スペクトルから $3 \leq \nu \leq 10$ の範囲で有効 g 因子の ν 依存性を測定した。図 13(a) に示すように得られた有効 g 因子は、 ν 偶数で極小、 ν 奇数で極大となる振動を示した。この測定結果と図 13(b) に示す自己無撞着ボルン近似の範囲で不純物散乱の影響を取り入れて電子の自己エネルギーを計算した理論との比較を行った。その結果、 $\nu=5, 7$ において観測された有効 g 因子の電子密度依存性は理論で良く説明され、電子間交換相互作用による増大が観測されたと結論付けられた。 $\nu=3$ において理論との乖離が見られ、そこでは電子間交換相互作用による有効 g 因子の増大が電子-正孔間相関効果すなわち励起子効果により部分的に打ち消されていることがわかった。また、電子密度の低下に伴う ν 偶数における有効 g 因子の大きさの増大は観測されなかった。

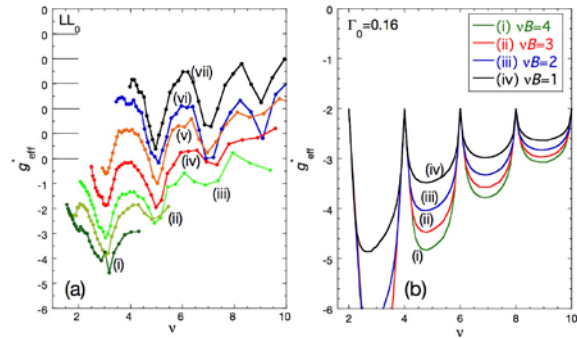


図 13: (a) 電子密度 $n_s =$ (i) 2.9×10^{10} , (ii) 4.0×10^{10} , (iii) 5.0×10^{10} , (iv) 6.0×10^{10} , (v) 7.1×10^{10} , (vi) 8.6×10^{10} , および (vii) $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ における観測された電子占有数 ν に依存した有効 g 因子 g_{eff} . (b) $\nu B =$ (i) 4, (ii) 3, (iii) 2 および, (iv) 1, $\Gamma_0 = 0.16$ の場合における計算で求められた有効 g 因子。

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。

(5) 非対称二重量子井戸の発光分光 (野村)

磁場中の二次元電子+正孔系の発光では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。電子占有数 ν を連続的に変化させた場合に $\nu=1$ において発光エネルギーの跳びが生じることが知られている。この跳びの大きさはランダウ準位を占有する電子間クーロン相互作用と電子-価電子帯正孔間クーロン相互作用の差によって決まることが示されている。本研究では図 14 に示すような GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 非対称二重量子井戸を用いて、温度 $T=0.3 \text{ K}$ 、磁場 0-8 T の範囲で、電子-正孔間距離 d と電子密度を表面ゲート (V_F) と裏面ゲート (V_B) とで制御し、 $\nu=1$ 近傍の発光を観測した。共通の電子系に対して、 d の大きい井戸間遷移と d の小さい井戸内遷移の発光を同時に観測することに成功した。その結果 $\nu=1$ において発光エネルギー

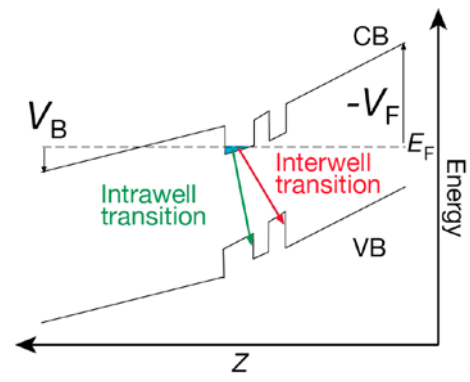


図 14: ゲート付き非対称二重量子井戸のポテンシャルと光遷移の概略図。

ギーの跳びが井戸間遷移と井戸内遷移とで異なることが示された。観測された発光エネルギーの跳びの大きさより井戸内遷移、井戸間遷移それぞれの場合について電子と正孔の層間距離が見積もられた。この手法により電子間相互作用と電子-正孔間相互作用を分離して議論することが可能となった。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所赤崎達志氏のグループとの共同研究である。

(6) 半導体中スピン観測のためのナノ SQUID の開発 (柴田、野村) [論文 13]

少数電子スピンの直接的な観測のために、走査型ナノ SQUID プローブの研究を行った。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させる方式に基づき、マッピング可能な走査型 SQUID プローブを開発した。空間分解能の向上のためには、測定対象と SQUID プローブ間の距離を最小化する必要がある。そのため、プローブ先端の直近に高精度に SQUID を作製する必要がある。そこで、走査型 SQUID プローブは、リソグラフィによって形状を定め、シリコンの深堀ドライエッチングにより作製した。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。図 15 にこのボッシュプロセスにて作製された SQUID プローブの端面の走査型顕微鏡写真と水晶振動子上にマウントされた SQUID プローブの光学顕微鏡写真を示す。この結果、再現性良く多数の走査型 SQUID プローブを一度のプロセスで作製することに成功した。

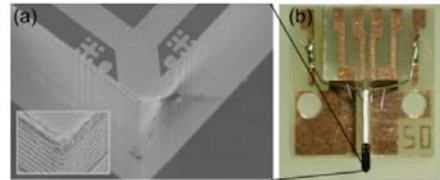


図 15: (a) ボッシュプロセスにて作製された SQUID プローブの端面の走査型顕微鏡写真と (b) 水晶振動子上にマウントされた SQUID プローブの光学顕微鏡写真。

SQUID ループは FIB による直接加工によって作製した。FIB 加工は、ナノオーダーの加工が可能であるという長所がある反面、イオン照射により超伝導膜の損傷により超伝導転移温度の増大が生じる。そこで、Nb 薄膜上に Au 保護薄膜を形成した上で、Ar イオンビーム照射による直接加工にて SQUID ループの作製を行った。Au 保護膜の膜厚の最適化により、FIB 照射による損傷を最小に留めつつ微小ループサイズの SQUID の作製に成功した。以上のように作製された走査型 SQUID プローブの臨界電流 (I_c)-磁場 (B) の特性を図 16 に示す。このように良好の SQUID の I_c の磁場に対する振動が得られた。

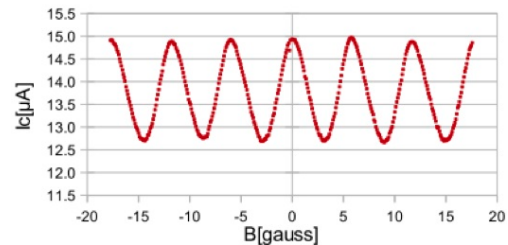


図 16: FIB により作製された走査型 SQUID プローブの I_c - B 特性。

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。

(7) Si ナノレイヤ・ナノワイヤの発光分光 (櫻井、野村)

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、バルク半導体においてこのような量子凝縮は調べられてきた。Si-ナノレイヤやナノワイヤにおいて、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一方、バルクで6重に縮退している谷縮退が解けるため、量子凝縮状態の相図がどのようになるか自明ではない。閉じ込め構造では量子状態を擾乱すると不規則性が不可避であるため、十分に高品質の試料が欠かせないが、本研究では、実デバイス品質の試料を得て、閉じ込め系における量子凝縮状態の研究を実施した。

電子正孔液相の相等からの発光スペクトル形状は、キャリア温度、閉じ込め状態の状態密度、キャリアの化学ポテンシャルを反映する。発光スペクトルの解析からこれらの値を求めることが可能である。図 17 に試料の格子温度 6 K における厚さ 25.2 nm の Si ナノレイヤ試料からの規格化発光強度、低エネルギーバンドピークと励起子ピークとの強度比の光励起密度依存性を示す。光励起密度の増大に伴い低エネルギーバンドピークの相対強度が、50 nm 以上の Si ナノレイヤと比較して顕著に増大することがわかった。格子温度 6 K、厚さ 25.2 nm の試料では、キャリア温度とキャリア密度との関係から、低エネルギーバンドは電子正孔液相であることが示された。以上により、厚さ 25.2 nm のナノレイヤ試料において電子正孔液相への転移が促進されていることを示された。

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。

(8) 通信用半導体光変調器の動作限界 (秋山、野村) [論文 14, 15]

インターネットのトラフィック増大を支えるためには、システム全体の規模を維持した上で、光通信システムの伝送容量増大が不可欠であり、伝送路の末端で電気/光信号変換を担う光変調器に対してより高速/高効率な動作が求められる。しかしながら光変調器において高速動作と高効率動作は相反する要求である。そのため従来の光変調器構造におけるパラメータの最適化では一方の特性を犠牲にすることなく他方の特性を改善することに限界があった。図 18 に示すような多段に接続したリング共振器をマッハツェンダ干渉計に組み込んだ構造の新しいリング共振器型変調器では、共振

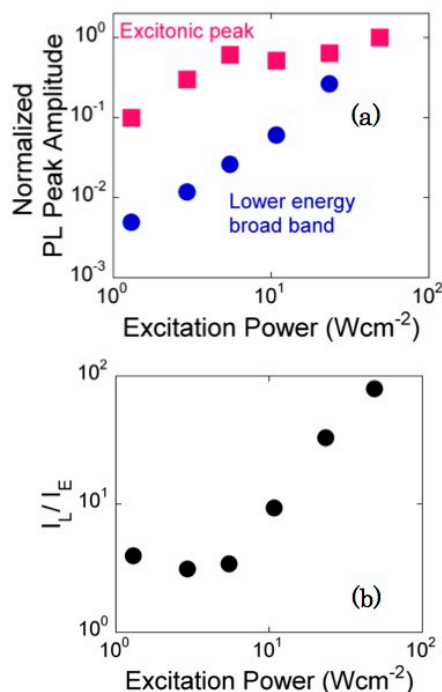


図 17: 厚さ 25.2 nm の Si ナノレイヤ試料からの (a) 規格化発光強度、(b) 低エネルギーバンドピークと励起子ピークとの強度比の光励起密度依存性。

器のQ値とリング共振器の段数 N と二つのパラメータを用いることができ、設計の自由度が大きくなった。この新しいリング共振器型変調器の動的応答特性の解析計算と数値シミュレーションにより図19に示すように25 GHz以上の高速動作において従来の素子構造と比べて高効率であることを示された。従来の素子構造の光変調器の特性限界を超えた高速動作/高効率動作が可能であることが示された。

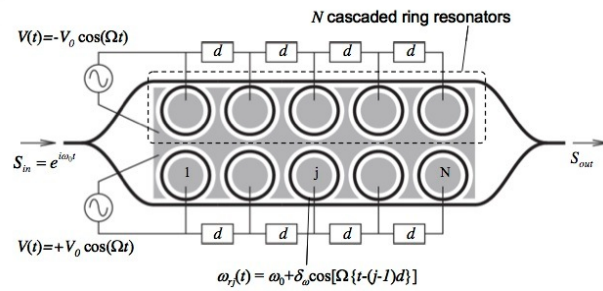


図18: 多段に接続したリング共振器をマツハツェンダ干渉計に組み込んだ構造の新しい光変調器の概略図。 d は隣あったリング共振器間の電気信号の時間遅延を表す。

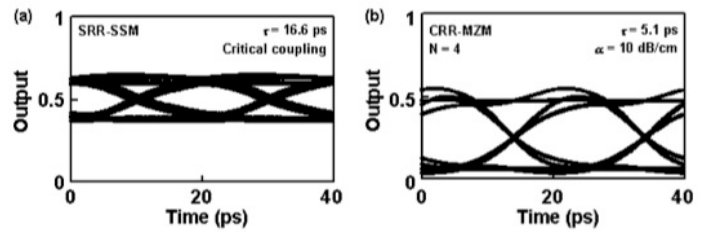


図19: (a) 単一リング共振器型変調器(SRR-SSM)、(b)多段リング共振器型変調器(CRR-MZM)の50 Gb/s 擬似ランダムビットシーケンスにおけるアイダイアグラムの計算結果。

<論文>

1. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast electron transfer from PbSe quantum dots to TiO₂", Appl. Phys. Lett. 100, 252106 (2012).
2. 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).
3. 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).
4. 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).
5. Y. Masumoto, K. Goto, S. Tomimoto, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Bimolecular interlayer scattering of electrons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", J. Lumin. 133, 135 (2013).
6. 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", J. Lumin. 133, 162 (2013).
7. J. Sun, J. Zhao, Y. Masumoto: "Shell-thickness-dependent photoinduced electron transfer from CuInS₂/ZnS quantum dots to TiO₂ films", Appl. Phys. Lett. 102, 053119 (2013).
8. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast Electron Transfer from PbSe Quantum Dots to TiO₂", 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) Proceeding (to be published).
9. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, T. Mori, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Fourier Spectroscopy of Individual Nitrogen Impurity Centers in GaAs", 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) Proceeding (to be published).
10. L. Zhang, M. Ikezawa, T. Mori, S. Umehara, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Single photon generation from an impurity center with well-defined emission energy in GaAs", Jpn. J. Appl. Phys. (to be published).
11. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, and T. Akazaki: "Measurement of photoluminescence spectral linewidth of a GaAs quantum well in perpendicular electric fields: Evidence of a crossover from trions to an electron-hole gas", Phys. Rev. B **87**, 081310 (2013).
12. S. Nomura, H. Tamura, M. Yamaguchi, and T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Exchange energy enhanced g-factors obtained from Landau fan diagrams at low magnetic fields", Phys. Rev. B **87**, 085318 (2013).
13. Yusuke Shibata, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Hideaki Takayanagi, and Shintaro Nomura: "Development of scanning nano-SQUIDs for local magnetic imaging", Technical Digest for Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices 2012, 255 (2012).
14. S. Akiyama, T. Kurahashi, K. Morito, T. Yamamoto, T. Usuki, and S. Nomura, "Cascaded-ring-resonator-loaded Mach-Zehnder modulator for enhanced modulation efficiency in wide optical bandwidth", Optics Express **20**, 16321 (2012).
15. S. Akiyama and S. Nomura: "Dynamic response of modulators based on cascaded-ring-resonator", Optics Express **20**, 21847 (2012).

<学位論文>

数理物質科学研究科ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻博士論文 (2013年3月)

1. 秋山 傑: 「通信用半導体光変調器の高速/高効率動作に関する研究」

数理工物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文 (2013年3月)

1. 森達哉：「GaAs:N中の単一不純物中心の共鳴蛍光」
2. 村上瑛：「時間分解カー回転測定法による半導体中の電子のスピンコヒーレンスの研究」

<国際会議>

1. S. Mamyoda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura: "High resolution spatial mapping of quantum Hall edge states by a near-field scanning optical microscope", The Eighth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, (Tsukuba Congress Center, Tsukuba, 2012.5).
2. Yusuke Shibata, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Hideaki Takayanagi, and Shintaro Nomura: "Development of scanning nano-SQUIDs for local magnetic imaging", Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices 2012 (AWAD2012), (Okinawa Seinen-kaikan, Naha, 2012.6).
3. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast Electron Transfer from PbSe Quantum Dots to TiO₂", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (ETH, Zurich, 2012.8).
4. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, T. Mori, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Fourier Spectroscopy of Individual Nitrogen Impurity Centers in GaAs", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (ETH, Zurich, 2012.8).
5. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak: "Fine structures in photoluminescence in the fractional quantum Hall regime in low magnetic field", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012), (ETH, Zurich, 2012.8).
6. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura: "Imaging of quantum Hall edge states under quiresonant excitation by a near-field scanning optical microscope", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012), (ETH, Zurich, 2012.8).
7. Y. Sakurai, T. Tayagaki, K. Ohmori, K. Yamada, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, S. Nomura: "Fast luminescence decay of electron-hole quasi-two dimensional systems in Si nanolayer" 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS2012), (ETH, Zurich, 2012.8)
8. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki: "Narrowing of photoluminescence linewidth in the non-linear screening regime", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS2012), (ETH, Zurich, 2012.8).
9. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura: "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS2012), (ETH, Zurich, 2012.8).
10. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sone, T. Mori, T. Hamano, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Optical spectroscopy of individual nitrogen impurity centers in GaAs and single photon emission from a bright center", 7th International Conference on Quantum Dots (QD2012) (SANTA FE, NEW MEXICO, USA, 2012.5).
11. S. Nomura: "Optical probing of dynamically correlated electrons in integer and fractional quantum Hall systems", The DYCE International Workshop (Kussharo, Hokkaido, 2012.8).
12. L. Zhang, M. Ikezawa, T. Mori, S. Umehara, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Single photon generation from an impurity center with well-defined emission energy in GaAs", 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012) (Kyoto International Conference Center, Kyoto, 2012.9).
13. L. Zhang, M. Ikezawa, T. Mori, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Homogeneous linewidth of the nitrogen

impurity single photon source in GaAs”, IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012) (Pacifico Yokohama, Yokohama, 2012.9).

14. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura: “The optical excitation energy dependence of mapping of quantum Hall edge states”, IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM012), (Pacifico Yokohama, Yokohama, 2012.9).

<講演>

1. 野村晋太郎:「分数量子ホール状態からの発光」平山核スピントロニクス ERATO-セミナー (招待講演) (2012年6月)
2. A. Murakami, S. Tomimoto, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: “Resonant spin amplification measurement on bound electrons of Ga donors in ZnO films” 2012 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’12) (2012年7月)
3. 張遼, 池沢道男, 森達哉, 梅原晋太郎, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章:「GaAs:N中の発光エネルギーが揃った発光中心から単一光子の発生」第73回応用物理学会学術講演会 (2012年9月)
4. 村上瑛, 富本慎一, 加藤裕幸, 佐野道宏, 松本貴裕, 舛本泰章:「ZnO薄膜中のGaドナーに束縛された電子スピン緩和時間の計測」第73回応用物理学会学術講演会 (2012年9月)
5. 野村晋太郎, 伊藤宙陸, 間明田周平, 柴田祐輔, 大塚洋一, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志:「二次元電子系端状態中非平衡キャリア」第73回応用物理学会学術講演会 (2012年9月)
6. 土屋翔吾, 松野美砂, 石黒亮輔, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 前野悦輝, 高柳英明:「micro-SQUIDによる微小Sr₂RuO₄片まわりの局所的磁場観測」第73回応用物理学会学術講演会 (2012年9月)
7. 村上瑛, 富本慎一, 加藤裕幸, 佐野道宏, 松本貴裕, 舛本泰章:「ZnO薄膜中のGa不純物に束縛された電子のスピン緩和」日本物理学会2012年秋季大会 (2012年9月)
8. 石黒亮輔, 土屋省吾, 柏谷裕美, 柏谷聡, 野村晋太郎, 高柳英明, 前野悦輝:「micro-SQUIDによるSr₂RuO₄微小片の磁化測定」日本物理学会秋季大会 (2012年9月)
9. 山口真澄, 野村晋太郎, 田村浩之, 赤崎達志:「発光線幅から見たトリオン-2次元電子正孔クロスオーバー」日本物理学会秋季大会 (2012年9月)
10. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎:「低磁場低電子密度領域における電子占有数に依存したg-因子の増大」日本物理学会秋季大会 (2012年9月)
11. 野村晋太郎:「分数荷電励起子発光」平成24年度東北大プロジェクト研究会、仙台市茂庭荘 (2012年12月)
12. 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」第7回DYCEシンポジウム (2012年12月)
13. 山口真澄, 野村晋太郎, 田村浩之, 赤崎達志:「荷電励起子-2次元電子ガス正孔クロスオーバー」第7回DYCEシンポジウム、(2012年12月)
14. 舛本泰章:「量子ドットのスピン緩和」日本物理学会第68回年次大会 (招待講演) (2013年3月)
15. 森達哉, 池沢道男, 張遼, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章:「超コヒーレントな単一光子発生のための単一発光中心の共鳴励起」日本物理学会第68回年次大会 (2013年3月)

16. 張遼, 池沢道男, 森達哉, 佐久間芳樹, 迫田和彰, 舛本泰章: 「GaAs : N 中の単一不純物発光中心のフーリエ分光測定」 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月)
17. J. Sun, J. Zhao, Y. Masumoto: “Shell Thickness Dependent Photoinduced Electron Transfer from CuInS₂/ZnS quantum dots to TiO₂ films” 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月)
18. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎: 「ゲート付非対称二重量子井戸における井戸内および井戸間二次元電子系発光」 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月)
19. 佐久間大輔, 須山聡大, 持永裕太, 田野佑典, 石黒亮輔, 野村晋太郎, 高柳英明: 「微小 Josephson 接合における臨界電流の温度依存性」 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (2013 年 3 月)
20. 土屋翔吾, 小関貴司, 石黒亮輔, 松野美砂, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 前野悦輝, 高柳英明: 「Micro-SQUID によるメゾスコピック Al disk および Sr₂RuO₄ 片の磁気特性」 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (2013 年 3 月)

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
研究員		柴田恭幸
大学院生	D3	五十嵐一泰
	D2	栗原佑太郎
	M2	米澤宏平
	M1	若梅一真
	M1	高地雅光
	M1	棚辺大輝
	M1	下野貴弘
	M1	高木健太郎
卒業研究生	B4	高橋洋輔
	B4	赤羽隆弘
	B4	濱口 純
	B4	平野泰樹
	B4	折山賢志郎
	B4	後藤謙典 (理科大外研)

【1】 NaCoO₂ 薄膜の作成と電気化学特性[1] (小林、柴田、守友) 図1

層状岩塩酸化物 NaCoO₂ はナトリウムイオン二次電池正極材料として有望である。我々は、この材料の真の性能を評価するために、レーザーアブレーション法で薄膜を作成した。薄膜電極は優れたレート特性とサイクル特性を示した。

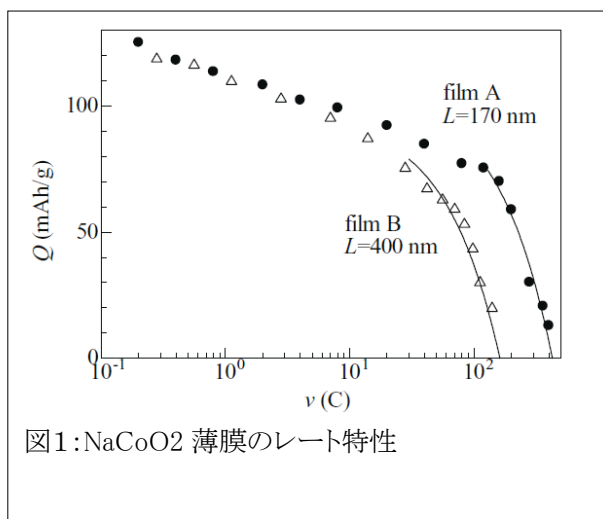


図1: NaCoO₂ 薄膜のレート特性

【2】 プルシャンブルー類似体の高効率セシウム除染機能 [2, 3] (大村、守友) 図2

プルシャンブルー類似体の水溶性セシウム除去能力を見極めるために、系統的な実験を行った。その結果、マンガンプルシャンブルー類似体がきわめて高い除去能力を示すことを発見した。さらに、放射性セシウムを用いて、現実の汚染濃度での実験を行った。その

結果、放射能レベルを 4000 分の 1 まで低減できることが分かった。この結果は、特許出願されている。また、日経新聞、日経産業新聞、NHK 水戸放送、等で大きく取り上げられた。

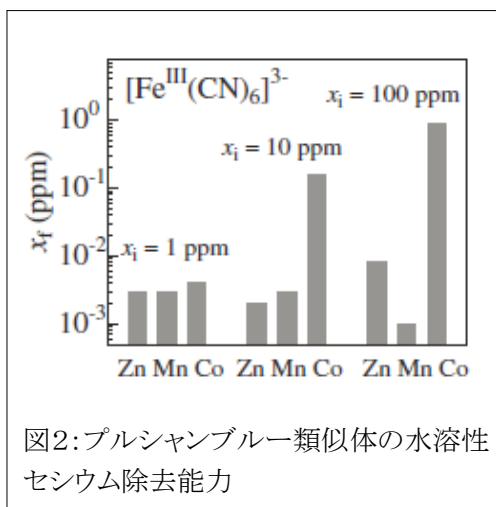


図2: プルシャンプルブルー類似体の水溶性セシウム除去能力

【3】 ナトリウムイオン二次電池正極材料としてのプルシャンプルブルー類似体薄膜[4, 5] (高地、松田、守友) 図3

プルシャンプルブルー類似体薄膜はリチウムイオン二次電池の正極材として優れた特性を示す。我々は、これらの薄膜は、次世代二次電池であるナトリウムイオン二次電池の正極材としての性能を評価した。その結果、極めて高い性能が得られた。

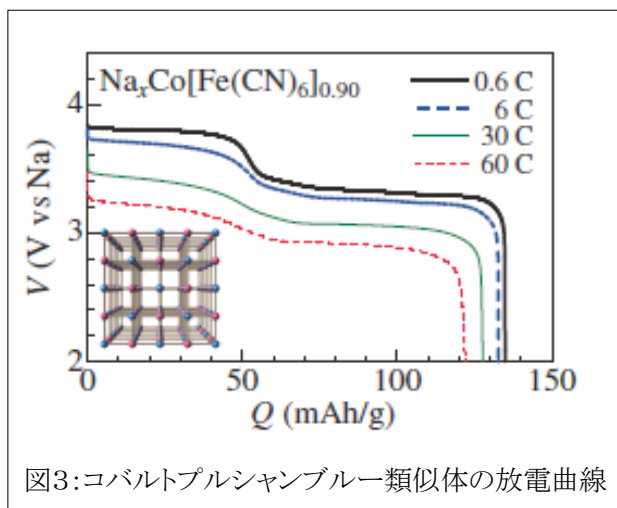


図3: コバルトプルシャンプルブルー類似体の放電曲線

【4】 リチウムイオン二次電池正極材料としてのプルシャンプルブルー類似体薄膜の基礎研究[6-11] (高地、栗原、松田、守友) 図4

プルシャンプルブルー類似体薄膜はリチウムイオン二次電池の正極材として優れた特性を示す。我々は、構造物性、電子状態、リチウムイオン拡散係数、膜厚依存性、組成依存性、レート特性、サイクル特性、等系統的かつ詳細なデータ蓄積を行っている。マンガンプルシャンプルブルー類似体は、大きなリチウムイオン拡散係数を反映して、3000C という驚異的なレート特性を示した。これら一連の研究成果は、科研費 NEWS に掲載されるとともに、科学新聞で大きく報道された。

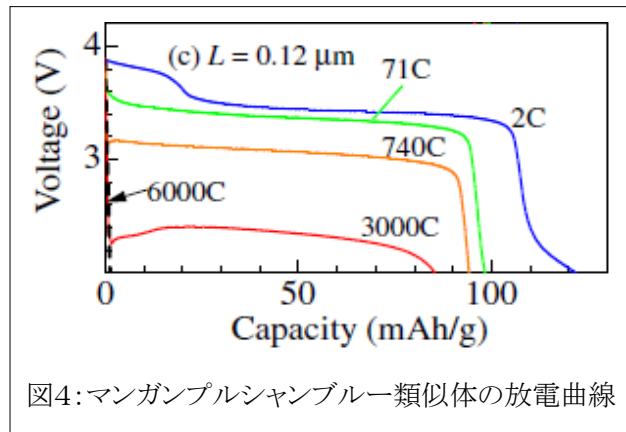


図4: マンガンプルシヤンブルー類似体の放電曲線

【5】 時間分解 XAFS による隠れた準安定相の探索[12] (上岡、柴田、守友、KEK/PF)

温度では到達できない隠れた準安定相を探索するために、時間分解 XAFS 分光法を用いて、コバルトプルシヤンブルー類似体に光誘起相の探索を行った。その結果、隠れた準安定相の手がかりを得ることができた。この結果は、JPSJ の Editor's Choice に選ばれるとともに、科学新聞で報道された。

【6】 有機薄膜太陽電池の電荷生成ダイナミクス[13-16] (米澤、上岡、守友、NIMS)

図5

近年、有機薄膜太陽電池のエネルギー変換効率は、10%の大台に到達した。しかしながら、界面における電荷生成プロセスは未だに未解決のままである。我々は、フェムト秒時間分解分光を駆使してこの問題に立ち向かっている。例えば、アクセプター励起子から電荷ができるプロセスを、分光学的にはじめて明らかにした。

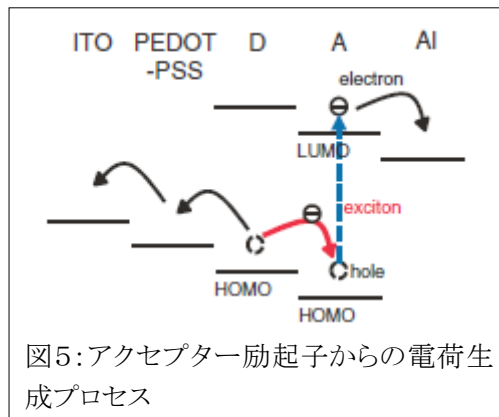
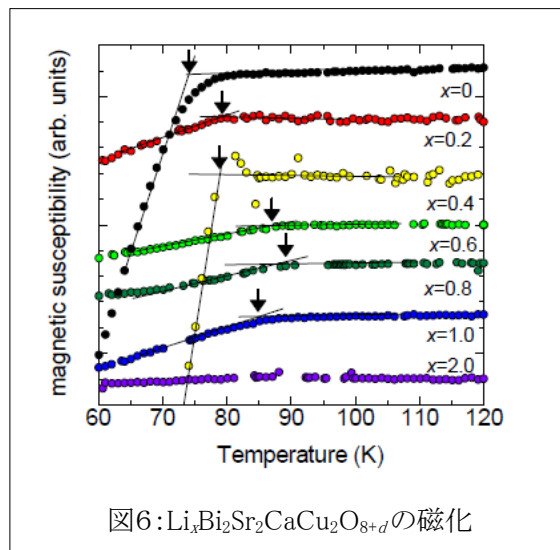


図5: アクセプター励起子からの電荷生成プロセス

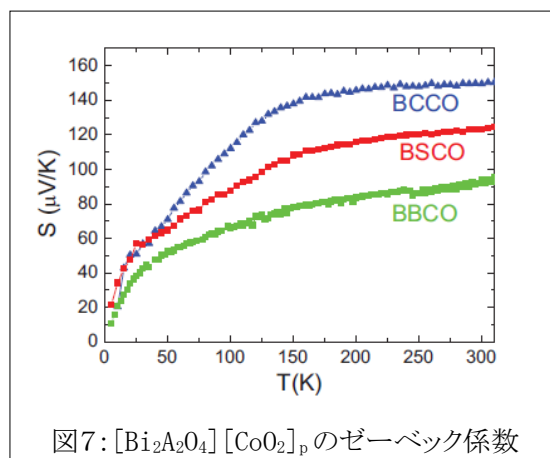
【7】 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ への電気化学的リチウムインターカレーション[17] (下野、小林、守友、KEK/PF) 図6

電気化学的にリチウムイオンを層状化合物にインターカレーションすることで、電圧印加によるバルクのドーピングが可能となる。高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ に Li イオンを電気化学的にドーピングし超伝導相転移温度を 75 K から 90 K まで上昇させることに成功した。



【8】 層状岩塩型酸化物および硫化物の熱電特性[18] (小林, CRISMAT) 図7

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。CdI₂型の CoO₂層を有する層状ミスフィット化合物 $[\text{Bi}_2\text{A}_2\text{O}_4][\text{CoO}_2]_p$ (A=Ca, Sr, Ba, 1.6<p<1.9) の面内方向のゼーベック係数、電気抵抗率、ホール係数を計測した。層状硫化物 Cu_xTiS_2 の熱電特性が古典的な輸送で理解できるのに対し、酸化物系では強相関効果を考慮する必要があることが改めて明らかとなった。



【9】 強相関酸化物の磁気・輸送特性[19, 20] (小林, 阪大, 東北大, 名大, 早大, CRISMAT) 図8

3d、4d 遷移金属酸化物では強い電子相関効果により、特異な磁気輸送特性が発現する。擬1次元酸化物 KRu_4O_8 では1次元的電子構造に由来した電子のゆらぎによる特異なノイズが計測された。また $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Ru}_x\text{O}_{12}$ では、 $x=1, 1.5$ において磁化の磁場依存性に線形からのずれが見られた。熱力学的な考察により、この領域において磁場印加により Cu^{2+} が局在から遍歴にその状態を変えることが示唆された。

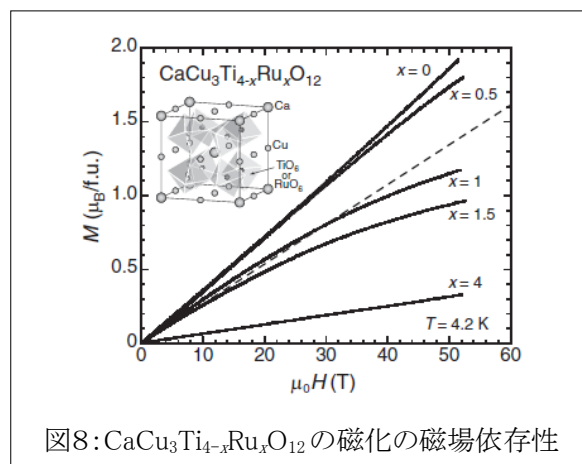


図8: $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Ru}_x\text{O}_{12}$ の磁化の磁場依存性

【10】 民間企業との共同研究

リチウムイオン二次電池正極材料としてのプルシャンブルー類似体に関する、民間企業との共同研究を行った。

【11】 プレ戦略イニシャティブに関する活動

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

【12】 KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成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。

【13】 研究会の開催

◇ 物性物理学の視点からの二次電池研究【10/22@筑波大学】

<論文>

1. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Intrinsic rapid Na⁺ intercalation observed in Na_xCoO₂ thin film", AIP Advances 3, 032104 (2013)
2. A. Omura and Y. Moritomo, "Cs⁺ trapping in size-controlled nanospaces of hexacyanoferrates", Appl. Phys. Express, 5, 157101 (2012).
3. Y. Moritomo and H. Tanaka, "Alkali cation potential and functionality in the nanoporous Prussian blue analogues", Advance in Condensed Matter Physics, 2013, 539620 (2013).
4. M. Takachi, T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Cobalt Hexacyanoferrate as Cathode Material for Na Secondary Battery", Appl. Phys. Express 6, 025802 (2013).
5. T. Matsuda, M. Takachi and Y. Moritomo "A sodium manganese ferrocyanide thin film for Na-ion batteries", Chem. Comm. 49, 2721 (2013).
6. Y. Moritomo, M. Takachi, Y. Kurihara, and T. Matsuda, "Thin Film Electrodes of Prussian Blue Analogues with Rapid Li Intercalation", Appl. Phys. Express 5, 041801 (2012).

7. Y. Kurihara, T. Matsuda,, and Y. Moritomo, "Structural Properties of Manganese Hexacyanoferrates against Li Concentration", Japanese Journal of Applied Physics 52, 017301(2013).
8. T. Matsuda and Y. Moritomo, "Two-electron reaction without structural phase transition in nanoporous cathode material", J. Nanotechnology, 2012, Article ID 568147, (2012)
9. T Matsuda, Y Kurihara and Y Moritomo, "Lithium intercalation properties in manganese-iron Prussian blue analogues", Journal of Physics:Conference Series 428 (2013) 012019
10. M. Takachi, Y. Kurihara and Y. Moritomo, "Channel Size Dependence of Li+ Insertion/Extraction in Nanoporous Hexacyanoferrates", Journal of Materials Science and Engineering B 2, 452 - 457 (2012)
11. Y. Moritomo, X.-H. Zhu, M. Takachi, and T. Matsuda, "Fast Discharge Process of Thin Film Electrode of Prussian Blue Analogue", Japanese Journal of Applied Physics 51, 107301 (2012).
12. Y. Moritomo, H. Kamioka, T. Shibata, S. Nozawa, T.Sato, and S. Adachi, "Photoinduced Phase Transition into a Hidden Phase in Cobalt Hexacyanoferrate as Investigated by Time-Resolved X-ray Absorption Fine Structure", J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033601 (2013).
13. K. Yonezawa, M. Ito, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Carrier Formation Dynamics of Organic Photovoltaics Investigated by Time-Resolved Spectroscopy", Advances in Optical Technologies, 2012, Article ID 316045 (2012)
14. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Fast carrier formation from acceptor exciton in low-gap organic photovoltaic", Appl. Phys. Express, 5, 042302 (2012).
15. Y. Moritomo, K. Yonezawa, M. Ito, H. Kamioka, ,Y. Yamamoto, T. Fukushima, and T.Aida, "Interface Dependence of Charge Formation Dynamics in Hexabenzocoronene-C60", Applied Physics Express 5, 062401 (2012)
16. T. Yasuda, K. Yonezawa, M. Ito, H. Kamioka, L. Han and Y. Moritomo, "Photovoltaic Properties and Charge Dynamics in Nanophase-Separated F8T2/PCBM Blend Films", Journal of Photopolymer Science and Technology, 25, 271-276 (2012)
17. T. Shimono, W. Kobayashi, H. Nitani, R. Kumai, Y. Moritomo, "Electrochemical lithium intercalation into $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", Journal of Physics: Conference Series 428 (2013) 012021
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. T. Kida, R. Kammuri, M. Hagiwara, S. Yoshii, W. Kobayashi, M. Iwakawa, and I. Terasaki, "High-field magnetization and magnetoresistance of the A-site ordered perovskite oxide $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Ru}_x\text{O}_{12}$ ($0 \leq x \leq 4$)", Phys. Rev. B 85, 195122 (2012).
20. S. Hebert, W. Kobayashi, H. Muguerra, , Y. Breard, N. Raghavendra, F. Gascoin, E. Guilmeau, and A. Maignan, "From oxides to selenides and sulfides : the richness of the CdI_2 type crystallographic structure for thermoelectric properties", Physica Status Solidi A, 1-13 (2012).

<著書>

<学位論文>

1. 修士論文 米澤宏平、「低バンドギャップ有機太陽電池の電荷生成ダイナミクス」

<講演>

1. Y. Moritomo "how to add physics to green technology", 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18 (invited)
2. Y. Moritomo, "simultaneous measurement of ps charge and lattice dynamics", AsCa2012@adelaide, 2012/12/3-5 (invited)
3. 守友 浩 「物性物理学の視点からの電池材料研究」物性物理と二次電池@筑波、2012/10/22 (invited)
4. Y. Moritomo "Structural properties of network-type cathode material for Li-ion battery" AOFSSR2012@Bangkok, 2012/8/10 (invited)
5. Y. Moritomo "SR investigation of photoinduced reaction", SagamoreXVII@Lake Toya, 2012/7/17 (invited)
6. Y. Moritomo "Ultrafast discharge in Nanoporous cathode material for Li ion battery", 2nd German-Japanese Workshop@Disburg, 2012/7/9 (invited)
7. Y. Moritomo "Ultrafast discharge in Nanoporous cathode material for Li ion battery", MOLMAT2012@Barcelona, 2012/7/6
8. Y. Moritomo "Photoinduced transition and other topics in PBA", PDSTM2012@Paris, 2012/5/22-25.(invited)
9. 守友 浩 「Li および Na イオン電池正極材料としてのネットワークポリマー」JST 大学連携新技術研究会@東京, 2012/7/24 (invited)
10. 守友 浩 「高速・安定放電可能なポリマー型イオン電池材料の開発」筑波大一日立製作所運営委員会@秋葉原、2012/6/20 (invited)
11. 高地雅光, 栗原佑太郎, 松田智行, 守友浩 「高容量を示す Co-Fe シアノ錯体電池正極の充放電メカニズム」日本物理学会 2012 年秋季大会@横浜、2012/9/18-21
12. 栗原佑太郎, 松田智行, 守友浩 「カチオン濃度制御された Mn-Fe シアノ錯体薄膜電極のリチウムイオン電池特性」日本物理学会 2012 年秋季大会@横浜、2012/9/18-21
13. 米澤宏平, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元 (Liyuan Han), 守友浩 「低バンドギャップ有機薄膜太陽電池における電荷生成ダイナミクス」日本物理学会 2012 年秋季大会@横浜、2012/9/18-21
14. 下野貴弘, 小林航, 守友浩 「層状岩塩型酸化物のアルカリ金属インターカレーション」日本物理学会 2012 年秋季大会@横浜、2012/9/18-21
15. 下野貴弘, 小林航, 守友浩 「 Na_xMnO_2 の化学ポテンシャルと構造の x 依存性」日本物理学会 2012 年年次大会@広島、2013/3/26-29
16. 棚辺大輝, 下野貴弘, 小林航, 浜田典昭, 守友浩 「 $\text{Na}_{0.7}\text{MO}_2$ の化学ポテンシャルと構造物性」日本物理学会 2012 年年次大会@広島、2013/3/26-29
17. 高地雅光, 松田智行, 守友浩 「 $\text{A}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.90}$ ($\text{A}=\text{Li}, \text{Na}$) の構造物性の x 依存性」日本物理学会 2012 年年次大会@広島、2013/3/26-29
18. 若梅一真, 高地雅光, XuHao ZHU, 上岡隼人, 守友浩 「 $\text{Li}_x\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.81}$ の Li インターカレーションダイナミクス」日本物理学会 2012 年年次大会@広島、2013/3/26-29
19. 柴田恭幸, 小林航, 守友浩 「 Na_xCoO_2 薄膜の充放電特性」第 60 回応用物理学会春季学術講演会@神奈川 2013/3/27-30

20. 守友浩, 赤羽隆弘, 米澤宏平, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元「低分子有機太陽電池 SMDPPEH/PC70BM の電荷生成ダイナクス」第 60 回応用物理学会春季学術講演会@神奈川 2013/3/27-30
21. 米澤宏平, 上岡隼人, 安田剛, 韓礼元, 守友浩「低バンドギャップ有機薄膜太陽電池の電荷生成ダイナクス」第 60 回応用物理学会春季学術講演会@神奈川 2013/3/27-30
22. 松田 智行・守友 浩「プルシアンブルー類似体薄膜のイオン電池正極特性」錯体化学会第 6 2 回討論会@富山 2012/9/21-23
23. Tomoyuki Matsuda, "Coordination polymer electrode for Li-ion battery cathode", ICC40@Valencia, Spain 2012/9/9-13
24. 岡本淳, 中尾裕則, 小林航, 石渡晋太郎, 田中新, 寺崎一郎, 村上洋一, “室温強磁性 Sr₃YCo₄O_{10.5} の軟 x 線散乱・分光研究 II”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/9/19, 横浜
25. 岡本淳, 中尾裕則, 小林航, 石渡晋太郎, 田中新, 寺崎一郎, 村上洋一, “室温強磁性 Sr₃YCo₄O_{10.5} の軌道秩序・磁気散乱の観測”, 第 26 回日本放射光学会年会, 2013/1/13, 名古屋
26. W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Thermal Hall effects of bismuth and antimony”, IUMRS-ICEM2012, 2012/9/23, Yokohama

ポスター発表

1. W. Kobayashi, T. Shimono, D. Tanabe, and Y. Moritomo, “Structural response of P2-type Na_xMnO₂ against Na⁺ intercalation”, Gordon Research Conferences: Nanomaterials for Applications in Energy Technology, 2013/2/3, Ventura
2. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Intrinsic rapid Na⁺ intercalation observed in Na_xCoO₂ thin film”, Gordon Research Conferences: Nanomaterials for Applications in Energy Technology, 2013/2/3, Ventura
3. W. Kobayashi, and Y. Moritomo “Thermoelectric properties of transition-metal oxides with low dimensionality” 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18
4. W. Kobayashi, T. Shimono D. Tanabe, T. Hirano, N. Hamada and Y. Moritomo, “Structural Investigation of Layered Rock-Salt Na_{0.7}MyMn_{1-y}O₂ (M=Fe, Co)”, 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18
5. T. Shibata, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Thermal Hall Effect in Antimony” 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18
6. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, “Charge generation dynamics in Low-Gap Organic Photovoltaic”, 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18
7. M. Takachi, T. Matsuda, Y. Moritomo, “Electronic phase transition driven by electrochemical Li⁺-doping in cobalt hexacyanoferrate”, 4th Tsukuba-Hsinchu joint symposium@Tsukuba 2012/12/17-18
8. Y. Moritomo, K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, and L. Han, “Fast Carrier Formation from Acceptor Exciton in Low-Gap Organic Photovoltaic”, 2nd German-Japanese Workshop@Disburg, 2012/7/9

9. K. Yonezawa, H. Kamioka, T. Yasuda, L. Han, and Y. Moritomo, "Fast Carrier Formation from Acceptor Exciton in Low-Gap Organic Photovoltaic", 第1回有機系太陽電池つくば地区研究会@筑波、2012/6/11
10. 小林 航, 下野貴弘、守友浩「電気化学的手法を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ へのリチウムインターカレーション」物構研サイエンスフェスタ@筑波 2013/3/14
11. 高地 雅光, 松田智行、守友 浩「イオン二次電池正極材料としてのプルシャンプルー類似体」物構研サイエンスフェスタ@筑波 2013/3/14
12. H. Kamioka, T. Shibata, Y. Moritomo, S. Nozawa, T. Sato and S. Adachi, "Time-resolved XAFS spectroscopy for the electronic phases in cyano complexes", 物構研サイエンスフェスタ@筑波 2013/3/14
13. T. Shimono, W. Kobayashi, H. Nitani, R. Kumai, and Y. Moritomo, "Electrochemical lithium intercalation into $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ ", XXIst International Symposium on the Jahn-Teller Effect, 2012/8/26, Tsukuba
14. T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Lithium intercalation properties of manganese-iron Prussian blue analogues", XXIst International Symposium on the Jahn-Teller Effect, 2012/8/26, Tsukuba

<受賞>

1. 米澤宏平君が Excellent Student Poster Award of The 4th Tsukuba-Hsinchu Joint Symposium of Interdisciplinary Nano-Science and Technology (4th Tsukuba-Hsinchu SINST)を受章
2. Y. Moritomo, H. Kamioka, T. Shibata, S. Nozawa, T. Sato, and S. Adachi, "Photoinduced Phase Transition into a Hidden Phase in Cobalt Hexacyanoferrate as Investigated by Time-Resolved X-ray Absorption Fine Structure", J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033601 (2013). が JPSJ の Editors' Choice に選ばれる。

<特許>

1. 特願 2012-165428, 守友 浩、松田智行、電極材料の製造方法、電池および電極部材」、筑波大学、2012/7/26
2. 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)

<その他>

1. 新聞記事

NC F90薄膜を光励起 隠れた準安定相形成 示唆

—筑波大・物構研などが成果—



筑波大学物構研（物性構造研究室）の守友浩教授（左）と、同研究室の大学院生（右）が、NC F90薄膜の光励起による準安定相形成のメカニズムを明らかにした。この成果は、筑波大学の研究成果として、科学雑誌『Nature Communications』に掲載された。

NC F90薄膜は、有機半導体として広く利用されている。しかし、その光励起による準安定相形成のメカニズムは、これまで不明であった。守友浩教授は、このメカニズムを明らかにするために、X線回折や分光測定などの実験を行った。その結果、NC F90薄膜の光励起により、隠れた準安定相が形成されることが明らかになった。この結果は、NC F90薄膜の光励起による準安定相形成のメカニズムを明らかにし、有機半導体の光励起による準安定相形成のメカニズムの解明に貢献する。

守友浩教授は、この研究成果について、「NC F90薄膜の光励起による準安定相形成のメカニズムを明らかにすることは、有機半導体の光励起による準安定相形成のメカニズムの解明に大きく貢献する」と述べている。

この研究成果は、筑波大学の研究成果として、科学雑誌『Nature Communications』に掲載された。筑波大学の研究成果として、科学雑誌『Nature Communications』に掲載された。

科学新聞 2013/3/18

NHK茨城県のニュース 水戸放送局

首都圏NEWS WEB

放射性Cs除去剤開発



鉄やマンガンなど安価な金属を使って水に溶けた放射性セシウムを取り除く除去剤を筑波大学の研究チームが開発しました。

新たな除去剤を開発したのは筑波大学数理物質系の守友浩教授の研究チームです。

研究チームは鉄の化合物やマンガンなどのイオンが、水溶液中で結晶構造をつくる性質に着目し、水に溶けたセシウムイオンをこの結晶構造中に閉じ込めて沈殿させる除去剤を考案しました。

NHK水戸放送 2012/7/20

科研費による 最近の研究成果

トビックス

科学研究補助事業(科研費)により支援する学術研究では、毎年度、数多くの優れた研究成果が生み出されています。本欄では、科研費による最近の研究成果トビックスを紹介しています。今回は、筑波大学数理物質系の守友教授の研究成果ですが、本記事は、文部科学省・日本学術振興会が四半期待に発行している「科研費NEWS2013年度VOL.2」に掲載されているものの一部です。

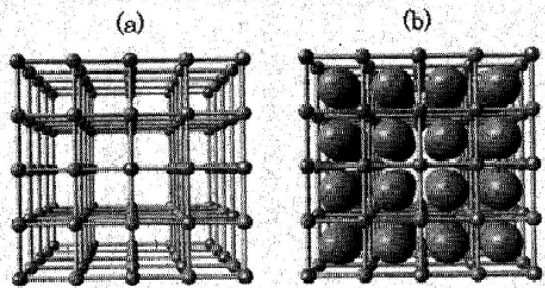


筑波大学数理物質系教授
守友 浩

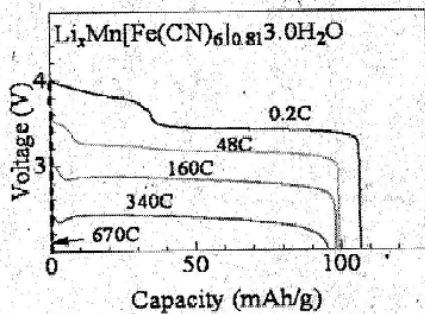
【研究の背景】

リチウムイオン電池はスマートフォンやモバイルPCには欠かせない部品であるだけでなく、電気自動車の電動や高容量の蓄電池への応用が期待されています。リチウムイオン電池材料の研究開発の主流は酸化リチウム材料で、現在、LiCoO₂が主要な材料として使われています。LiCoO₂は、3次元配位高分子構造を有する層状構造を有する材料で、充放電時に、Li⁺が層間を移動して電気を運ぶことが出来ます。リチウムイオン電池は、他の電池に比べて容量が大きくサイクル特性(何回でも充電できる)が高いという特徴を持っています。しかしながら、大きな電流を取り出すことが出来ず、出力密度が小さいという欠点があります。出力密度を向上させるには、高速でリチウムイオンを出し入れしなくてはなりません。

リチウムイオン電池に新材料： 配位高分子への期待



【図1】フルシアンブルー類似体の模式図。
(a) 充電時、(b) 放電時。大きな赤い丸はリチウムイオンである。



【図2】放電曲線の、放電速度依存性。一定の電流を取り出しながら、電池の電圧を測定している。340Cと670C分の1秒で電池を空にする電流値。

この化合物では、リチウムイオン化合物Li_xMn[Fe(CN)₆W_zO₆]・nH₂Oの出入り口が広いだけでなく、その経路が三次元的に広がっています(図1)。そのため、高速でリチウムイオンを出し入れできることが期待されます。

この化合物では、リチウムイオン化合物Li_xMn[Fe(CN)₆W_zO₆]・nH₂Oの出入り口が広いだけでなく、その経路が三次元的に広がっています(図1)。そのため、高速でリチウムイオンを出し入れできることが期待されます。この化合物では、リチウムイオン化合物Li_xMn[Fe(CN)₆W_zO₆]・nH₂Oの出入り口が広いだけでなく、その経路が三次元的に広がっています(図1)。そのため、高速でリチウムイオンを出し入れできることが期待されます。

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

【研究の成果】

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

フルシアンブルー類似体は、配位高分子として利用するには、材料を粉末化する必要がある。第一に、フルシアンブルー類似体はナトリウムイオンが充放電時に高いリチウムイオン拡散係数を示すことが挙げられても、粉末材料においてもこの優れた電池特性の実現を目指すとともに、大出力リチウムイオン電池と安価なナトリウムイオン電池の開発研究を

平成22年度 特定領域研究「光動起による」
ノボラフスシオン結体の物質移動と物性制御
平成21年度 基礎研究(A)「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

2012/4/16

セシウム高効率除去

筑波大、沈殿させ濃度低下

【つば】筑波大学の研究者らは、放射性物質であるセシウムイオンを除去する材料として注目されている「プルシアンブルー」の一種であるアルシアンブルーに似た物質を使用して、セシウムイオン濃度を100ppmから10ppmまで低減させることに成功した。この物質は、セシウムイオン濃度が0.1ppmまで低減した。また、汚染水に加える必要がなくなり、放射性物質の除去に役立つと期待される。

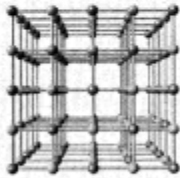
日経産業新聞 2012/4/16

100ppmのセシウムイオン溶液 10万分の1まで除去

2012/4/16
日経

筑波大が除染技術 プルシアンブルー活用

筑波大学の研究者らは、放射性物質であるセシウムイオンを除去する材料として注目されている「プルシアンブルー」の一種であるアルシアンブルーに似た物質を使用して、セシウムイオン濃度を100ppmから10ppmまで低減させることに成功した。この物質は、セシウムイオン濃度が0.1ppmまで低減した。また、汚染水に加える必要がなくなり、放射性物質の除去に役立つと期待される。



プルシアンブルーは、セシウムイオンが溶け込んだ結晶構造を形成する。この物質は、セシウムイオン濃度を100ppmから10ppmまで低減させることに成功した。この物質は、セシウムイオン濃度が0.1ppmまで低減した。また、汚染水に加える必要がなくなり、放射性物質の除去に役立つと期待される。

日刊工業新聞 2012/4/16

IX-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助教	森下将史
大学院生	友利ひかり (数理物質科学研究科博士課程2年)、 田邊真一 (同博士課程 (社会人早期修了プログラム)、NTT 物性科学基礎研) 幸坂健史、貫井洋佑、松下慎平 (同修士課程2年) 稲垣匠哉、大賀和人、軽部大雅、仁平慎太郎、廣瀬桃子 (同修士課程1年)
卒業研究	片倉健太 (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。

【1】グラフェンの電気伝導 (友利、貫井、仁平、片倉、神田)

(1) グラフェンへの局所歪み導入による電気伝導の変調 (友利、神田)

グラフェンは、格子歪みによってゲージ場が生成するという特殊な性質を持つ。これをうまく利用すると伝導ギャップを生成することも可能であり、グラフェンを用いたエレクトロニクス創成のためのブレークスルーになる可能性がある。我々は、グラフェンと基板の間にレジストでできたナノ構造を挿入することにより、グラフェンに任意の 패턴の局所歪みを導入することに成功した。顕微ラマン分光における2Dバンドのレッドシフトから歪みの空間分布を推定した。この方法を用いて、伝導ギャップが生成すると理論予測されている局所1次元歪みをグラフェンに導入し (図1)、伝導測定を行った。その結果、伝導ギャップの生成を示唆するデータが得られたが、電気伝導率はゼロにはならなかった。その原因として、平均自由行程内における歪みの変化量が小さいことが考えられる。すなわち、伝導ギャップの生成には、平均自由行程を伸ばすか歪みの空間変化量を大きくする必要がある。

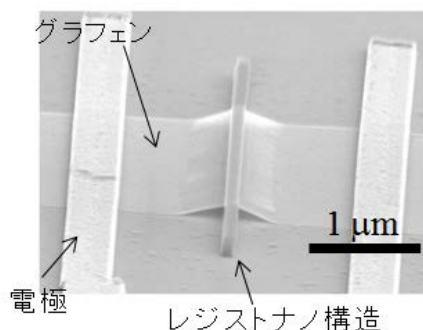


図1: レジストナノ構造を用いたグラフェンへの格子歪みの導入

(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・吸着分子の影響やフォノン散乱等が挙げられるが、いずれが主要因であるかを直接的に示した実験はいまだ存在しない。我々は、移動度に対する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、室温および低温において、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。その結果、十分に厚い試料では、上面移動度が下面移動度よりも5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。さらに低温において測定したところ、上面・下面移動度ともに温度の低下とともに増加するものの、その比は、十分に厚い多層グラフェンでは4 Kにおいても4倍程度あることが分かった。これより、現在よく作製されているSiO₂上のグラフェンFET（電界効果トランジスタ）では、SiO₂上にある荷電不純物によるクーロン散乱が移動度を低減させる主要因であることが明らかとなった。

(3) SiO₂/Si 基板上へのグラフェンの直接成長（片倉、神田）

グラフェンを合成する有力な方法の一つに、金属触媒を用いた化学気相成長法(CVD)がある。従来のCVD成長法では、グラフェンは触媒金属上にできるので、デバイスに使用する際には、触媒を除去し、絶縁体基板上にグラフェンを転写するという複雑なプロセスを経る必要があった。これを簡略化する方法として、絶縁体基板上にグラフェンを直接CVD成長する方法が近年提案され、注目を集めている。我々は、触媒金属の種類や成長条件を調整し、ラマンDバンド強度が大幅に減少し、欠陥の生成が抑制されたグラフェンの合成条件を見出すことに成功した。

(4) h-BN 上グラフェンの電気伝導の測定（仁平、神田）

グラフェンは、移動度が高くスピン軌道相互作用が小さいのでスピン緩和長が長いと考えられ、スピントロニクス分野への応用が期待されている。スピン緩和長とは、注入したスピン偏極電流にスピンの偏りがなくなるまでの距離を言い、グラフェンに対する理論計算では荷電不純物やフォノンの影響を考慮しても数mmに達すると予測されている。しかし、実験的に求められたスピン緩和長は数 μm にとどまっている。これは理論では考慮されていないスピン緩和機構があることを示す。本研究では、SiO₂基板上のグラフェンに存在するリップル（凹凸）に起因するスピン軌道相互作用に着目し、実験的にリップルを除去できることが知られているh-BNを基板として用いることを考えた。そこでまず、h-BN上にグラフェンを転写して電極を接続し、その移動度やスピン緩和長を測定した。その結果、低温で移動度はおよそ2万 cm^2/Vs となったが、この値は報告されている値の数分の1である。この原因を調べるためにAFMでグラフェンを観察したところ、グラフェン表面に高さ数nmから十数nm、幅数百nmの凹凸がみられた。今後はこの凹凸を除去する方法を探り、スピン信号測定によるスピン緩和長の評価を目指す。

本研究は、物質材料研究機構の塚越一仁MANA主任研究者、小松克伊ポスドク研究員（パイ電子エレクトロニクス研究グループ）の指導のもと行われた。

(5) SiC(0001)上1層及び2層グラフェンの電気伝導特性（田邊、神田、大塚）

社会人早期修了プログラムによりNTT物性基礎研の田邊真一氏が入学し学位論文をとりまとめた。広く用いられているグラファイトの剥離によって得られるグラフェンは高品質であるものの、その大きさは高々数百 μm 平方であり、応用において今後の研究を加速するためには、高品質かつ大面積な少数層グラフェンを得る手法の開発が不可欠である。田邊は、SiC基板を熱処理することで得られる4種類の面積グラファイト薄膜の伝導特性を総合的に調べ、剥離法やCVD法によるグラフェンと比較・検討した。

【 2 】 スピンホール効果の磁氣的観測（松下、大塚）

スピン・軌道相互作用によって生じるスピンホール効果はスピン関連伝導において最も基本的な現象の一つであるがまだその定量的な理解には至っていない。これまで金属におけるスピンホール効果の研究では、強磁性金属からの電流注入やスピンポンピングによる注入されたスピン流が引き起こす逆スピンホール効果による起電力測定が用いられてきた。我々是非磁性金属に電流を流した

時スピンホール効果によって細線エッジ部分に生じるスピンの蓄積を磁的に検出するという実験を行った。試料はスピン-軌道相互作用の強い白金細線であり、細線エッジをまたぐように配置したマイクロSQUIDによって局所磁場を測定する。SQUIDで補足された磁束から白金を流れる電流による寄与を差し引くことによって蓄積スピンによる寄与を算出した。これから概算された蓄積スピン量は逆スピン効果の実験から評価したものと大きくは変わらない。なお、本研究は齋藤政通氏（現：アルバックライオ（株））との共同研究である。また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。

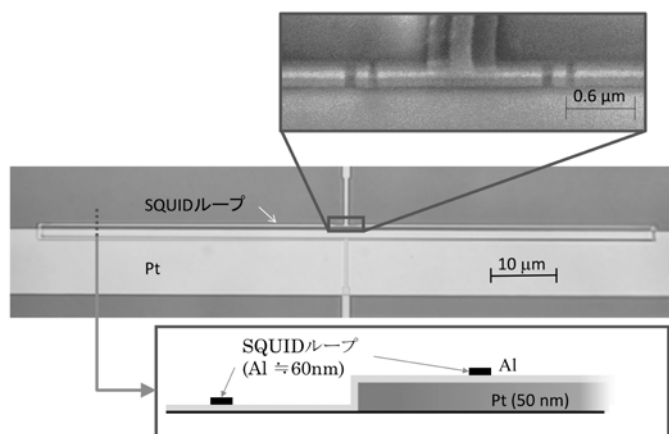


図2：エッジ蓄積磁化測定用試料の構造

【 3 】 単分子伝導の研究：C₆₀分子架橋の電気伝導（幸坂、大塚）

機械破断接合 MBJ を用いた単分子架橋においては分子と電極金属の結合部位の詳細な構造を制御することは困難であり、多数の接合に関する電気伝導測定の結果を統計的に解析する方法がとられてきた。架橋分子の電子状態を静電的に制御する単分子トランジスタ構造が実現できれば測定の自由度が増え、より詳細な研究が可能となる。我々は2層構造の金属細線に機械破断 (MBJ) 法を適用するという方法と絶縁されたゲート電極上で金属細線に電界移動 (Electromigration) を施すという二つの方法によって単分子トランジスタの実現を目指した。架橋分子はC₆₀分子である。前者ではAl/AlO_x/C₆₀・Al という積層構造を持つMBJ用細線試料をまず作製し、MBJによって上層電極にAl-C₆₀-Al架橋を実現しつつ、下層Alをゲート電極に用いるというアイデアである。当初上下層間の電氣的リークに悩まされたが、プロセスを工夫することによって十分な絶縁性を実現できた。低温でのMBJ実験で、層間の絶縁を保ったまま上下層それぞれについて破断・再接合できることを確認した。ただし、破断・再接合の繰り返し可能回数は1層試料の場合より格段に少なく、容易に非可逆的な変形が生じてしまう。このため得られた接合数は少なく、明瞭なゲート依存性を示す接合を得るにはいたらなかった。後者では高ドーピング Si ウェハ基板上に金細線を作製し、C₆₀希薄溶液を滴下・乾燥させた。金細線に大電流を流すと電解移動によって金原子が移動し、最終的には細線が破断する。細線の電気抵抗をモニターしながら電流を徐々にあげることによって量子抵抗以上の抵抗を持つ金細線を作り、Si基板をゲート電極としてその電流・電圧 (I-V) 特性、ゲート変調特性を調べた。低温でのI-V特性は多くの場合非線形であり、解析によって単一トンネル接合とクーロンブロッケードを伴う2重トンネル接合とに分類できた。しかし、いずれの場合もゲート電圧による明瞭な変調は見られなかった。ソース、ドレイン電極による遮蔽を減らし、ゲート電極と架橋C₆₀分子の間の静電容量を増やす対策が必要である。

【 4 】 鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x のポイントコンタクトスペクトロスコピー（稲垣、大塚）

鉄系超伝導体の超伝導状態は複数のオーダーパラメータを持つとともに、電子ポケットと正孔ポケットのオーダーパラメータの符号は互いに異なるとされる。しかし、実験的な検証は未だ十分ではない。前年までに鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x に対して Au あるいは Pt 探針を用いた S-N ポイントコンタクトスペクトロスコピーの測定を行い、少なくとも3つの超伝導ギャップがあることを明らか

にした。今年度は対向電極も超伝導針とした S-S'ポイントコンタクトスペクトロスコピーを行った。理論によればこのようなナノコンタクトでは超伝導電流が流れると共に多重アンドレーエフ反射による非線形な I-V 特性が期待される。Nb および Pb を探針として、液体ヘリウム温度で様々なコンタクトの I-V 測定を行ったがこれまでの所多重アンドレーエフ反射を反映したと思われる構造は得られていない。また $1\text{k}\Omega$ 以下の低抵抗接合でも電圧ゼロの超伝導電流は見られていない。Nb-Pb の S-S'ポイントコンタクトでは理論から期待される構造が見られていることから、鉄系試料表面の汚れやダメージなどが原因であると考えられる。なお、本研究で用いた $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ は小野田研究室で作製された結晶試料であり、小野田雅重准教授に感謝する。

【 5 】 トンネル接合型マイクロ SQUID (大賀、廣瀬、大塚)

過去5年ほど微小トンネル接合型マイクロ SQUID の研究を行っており、作製した SQUID は上記【 2 】の研究などに利用している。さらに応用範囲を広げることが目的として、今年度は以下の開発を進めた。

(1) SQUID をセンサーとしたプローブ顕微鏡の開発 (大賀)

走査型 SQUID 顕微鏡は既に複数の開発報告があるが、マイクロ SQUID を用いることによって 1 T 程度までの高磁場中でのイメージングが可能な装置の開発を目指す。まず SQUID に対してサンプルを動かす低温 XY 可動ステージを作製した。このようなステージにはピエゾ素子を用いることが一般的であるが、我々は加・減圧によるベローズの伸縮を駆動力としたステージを試みることにし、設計を行った。

(2) Nb を用いたトンネル接合型マイクロ SQUID の開発 (廣瀬)

高温・高磁場環境での計測を行うために、これまで用いてきた Al より超伝導転移温度の高い Nb を使ったトンネル接合型マイクロ SQUID の作製を目指した。Nb 薄膜細線の超伝導性の劣化を防ぐために、PES を用いた 3 層レジスト法を採用した。これまでに約 5 K で超伝導転移する細線を得ている。トンネル障壁はスパッタアルミナ薄膜を利用する予定であり、Nb 蒸着と AlO_x の Ar スパッタを連続真空中で行う装置を作製した。

【 6 】 グラファイト上吸着ヘリウム 4 薄膜の固化 (森下)

原子レベルで平坦なグラファイト表面に、低温で物理吸着したヘリウム薄膜は均一性が良く、層構造が良く定義されており、理想的な 2 次元系を与える。フェルミ粒子であるヘリウム $3(^3\text{He})$ の場合、核スピン $1/2$ をもち、この固体は 2 次元量子スピン系のモデル物質を与える。一方、ボーズ粒子であるヘリウム 4 (^4He) では、基底状態として存在する空孔子 (零点空孔子) がバンド構造をとることに由来する固体の超流動の出現が期待されている。これらの系を、 $100\ \mu\text{K}$ 以下に至る超低温度までの熱容量・熱伝導測定を中心に観測し、研究を行っている。

吸着第 2 原子層に着目すると、 ^3He も ^4He も面密度の増大とともに流体相から第 1 原子層に対して $4/7$ の面密度をもつ整合な固相、所謂「 $4/7$ 相」に移行すると考えられている。 ^4He 薄膜においては、 $4/7$ 相近傍の面密度領域で、力学応答測定により超流動的な振る舞いも観測され、固体の超流動が実現している可能性が議論されている。しかし、最近の理論計算により、 ^4He 薄膜における $4/7$ 相の存在に疑念が生じており、固相なのか流体相なのか状態を実験面から決定する必要がある。

純粋な ^4He は磁化をもたず、熱容量も小さいため、観測から状態を決定することは困難であるため、昨年度、数%程度の ^3He を混入し、その熱容量を測定することにより状態の決定を試みた。薄膜が流体相であれば ^3He はフェルミガスとして振る舞い、その熱容量は低温では温度に比例し、高温では古典ガスの値に近づくことが期待される。一方、固相では、 ^3He は局在し、熱容量は消失し、流体とは明らかに異

なる振る舞いをするため、状態について決定的な情報が期待できる。実際に測定を行ってみると、4/7相の面密度で熱容量は劇的に減少するものの、完全に消失はしない。これは、 ^3He - ^4He 混合薄膜が ^3He 濃厚相と ^4He 濃厚相に相分離し、 ^3He 濃厚相のみが固化したものと理解できる。これは、 ^4He 濃厚相は固化していないことを示し、純粋な ^4He も固化しないことを示唆していた。

しかしながら、完全に消失せずに残った熱容量について、別の可能性も考えられる。即ち、相分離した混合薄膜は、昇温とともに混合比が変化する可能性である。この場合、混合が熱容量の寄与を与えるため、消失せずに残った熱容量が混合に由来している可能性が残される。そこで、混合する ^3He の量を相分離が生じない程度に一桁以上減らして同様の測定を行った。この測定は、熱容量が非常に小さくなり、フォノン由来の熱容量すらも差し引く必要があり、非常に精密な測定が要求される。結果は面密度を変えても4/7相の面密度の近傍で熱容量は変化せず、 ^4He 薄膜は4/7相には固化しないことが非常に強く示唆される。超流動体的な振る舞いは固体に由来するものでないことは明らかとなったが、流体相に由来してもreentrantな振る舞いを説明することができない。また、4/7相存在の証拠とされていた数K領域での熱容量ピークの起源も原因が不明になった。

<学位論文>

田邊真一: Electronic transport properties of monolayer and bilayer graphene on SiC(0001) (数理工学物質科学研究科, 博士論文, 2013年3月) (早期修了プログラム)

幸坂健史: C60単分子トランジスタの作製と単分子接合系の電気伝導の研究 (数理工学物質科学研究科, 修士論文, 2013年3月)

貫井洋祐: 酸化シリコン上に置かれた多層グラフェンの移動度不均一性 (数理工学物質科学研究科, 修士論文, 2013年3月)

松下慎平: 白金におけるスピンホール効果によるエッジ磁化の磁氣的計測 (数理工学物質科学研究科, 修士論文, 2013年3月)

片倉健太: シリコン基板上へのグラフェンの直接成長 (物理学類, 卒業論文)

<論文>

1. M. Hayashi, H. Yoshioka and A. Kanda, Supercurrent through Graphene: Effects of Vanishing Density of States, *J. Phys.: Conf. Ser.* 400, 022024 (2012).
2. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, Imaging of quantum Hall edge states under quasiresonant excitation by a near-field scanning optical microscope, to appear in *J. Appl. Phys.*
3. M. Morishita, Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Films on Graphite, *J. Low Temp. Phys.* (in press).

<解説>

1. A. 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, pp. 89-205, Pan Stanford Publishing (2013) (ISBN-13 978-981-4241-48-9). (117 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, pp. 179-188, World Scientific Publishing (2012). (ISBN 978-981-4329-35-4). (10 pages)

<講演>

国際会議

1. H. Tomori, H. Karube, Y. Ootuka, M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda, Introducing Designed Local Strain to Graphene, Graphene Week 2012, Delft University of Technology, Jun. 4-8, 2012.
2. A. Kanda, H. Tomori, H. Karube, Y. Ootuka, M. Hayashi, and H. Yoshioka, Electron transport in graphene with one-dimensional local strain, Graphene Week 2012, Delft University of Technology, Jun. 4-8, 2012.
3. H. Tomori, H. Karube, Y. Ootuka and A. Kanda, Electron Transport in Graphene with One-dimensional Local Strain, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Kyoto, Sep. 27, 2012.
4. H. Tomori, H. Karube, Y. Ootuka, and A. Kanda, Electron Transport in Graphene under Local Strain, 2012 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, Dec. 6, 2012.
5. H. Tomori, Y. Nukui, K. Katakura, Y. Ootuka, and A. Kanda, Strain Engineering of Graphene through a Nanostructured Substrate, The 4th Tsukuba-Hsinchu Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, Tsukuba, Dec. 17-18, 2012.
6. A. Kanda, Y. Nukui, H. Tomori, H. Goto, Y. Ootuka, Comparison of mobility at the top and bottom surfaces of multilayer graphene placed on SiO₂ substrate, 2013 APS March Meeting, Baltimore, Mar. 18-22, 2013
7. H. Tomori, H. Karube, Y. Ootuka, A. Kanda, Electron transport measurement in locally strained graphene, 2013 APS March Meeting, Baltimore, Mar. 18-22, 2013.
8. S. Mamyoda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, High resolution spatial mapping of quantum Hall edge states by a near-field scanning optical microscope, The Eighth International Nanotechnology Conference on Communications and Cooperation (INC8) , AIST (Tsukuba, Japan) 2012. 5. 8-12.
9. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, Imaging of Quantum Hall Edge States Under Quasiresonant Excitation by a Near-field Scanning Optical Microscope, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), ETH Zurich, 2012. 7. 30-8. 3.
10. M. Morishita, Heat Capacity of Dilute ³He-⁴He Films on Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2012) (Lancaster, August 20, 2012).

国内会議

1. 軽部大雅, 友利ひかり, 貫井洋佑, 仁平慎太郎, 片倉健太, 大塚洋一, 神田晶申、レジストドット列を用いたグラフェンの局所歪み量の評価、第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、2012年9月11日~14日
2. 友利ひかり, 軽部大雅, 大塚洋一, 神田晶申、1次元局所歪みを導入したグラフェンの電気伝導、第73回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、2012年9月11日~14日
3. 軽部大雅, 友利ひかり, 貫井洋祐, 大塚洋一, 神田晶申、グラフェンの非一様歪みの電子顕微鏡像による評価、日本物理学会2012年秋季大会、横浜国立大、2012年9月20日
4. 友利ひかり, 軽部大雅, 貫井洋祐, 大塚洋一, 神田晶申、1次元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2012年秋季大会、横浜国立大、2012年9月20日
5. 大賀和人, 齋藤政通, 松下慎平, 廣瀬桃子, 大塚洋一、トンネル接合型マイクロ SQUID の広帯域測定、日本物理学会2012年秋季大会、横浜国立大、2012年9月19日

6. 幸坂健史, 大塚洋一, 2層MBJ法による単分子トランジスタの作製、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大、2012 年 9 月 20 日
7. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, Optical excitation energy dependence of high resolution mapping of quantum Hall edge states, IUMRS-ICEM2012(第 22 回日本 MRS 学術シンポジウム), 横浜 (パシフィコ横浜), 2012. 9. 23-28.
8. 伊藤宙陸, 柴田祐輔, 間明田周平, 柏谷聡, 山口真澄, 赤崎達志, 田村浩之, 大塚洋一, 野村晋太郎, 量子ホール端状態における非平衡電子の注入, 第 7 回DYCEシンポジウム, 東京大学, 2012. 12. 25-27.
9. 友利ひかり, 軽部大雅, 大塚洋一, 神田晶申, グラフェンへのダメージを軽減した歪み導入法の開発, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学 (厚木)、2013 年 3 月 27 日~30 日
10. 森下将史, グラファイト上へリウム 4 薄膜吸着第 2 原子層の状態、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大、2012 年 9 月 20 日

<受賞>

1. Hikari Tomori: Excellent Poster Award, The 4th Tsukuba-Hsinchu Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology (Dec. 16-17, 2012).

XI 物理教育および物理教育の研究

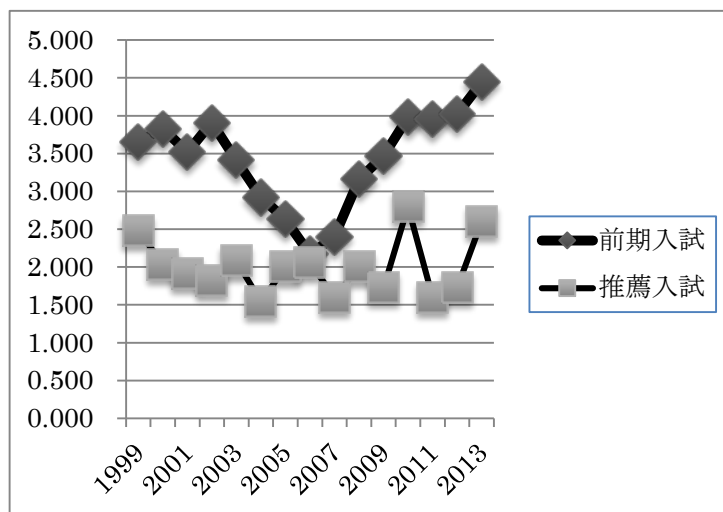
【1】 物理教育

(1) 学類教育 (受川史彦)

平成 24 年度は、2007 年 4 月にそれまでの第一学群自然科学類物理学主専攻が改組されて理工学群物理学類が発足してから 6 年目である。4 月には 65 名が 1 年次に入学し、また 66 名の 4 年次学生が各研究室に配属され卒業研究を行った。平成 24 年度の卒業生は 63 名であり、その進路は、大学院進学が 49 名、就職が 7 名（民間企業 5 名、教員・公務員 2 名）、その他（進学準備中など）7 名である。

物理学類の教育は、カリキュラム委員会にて審議・検討し、学類教育会議に諮り最終的な決定を行う。平成 24 年度には、平成 25 年度から実施されることになった 2 学期制への移行に伴うカリキュラムの変更・再編の準備を行った。外的拘束条件を充たすだけでなく、学生が系統的に学べるよう科目の整備を行った。また、近年の入学生の大規模なスペクトルに対応するため、能動的な学習を促進するための科目（課題探究実習、少人数セミナー）を継続して開講し、主要科目においては講義と演習を一体化した形式での授業を導入（年次進行）して 2 年目となった。さらに、1 年次での大学の物理でのつまづきをなくすため、夏休みに 1 学期科目（力学、電磁気学）の補習を行った。物理実験においては、物理学実験 III において宇宙観測のテーマを新設し、学生は年間に 6 テーマの実験を行うことになった。1・2 年次の物理学実験では、2 学期制移行に伴い、内容の統合や新テーマの導入を行うための準備を完了した。また、教育の効率化と学生の能動的学習の支援のため、e-ラーニングを活用している。特に専門分野に特有の英語の教育のためのシステムを強化した。

物理学類の在籍者は、1 年次 65 名、2 年次 67 名、3 年次 88 名、4 年次 68 名である。本年度に行われた入学試験は、実施時期の順に、編入学試験（志願者 16 名、合格者 2 名）、帰国生徒特別入試（志願者なし）、アドミッションセンター入試（志願者 8 名、合格者なし）、国際科学オリンピック特別入試（志願者 3 名、合格者 1 名）、推薦入試（志願者 39 名、合格者 15 名）、個別学力検査・前期日程（志願者 193 名、合格者 47 名）である。2013 年 4 月には 63 名が入学した。個別学力検査（前期日程）と推薦入試の志願倍率の推移を図に示す。前期日程入試は、物理学類の発足以降回復し、ここ数年は高い倍率で推移している。平成 25 年度入学者に対しては約 4.5 倍であった。



(2) 大学院教育 (石橋延幸)

物理学専攻では、専門分野における独創的な研究能力と科学技術に対する柔軟な応用力を具えた研究者・高度職業人を養成することを目標に教育活動を行っている。平成24年度より物質・材料工学コースの4名の教員(宇治, 大野, 迫田, 胡)が物理学専攻の教育に参加することになり、より幅広い分野の人材育成が可能になった。

教育の向上に関しては、学類と同様にカリキュラム委員会にてその内容を審議し、教員会議に諮り最終的な審議、承認を行っている。平成24年度は、平成25年度から始まる2学期制の導入に合わせて授業科目の再編・修了要件の見直し等について議論を行った。

大学院入試は、7月の推薦入試(前期課程のみ、定員15名)と、8月と2月に一般入試(前期課程定員35名、後期課程定員20名)を行っている。今年度の入試結果は下の表の通りである。5月に行われるオープンキャンパスや各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外からも多くの受験生を集めている。

前期課程

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)	入学者数 (外部)
7月	35 (13)	21 (7)	18 (5)
8月	58 (28)	50 (21)	37 (12)
2月	17 (14)	8 (7)	6 (5)

後期課程

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)	入学者数 (外部)
8月	4 (0)	3 (0)	3 (0)
2月	8 (1)	8 (1)	8 (1)

平成24年度の就職進学状況は下の表のようになっている。前期課程から後期課程への進学率が高いこと・後期課程修了後も研究員等として研究を続ける学生が多いことが物理学専攻の特徴である。

前期課程

進学	企業	独法	教員	公務員	就職活動中等
13	25	0	0	1	4

後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	職場復帰
0	6	0	0	0	1

【2】体験学習 (梅村雅之)

物理学類では、大学における物理学の教育の内容を高校生に知ってもらうために、体験学習を毎年実施している。平成24年度は、8月1日(水)に実施し、52名の参加者があった。学類長の説明のあと、物理学に関する講義4件を開講し、その後、物理学実験(参加者は4テーマのうちからひとつ選択)と在学生との懇談を行い、さらに希望者は学内のセンターの見学を行った。

具体的な内容と時間進行は以下の通りである。

9:30- 9:40	物理学類長挨拶, 事務連絡	(受川史彦)
9:40-10:00	物理学類説明, 実験内容説明, アンケート	(梅村雅之, 坂本瑞樹)
10:05-10:40	【講義 1】 素粒子	(金谷 和至)
10:45-11:20	【講義 2】 原子核	(矢花 一浩)
11:25-12:00	【講義 3】 宇宙	(中井 直正)
12:00-13:00	昼食	
13:00-13:35	【講義 4】 物性	(岡田 晋)
13:40-13:50	実験の組み分け	(坂本瑞樹)
13:50-16:30	【物理実験】	
	① 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	(冨本 慎一)
16:35-17:00	質疑応答・在学生との懇談	(受川史彦, 梅村雅之)
17:00-17:20	修了式	(受川史彦, 梅村雅之)
17:30-18:00	計算科学研究センター見学 プラズマセンター見学	

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

【3】カリキュラム関係（梅村雅之）

平成 24 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. 2 学期制移行に伴うカリキュラム再編

【理工学群物理学類】

- 1) 専門基礎科目，専門科目について，全科目を，基本的に春 abc（春学期），秋 abc（秋学期）の 2 学期制科目に移行する方針のもと，3 学期制科目の内容を勘案した物理学類開設授業科目再編案を策定した。
- 2) 再編案に従って，重複履修制限と科目の読み替えの対応を決定した。
- 3) 新科目に対応させた履修細則の読み替え表を，入学年次毎に作成した。その際，履修可能単位数の変更に伴い，卒業研究履修条件の修得単位数を現行の“100 単位以上”から“95 単位以上”とすることとした。
- 4) 再編案に従った物理学類授業時間割を作成した。
- 5) 2 学期制授業科目に基づく教職授業科目の設定について検討し，重複履修の制限等を勘案し「教科に関する科目」を変更した。

【数理物質科学研究科物理学専攻】

- 1) 2 学期制移行に伴い，共通科目を整理，縮減する方向で改定案が策定された。
- 2) 基礎科目 4.5 単位修得の条件を撤廃し，合計修得単位 30 単位のみを設定することとした。
- 3) 専門科目については，各分野で見直しを行うと共に，各分野のセミナーを開講する方針とした。

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。
- (イ) 物理学の教育では，講義による知識の吸収と，知識をさらに深く理解するための演習形式の学習を統合した形の授業を力学，電磁気学，統計力学で実施した。
- (ウ) 講義資料の閲覧やレポートの提出などに，E-learning を積極的に活用している。
- (エ) 「理数学生応援プロジェクト」に専任教員を派遣した。
- (オ) 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24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	0	2	2	1	2	7	5	0	{ 1 }	[6]	12 { 1 } [6]
宇宙理論	4	4	2	2	0	12	1	0	{ 0 }	[5]	13 { 0 } [5]
原子核理論	1	5	1	2	1	10	0	1	{ 1 }	[5]	11 { 1 } [5]
非平衡統計物理	2	2	0	1	3	8	2	0	{ 0 }	[6]	10 { 0 } [6]
量子物性理論	1	0	0	0	1	2	1	0	{ 0 }	[2]	3 { 0 } [2]
ナノ量子物性	0	1	0	0	0	1	0	0	{ 0 }	[1]	1 { 0 } [1]
ソフトマター理論	2	0	1	1	1	5	0	0	{ 0 }	[3]	5 { 0 } [3]
半導体ナノ物性 (M2, D2創)	3	3	0	2	0	8	5	0	{ 0 }	[4]	13 { 0 } [4]
ナノ構造物性 (M2創)	2	1	0	0	0	3	3	0	{ 0 }	[2]	6 { 0 } [2]
生命物理	0	0	0	0	0	0	4	0	{ 0 }	[0]	4 { 0 } [0]
素粒子実験	2	8	1	1	2	14	3	0	{ 0 }	[7]	17 { 0 } [7]
宇宙観測	6	4	2	3	1	16	4	0	{ 0 }	[13]	20 { 0 } [13]
原子核高エネ	5	5	1	1	5	17	3	0	{ 0 }	[8]	20 { 0 } [8]
原子核低エネ	5	4	2	1	1	13	4	0	{ 0 }	[6]	17 { 0 } [6]
磁性物性	4	4	0	0	0	8	1	0	{ 0 }	[3]	9 { 0 } [3]
半導体物性 (M2, D2, D3創)	3	4	0	1	2	10	5	0	{ 1 }	[3]	15 { 1 } [3]
強相関物性	5	4	0	1	2	12	5	0	{ 1 }	[7]	17 { 1 } [7]
表面物性	0	0	0	0	0	0	3	0	{ 0 }	[0]	3 { 0 } [0]
低温物性	5	3	1	1	0	10	1	0	{ 1 }	[5]	11 { 1 } [5]
プラズマ	11	6	3	1	1	22	14	0	{ 0 }	[10]	36 { 0 } [10]
物資材料 (M2創)	1	1	/	/	/	2	0	0	{ 0 }	[0]	2 { 0 } [0]
合計	62	61	16	19	22	180	64	1	{ 5 }	[96]	245 { 5 } [96]
(創)	0	9	0	3	2	14	13	0	{ 1 }	[1]	27 { 0 } [1]

*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) 齋藤 華 [金谷 和至]
Finite density QCD in the heavy quark region
(クォーク質量が大きい領域での有限密度QCD)
- 2) 篠原 康 [矢花 一浩]
Study on coherent phonon generation based on time-dependent density functional theory
(時間依存密度汎関数理論に基づくコヒーレントフォノン生成の研究)
- 3) 埜 慶太 [金 信弘]
Search for the Standard Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs with the ATLAS Detector
(ATLAS実験における $H \rightarrow \tau \tau$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索)
- 4) 荒井 均 [中井 直正]
A Multi-Line Ammonia Survey of the Galactic Center Region with the Tsukuba 32-m Telescope
(つくば32m電波望遠鏡を用いた銀河系中心領域のアンモニア多スペクトル線掃天観測)
- 5) 坂田 洞察 [三明 康郎]
Measurements of azimuthal correlation between jets and charged particles at LHC-ALICE experiment
(LHC-ALICE実験におけるジェット荷電粒子方位角相関測定)
- 6) 柴田 恭幸 [守友 浩]
Electric Properties in All-Solid Ion-Transfer Device Fabricated with Transition Metal Cyanide Film
(シアノ錯体薄膜を用いた全固体イオン素子の電気特性)
- 7) 田邊 真一 [大塚 洋一]
Electronic transport properties of monolayer and bilayer graphene on SiC(0001)
(SiC(0001)上1層及び2層グラフェンの電気伝導特性)

【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) 崔 在敦 [金谷 和至]
Phase diagram at finite temperature and chemical potential in strong coupling limit of lattice QCD
(有限温度および化学ポテンシャルにおける格子 QCD の相図の強結合極限)
- 2) 安部 牧人 [梅村 雅之]
3次元輻射流体計算による紫外線輻射場中の星団形成過程の研究
- 3) 久保田 明夏 [梅村 雅之]
初代星形成における紫外線輻射の流体力学的効果
- 4) 五十嵐 朱夏 [森 正夫]
球対称定常銀河風の解析
- 5) 大野 純 [森 正夫]
GPUを用いた輻射流体力学シミュレーションの高速化
- 6) 赤堀 孝彦 [矢花 一浩]
低温領域におけるトリプルアルファ反応率の虚時間法を用いた研究
- 7) 植草 雅人 [矢花 一浩]
ハイブリッド汎関数を用いた電子ダイナミクス計算
- 8) 高宮 悠介 [矢花 一浩]
Kadanoff-Baym 方程式による原子分子の光応答の研究
- 9) 西山 了史 [矢花 一浩]
Gauss 基底展開法を用いた Gogny-TDHF による軽い核の線形応答
- 10) 阿部 将大 [有光 敏彦]
ベーテマン模型の量子化とその量子バサミへの応用—NETFD による解析—
- 11) 程 皞 [有光 敏彦]
量子欠の非平衡熱場理論による定式化
- 12) 須能 梓 [谷口 伸彦]
量子ドット干渉計におけるスピン流の非平衡生成：電子間相互作用の摂動論による解析
- 13) 田口 真彦 [白石 賢二]
Theoretical study on the absorption spectrum of light-harvesting antenna in photosynthesis based on time-dependent density functional theory and its application for the detection of biomarker in extrasolar planets
(時間依存密度汎関数理論に基づく光合成アンテナ部の吸収スペクトルの研究とそれを用いた系外惑星における生命指標検出に向けての検討)

- 14) 石橋 貴生〔受川 史彦〕
二重 SOI 層構造を持つ大面積電荷積分型 SOI ピクセル検出器の性能評価
- 15) 金井 伸也〔金 信弘〕
遠赤外光探索のためのニオブを用いた超伝導トンネル接合(STJ)検出器の開発研究
- 16) 永田 和樹〔金 信弘〕
ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の研究開発
- 17) 淵 遼亮〔金 信弘〕
ILC 用細分割電磁カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究
- 18) 今田 大皓〔中井 直正〕
南極 10m サブミリ波望遠鏡の光学系の開発
- 19) 齋藤 浩太〔中井 直正〕
南極サブミリ波望遠鏡の電気系統設計と評価試験
- 20) 土井畑 幸一郎〔中井 直正〕
南極可搬型サブミリ波望遠鏡アンテナ系の熱設計
- 21) 堀内 聖志〔三明 康郎〕
LHC-ALICE 実験 $\sqrt{sNN}=2.76\text{TeV}$ 鉛・鉛衝突における反応関与部・傍観部を用いた反応平面測定および方位角異方性の研究
- 22) 郡司 薫〔江角 晋一〕
LHC-ALICE 実験 $\sqrt{sNN}=2.76\text{TeV}$ 鉛・鉛衝突における荷電パイ中間子を用いた 2 粒子量子干渉効果の反応平面に対する方位角依存性の研究
- 23) 中込 宇宙〔江角 晋一〕
RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{sNN}=200\text{GeV}$ 金・金衝突におけるシリコン崩壊点検出器を用いた方位角異方性の η 依存性の研究
- 24) 船戸 龍〔江角 晋一〕
pythia シミュレーションを用いた 200GeV 陽子・陽子衝突における 2 粒子相関分布の粒子多重度依存性の研究
- 25) 渡邊 大介〔江角 晋一〕
LHC-ALICE 実験における $\sqrt{sNN} = 2.76 \text{ TeV}$ 陽子・陽子および鉛・鉛衝突での π^0 中間子-ジェット方位角相関の研究
- 26) 三田 浩希〔和田 道治〕
イオンガイドガスセルの為の表面電流を用いた静電レンズの研究
- 27) 錦織 良〔小沢 顕〕
Ca 同位体の荷電変換断面積の測定と荷電核半径の導出

- 28) 丹羽 崇博〔小沢 顕〕
不安定核核磁気モーメントにおける符号決定法の開発
- 29) 湯浅 暁玲〔小沢 顕〕
 ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p){}^9\text{Be}$ 反応における astrophysical S-factor の測定
- 30) 石橋 剛彦〔小野田 雅重〕
タボライト型二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{VPO}_4\text{F}$ 系の磁性と NMR
- 31) 稲垣 誠〔小野田 雅重〕
新型二次電池正極材料 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$ 系の開発と磁性
- 32) 岡本 大佑〔守友 浩〕
Si(100)表面における D₂ 分子線散乱ダイナミクス
- 33) 諸徳寺 匠〔守友 浩〕
金ナノ粒子配列構造の局在型表面プラズモン共鳴散乱とフェムト秒時間分解相関測定
- 34) 米澤 宏平〔守友 浩〕
低バンドギャップ有機薄膜太陽電池の電荷生成ダイナミクス
- 35) 石神 健太〔川本 徹〕
プルシアンブルー銅置換体のセシウム吸着機構の解明
- 36) 幸坂 健史〔大塚 洋一〕
C₆₀単分子トランジスタの作製と単分子接合系の電気伝導の研究
- 37) 貫井 洋佑〔大塚 洋一〕
酸化シリコン上に置かれた多層グラフェンの移動度不均一性
- 38) 松下 慎平〔大塚 洋一〕
白金におけるスピホール効果によるエッジ磁化の磁氣的計測
- 39) 赤羽 泰央〔坂本 瑞樹〕
GAMMA10 エンド部における HeI 線強度比法を用いた電子温度及び電子密度計測
- 40) 中林 英隆〔假家 強〕
28GHz-1MW ジャイロトロンの評価試験及び電子加熱実験における端損失熱流束生成
- 41) 上田 英明〔中嶋 洋輔〕
GAMMA 10 セントラル部における中性粒子ビーム入射による高エネルギーイオンの挙動
- 42) 秋田 大地〔吉川 正志〕
位相イメージング干渉計の改良と GAMMA10 西プラグ部の電子密度分布計測
- 43) 北出 崇二〔吉川 正志〕
GAMMA 10 紫外・可視分光測定システムにおける解析手法の改善

【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) 近藤 大生〔白石 賢二〕
Q/Nに富んだペプチドがつくるアミロイド線維の構造安定化機構の計算科学的解析
- 2) 吉崎 智浩〔白石 賢二〕
4H-SiC中の点欠陥の理論的検討
- 3) 寺田 泰晃〔岡田 晋〕
強結合近似による有機分子の電子状態計算
- 4) 村上 瑛〔舛本 泰章〕
時間分解カー回転測定法による半導体中の電子のスピンコヒーレンスの研究
- 5) 森 達哉〔舛本 泰章〕
GaAs:N中の単一不純物中心の共鳴蛍光
- 6) 柳井 瞬〔蔡 兆申〕
Study of Microwave Superconducting Resonators with High Kinetic Inductance
(高インダクタンス超伝導マイクロ波共振器の研究)
- 7) Bui Thi Kieu My〔大野 隆央〕
Two redox potentials cathode material Li_2MSiO_4 (M=Fe, Mn and Ni) for rechargeable
Li batteries: A first principles study
(Li二次電池正極材料 Li_2MSiO_4 (M=Fe, Mn and Ni)に関する第一原理計算)

物理学セミナー

平成24年度

	開催日	講師	題目
第1回	9月5日	中井 直正 (宇宙観測)	太陽系外の惑星の探査
第2回	9月12日	小林 航 (物性実験)	熱電変換の物理と最近の進展
第3回	9月26日	佐藤 勇二 (素粒子理論)	強結合グルーオン散乱振幅と弦理論
第4回	10月3日	森 正夫 (宇宙物理)	銀河における衝突現象
第5回	10月10日	武内 勇司 (素粒子実験)	トップクォークのスピン物理
第6回	10月17日	坂本 慶司 (プラズマ) (連携大学院)	大電力ミリ波発振の物理との応用
第7回	10月24日	都倉 康弘 (物性理論)	半導体中単一電子スピンの測定
第8回	10月31日	寺崎 順 (原子核理論)	原子核応答の大規模計算
第9回	11月7日	宮武 宇也 (原子核実験) (客員)	天体における金・白金元素の起源解明 —KISS PROJECT のめざすもの—

大学院関係経費

1. TA経費 数理物質科学研究科 物理学専攻分 6,512,536 円
2. TA経費 数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻、
ナノサイエンス・ナノテクノロジー（物理学分野）分
759,944 円

研究種目		職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額 (千円)	
新学術領域研究	総	補助金	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	5,900
	計	補助金	教授	都倉 康弘	21102003	半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究	14,400
	公	補助金	教授	舛本 泰章	24102702	電子スピンのコヒーレント初期化の研究	4,100
	公	補助金	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	補助金	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	補助金	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	15,200
	公	補助金	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)		補助金	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	14,400
"		補助金	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	8,200
基盤基盤(A) 一般		補助金	教授	中井 直正	20244011	天の川のアンモニア掃天観測	4,100
"	"	補助金	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
"	"	補助金	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	11,300
"	"	補助金	准教授	笹 公和	24246156	加速器質量分析法を用いた人為起源の長寿命放射性核種分析による環境影響評価	9,600
"	"	補助金	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
"	"	補助金	講師	瀬田 益道	22244011	南極から探る銀河系の星間ダストの姿	5,900
基盤研究(B) 一般		補助金	教授	金谷 和至	21340049	物理的クォーク質量における有限温度・有限密度QCDの格子研究	3,200
"	"	補助金	教授	初貝 安弘	23340112	幾何学的位相による物質相：量子液体及びグラフェンでの応用と展開	5,100
"	"	補助金	教授	中嶋 洋輔	24360378	タンデムミラー端部及び高出力中性粒子ビームを用いたダイバータ・ELM模擬研究	1,800
"	"	助成金				1,500	
"	"	補助金	教授	舛本 泰章	23340084	人工原子の新機能性の開拓	4,700
"	"	補助金	教授	矢花 一浩	23340113	固体中のフェムト・アト秒電子ダイナミクスに対する第一原理計算	2,800
"	"	補助金	准教授	石塚 成人	23340054	格子QCDによるK中間子崩壊振幅の研究	3,300
"	"	補助金	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
"	"	助成金	准教授	宮崎 州正	24340098	ガラス転移とジャミング転移の平均場描像の確立	1,800
基盤研究(C) 一般		補助金	教授	石橋 延幸	20540247	D-ブレーンと閉じた弦の場の理論	600
"	"	助成金	教授	今井 剛	23560997	EC加熱変調を用いたELM状熱流束模擬による境界プラズマ制御研究	1,300
"	"	補助金	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	600
"	"	助成金	教授	大塚 洋一	24540314	ナノコンタクトを利用した微小領域のエネルギーフローと単分子磁石の研究	1,600
"	"	助成金	准教授	小野田雅重	24550207	バナジウムポリアニオン系二次電池正極材料の開発	2,000
"	"	補助金	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
"	"	助成金	講師	小松原哲郎	24540298	ビッグバン元素合成におけるリチウム合成機構の解明	2,900

研究種目		職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額 (千円)	
基盤研究(C) 一般	補助金	講師	谷口 裕介	22540265	格子上の非摂動論的な繰り込みの実践	500	
"	"	助成金	助教	佐藤 勇二	24540248	重力/ゲージ理論双対性の可積分構造に基づいたグルーオン散乱振幅の研究	1,100
"	"	助成金	助教	森下 将史	23540401	2次元量子固体フラストレート量子スピン系における非磁性置換とバリステック熱伝導	1,300
挑戦的萌芽研究	助成金	教授	初貝 安弘	23654128	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	1,300	
"	助成金	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	1,300	
"	助成金	准教授	神田 晶申	24651166	グラフェン/金属電極間の界面制御による短チャネルグラフェン電界効果素子	2,400	
"	助成金	准教授	笹 公和	23656586	難測定核種カルシウム41を高エネルギー加速器質量分析により超高感度で検出する試み	700	
若手研究(A)	補助金	助教	小林 航	23684022	リチウムイオンポリマー電池素子を用いた遷移金属酸化物の物性制御	5,300	
若手研究(B)	助成金	准教授	岡本 崇	24740112	輻射流体シミュレーションを用いた銀河風駆動機構の解明	1,100	
"	助成金	講師	SCHURY P. H.	24740142	不安定核のためのイオンサーフィングガスセルの開発研究	1,400	
"	補助金	助教	神谷 克政	22740259	蛋白質環境下におけるアミノ酸のプロトン親和性変化の量子論的解析	700	
"	助成金	講師	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	900	
"	助成金	助教	庄司 光男	24750007	生体酵素における反応機構と反応制御機構解明のための理論的研究	2,900	
"	助成金	助教	長江 大輔	24740141	磁気双極子モーメントの符号決定手法の開発	2,100	
研究活動スタート支援	補助金	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	1,000	
合 計						168,300	

※ 網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

平成24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	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	24,050,000
2	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構国立天文台	大学間連携VLBI観測事業に係る研究「先端的天文学研究の推進—高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明—」	5,096,000
3	教授	都倉 康弘	大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構	スピン量子コンピュータの理論研究	16,034,690
合 計					45,180,690

平成24年度 受託事業

NO	職名	氏名	委託者名	研究題目	金額 (円)
1	教授	中井 直正	(独)日本学術振興会	自作の望遠鏡で宇宙を見よう : 「ひらめき☆ときめき サイエンス~ようこそ大学の研究室へ~KAKENHI」(研究成果の社会還元・普及事業)	429,000
合 計					429,000

平成24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
2	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
3	教授	守友 浩	株式会社日立製作所	高速・安定充放電可能なポリマー型リチウムイオン電池材料の開発	3,150,000
合 計					5,950,000

平成24年度 奨学寄附金

NO	職名	氏名	寄付者等名	寄付の目的	金額 (円)
1	教授	守友 浩	公益財団法人岩谷直治記念財団	「バインダーフリーなリチウムイオン電子用薄膜電極とカラー電池」に対する研究助成	2,000,000
2	教授	守友 浩	一般財団法人キャノン財団	「ネットワークポリマーを用いた『カラー電池』の開発」に対する研究助成	9,000,000
3	助教	濱本 雄治	公益財団法人吉田科学技術財団	国際研究会派遣のため	140,690
4	教授	守友 浩	守友浩:(原寄附者)公益財団法人三菱財団	「ネットワークポリマー正極材料におけるリチウムイオン動力学的研究」に対する研究助成	2,000,000
合 計					13,140,690

平成24年度 その他

NO	職名	氏名	機関等名	事業名称等	金額 (円)
1	教授	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 : 若手研究者戦略的海外派遣事業費補助金(頭脳循環を加速する若手研究者戦略的海外派遣プログラム)	13,749,000
2	教授	金 信弘 守友 浩	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	筑波大学-KEK連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて	11,500,000
3	物理学専攻		文部科学省	卓越した大学院拠点形成支援補助金: 研究拠点形成費等補助金(若手研究者養成費)	29,826,303
合 計					55,075,303

平成24年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	教授	青木 慎也	第23回つくば賞	格子量子色力学による核力の研究	10月
2	准教授	石井 理修	第23回つくば賞	格子量子色力学による核力の研究	10月
6	教授	青木 慎也	2012年度仁科記念賞	格子量子色力学に基づく核力の導出	12月
7	准教授	石井 理修	2012年度仁科記念賞	格子量子色力学に基づく核力の導出	12月
8	教授	守友 浩	J. Phys. Soc. Jpn. Editors' Choice	Photoinduced Phase Transition into a Hidden Phase in Cobalt Hexacyanoferrate as Investigated by Time-resolved X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)	2月
9	助教	上岡隼人	J. Phys. Soc. Jpn. Editors' Choice	Photoinduced Phase Transition into a Hidden Phase in Cobalt Hexacyanoferrate as Investigated by Time-resolved X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)	2月
10	研究員	柴田恭幸	J. Phys. Soc. Jpn. Editors' Choice	Photoinduced Phase Transition into a Hidden Phase in Cobalt Hexacyanoferrate as Investigated by Time-resolved X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)	2月
11	准教授	森 正夫	平成24年度日本天文学会欧文研究報告論文賞	Global Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations of Black-Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three States	3月
12	研究員	小鍋 哲	2013年日本物理学会若手奨励賞	カーボンナノチューブにおける励起子多体効果の理論	3月
13	研究員	吉田信介	2013年日本物理学会若手奨励賞(第14回核理論新人論文賞)	シングルスピン非対称性における3グルーオン相関関数の研究	3月

役割分担（平成24年度）

【物理学域】

物理学域長	大塚
グループ長	金谷、梅村、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
理論グループ懇談会議長	矢花
実験系教授懇談会世話人	中井
自己点検自己評価委員会	金谷、梅村、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
カリキュラム委員長	梅村
カリキュラム委員	坂本、橋本、金谷、梅村、中井、初貝、小沢、石橋、受川、大塚
物理学域広報委員会	江角
物理学域教育研究倫理委員会	金谷、梅村、矢花、初貝、白石、金、中井、小沢、守友、今井、大塚、石橋、受川
物理学域図書係	谷口(裕)
学生支援対応チーム	大塚、石橋、受川、梅村
学域計算機委員会	新井、橋本、石塚
物理学域スペース調査検討委員会	舂本(委員長)、金谷、梅村、矢花、初貝、金、中井、小沢、守友、今井
校正線源管理責任者	(学域長)
校正線源保管責任者	小沢
自然系学系液体窒素タンク管理委員	小野田
科学の芽賞	池沢、金谷
朝永記念室	金谷、受川
実験廃棄物取扱責任者	東山
工作室管理担当	舂本

【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	三明(物理)
研究科長	秋本(電物)
物理学専攻長	大塚
学務委員(物理学専攻)	石橋
ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻長	白石
系長室会議構成員	三明、大塚、白石
系人事委員会総会委員	三明、大塚、白石、受川、梅村、今井
系運営委員会委員	三明、大塚、白石、受川
研究科運営委員会委員	三明、大塚、白石、石橋、受川
研究科学務委員会	石橋
研究科就職委員会	石橋
系広報委員会委員	石橋
系図書委員会委員	谷口(裕)
系施設・安全管理委員会委員	大塚、白石
系情報環境委員会	大塚、白石、新井、岡田、笹
系総合研究棟B棟管理委員会委員	岡田、大塚
系総合研究棟B棟ドラフト管理委員会	野村
系研究倫理委員会委員	石橋
研究科学生相談室員	宮崎

【物理学類】

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

【理工学群】

入学試験実施委員会	吉川(正)、笹
全学学群教育課程委員会	(学類学務委員)
全学学群教職課程委員会	谷口(伸)
学生担当教員	神田
スポーツ・運営委員会	沼倉
理工学群FD委員(FD窓口教員)	(学類学務委員)
理工学群総合政策室委員	金谷
理工学群ネットワーク委員会	橋本
理工学群広報委員会	江角
アドミッションセンター専門委員	野村
附属図書館運営委員会	坂本
教養教育機構	金
総合科目編成委員会	宮崎
教育実習校訪問指導教員	(4年担任)
キャリア支援担当教員	小沢
大学基準協会大学評価委員会	石塚
厚生会理事	大塚
学情分散サテライト	橋本

【自然学類】

自然学類運営委員会	受川、梅村
自然学類計算機委員会	橋本
学類就職委員会	小沢、池沢
学類学生委員会	(1年担任)

【第一学群】

第一学群運営委員会	梅村
第一学群卒業生認定特別委員会	梅村
卒業生認定特別委員会	梅村

【センター】

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

【全学委員会委員等】

筑波大学国際連携室	三明
筑波大学研究戦略室	守友、白石
筑波大学学長補佐室	白石
情報環境機構運営委員会	新井
ダイバシティ推進委員会委員	小波蔵
ハラスメント相談員	宮崎
放射線管理委員会委員	原
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	梅村
学生生活支援室員	小松原
省エネ担当推進委員	谷口(伸)

物理学域人事異動

(平24.4.1～平25.3.31)

【物理学域に来られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
都倉康弘	教授	H24.4.1	NTT物性基礎研究所
永井 誠	助教	H24.5.1	高エネルギー研究機構研究員
久保敏弘	助教	H24.7.1	筑波大学研究員

【物理学域を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
舛本泰章	教授	H25.3.31	定年退職
青木慎也	教授	H25.3.31	京都大学 基礎物理学研究所 教授
宮崎州正	准教授	H25.3.31	名古屋大学 理学研究科 教授
八田佳孝	准教授	H25.3.31	京都大学 基礎物理学研究所 准教授
Peter Schury	講師	H25.3.31	理化学研究所 特別研究員
川勝 望	助教	H25.3.31	呉工高専 准教授
濱本雄治	助教	H25.3.31	大阪大学 特任助教
岡本 崇	准教授	H25.3.15	北海道大学 助教

	グループ		担当センター		グループ		担当センター		
理論	素粒子	教授	青木慎也 石橋延幸 金谷和至 石井理修 石塚成人 藏増嘉伸 根村英克 吉江友照 八田佳孝 谷口裕介 佐藤勇二 毛利健司	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ	実験	宇宙観測	教授 講師 助教 準研	中井直正 瀬田益道 永井 誠 宮本祐介	
		准教授				原子核	教授 准教授 講師 助教 技術職員	三明康郎 小沢 顕 新井一郎 江角晋一 笹 公和 小松原哲郎 Peter Schury 中條達也 長江大輔 加藤純雄	研究基盤セ 研究基盤セ
	宇宙物理	教授 准教授 講師 助教	梅村雅之 森 正夫 岡本 崇 吉川耕司 川勝 望	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ		物性	教授 准教授 講師 助教	舛本泰章 守友 浩 大塚洋一 小野田雅重 池沢道男 野村晋太郎 神田晶申 東山和幸 久保 敦 富本慎一 森下将史 上岡隼人 小林 航	TIMS TIMS
	原子核	教授 准教授 講師	矢花一浩 寺崎 順 橋本幸男	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ		プラズマ	教授 准教授 講師 助教 技術職員 シニアスタッフ	今井 剛 坂本瑞樹 中嶋洋輔 假家 強 吉川正志 小波蔵純子 沼倉友晴 平田真史 南 龍太郎 大川和夫 平田久子	プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター
	物性	教授 准教授 助教	有光敏彦 都倉康弘 白石賢二 初貝安弘 岡田 晋 谷口伸彦 宮崎州正 神谷克政 久保敏弘 庄司光男 濱本雄治 吉田 恭	計算科学セ TIMS 計算科学セ 計算科学セ					
実験	素粒子	教授 准教授 講師	受川史彦 金 信弘 原 和彦 佐藤構二 武内勇司						

研究員

石井 峻	宇宙観測
伊藤宙陸	物性実験
金子紘之	宇宙観測
小鍋 哲	物性理論
柴田恭幸	物性実験
富田陽子	物性理論
永井康一	素粒子実験
松田智行	物性実験
吉田信介	素粒子理論

連係大学院

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

連携大学院

蔡兆申	NEC	物質創成
河合孝純	NEC	物質創成
西川 正	NTT	物質創成
山下 眞	NTT	物質創成
後藤秀樹	NTT	物質創成
和田道治	理研	物理
川本 徹	AIST	物理
坂本慶司	原研	物理
藤田隆明	原研	物理
濱松清隆	原研	物理
丸山敏毅	原研	物理

客員教員

新井康夫	KEK
浦川順治	KEK
幅 淳二	KEK
宮武宇也	KEK
田中真伸	KEK
高崎史彦	KEK

事務職員

岡野久美子	教務
米山啓子	総務
中井佳代子	会計・研究支援
石井浩子	会計・非常勤
夏井久美子	KEK連携・非常勤

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2012（平成24）年度

発行 2013年10月

発行者 筑波大学数理物質系物理学域

〒301-0033 茨城県つくば市天王台1-1-1

TEL 029-853-4033

FAX 029-853-4492

印刷 谷田部印刷株式会社

ISSN 2187-4824