

ISSN 0915-5317

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2010 (平成22) 年度

筑波大学物理学系

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 | 27 |
| III | 宇宙物理理論グループ | 54 |
| IV | 宇宙観測グループ | 73 |
| V | 原子核理論グループ | 79 |
| VI | 原子核実験グループ | 91 |
| VII | 物性理論グループ | |
| VII-1 | 非平衡統計物理グループ | 116 |
| VII-2 | 量子物性理論グループ | 124 |
| VII-3 | ナノ量子物性グループ | 130 |
| VII-4 | ソフトマター理論グループ | 135 |
| VII-5 | 半導体ナノ物性グループ | 141 |
| VII-6 | ナノ構造物性グループ | 151 |
| VIII | 生命物理グループ | 158 |
| IX | 物性実験グループ | |
| IX-1 | 磁性物性グループ | 166 |
| IX-2 | 半導体物性グループ | 172 |
| IX-3 | 強相関物性グループ | 188 |
| IX-4 | 表面物性グループ | 199 |
| IX-5 | 低温物性グループ | 204 |
| X | プラズマ研究グループ | 215 |

— 教育活動 —

| | | |
|----|----------------|-----|
| XI | 物理教育および物理教育の研究 | 251 |
| | 【1】 物理教育 | |
| | 【2】 体験学習 | |
| | 【3】 カリキュラム関係 | |

— 補足資料 —

| | |
|--------|-----|
| 大学院資料 | 255 |
| 物理学域資料 | 263 |

1. 素粒子理論グループ

教授 青木 慎也、石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至

准教授 石塚 成人、藏増 嘉伸、吉江 友照

主任研究員 石井 理修

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、八田 佳孝、毛利 健司

研究員 上田 悟、植田 高寛、浮田 尚哉、Nguyen Hoang Oanh、佐々木 健志、土井 琢身、中村 宜文、滑川 裕介、山崎 剛

大学院生 (13名)

研究生 (1名)

【人事異動】

上田悟氏と Nguyen Hoang Oanh 氏 (いずれも筑波大博士課程修了) が、計算科学研究センター研究員となった (2010年4月1日)。中村宜文氏 (ドイツ・レーゲンスブルク大学研究員) が素粒子理論グループに研究員として加わった (2010年10月1日)。石井理修氏 (東京大学特任研究員) が次世代スパコン戦略拠点主任研究員として着任した (2010年12月1日、勤務地：計算科学研究機構)。

井上貴史 研究員が日本大学生物資源科学部に助教として転出した (2010年3月31日)。山崎剛研究員が名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 基礎理論研究センター特任助教として (2010年10月1日)、上田悟 研究員が高エネルギー加速器研究機構ポスドク研究員として (2010年12月1日)、中村宜文 研究員が理化学研究所・計算科学研究機構・連続系場の理論研究チーム研究員として (2011年3月1日)、植田高寛 研究員がドイツ・カールスルーエ工科大学 (KIT) ポスドク研究員として (2011年3月31日)、それぞれ転出した。

藏増嘉伸 准教授が、計算科学研究機構 (AICS) 主任研究員を兼任することとなった (2010年10月1日付)。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論の研究、超弦理論の研究、高エネルギー・ハドロン物理の研究の、3つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を推進した。格子場の理論グループの研究者の大部分は、2006年7月に計算科学研究センターの次期並列計算機として PACS-CS が導入されたのを契機として新たに立ち上げられた研究グループ PACS-CS Collaboration に参加している。PACS-CS Collaboration では、計算科学研究センターの PACS-CS

や T2K-Tsukuba を主要な計算機資源として、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことを目的として、3種類 (up, down, strange) の軽いクォークをその物理的質量 (物理点) において動的に扱う $N_f = 2+1$ QCD の大規模シミュレーションを進めた。また、up, down 間の質量差や電磁相互作用を取り入れる $N_f = 1+1+1$ QCD の研究や、格子 QCD による He 原子核の研究などにも着手した。一方、研究者の一部は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の IBM BlueGene/L と日立 SR-11000 を用いて、格子上での厳密なカイラルを持つオーバーラップ・フェルミオン作用を用いた研究を展開している JLQCD Collaboration にも参加して、研究を展開している。さらに、これらと並行して、核子間ポテンシャルの研究、ハドロン間相互作用の研究、核子形状因子の研究、有限温度・有限密度 QCD の研究、や、計算技術開発なども行った。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを共有する為のデータグリッド ILDG/JLDG の構築・整備を推進した。

次世代スーパーコンピュータ「京」を中核とした革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築を主導するために、High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム」が文部科学省により推進されている。HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、青木が統括責任者を務める、分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2010 年度にはその準備研究を行った。分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木が拠点長を勤める「計算基礎科学連携拠点」 (<http://www.jicfus.jp/jp/>) である。分野 5 の活動に関しては、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/> を参照のこと。また、「京」を用いて計算機科学と計算科学分野の連携・融合を促す国際的な研究拠点として、神戸に計算科学研究機構 (AICS) が設立され、藏増が計算科学研究機構の主任研究員を兼任することとなった。

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

高エネルギー・ハドロン物理の分野では、電子陽電子消滅の終状態における軟グルーオンの研究、ゲージ弦対応に基づく偏極深非弾性散乱の研究、ジェットからのエネルギーフローの研究、AdS/CFT 対応に基づくオデロンの研究、赤外発散を系統的に分離する手法に関する幾何学的解法の研究、仮想光子中の非偏極パートン分布の研究などを行った。

【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、谷口 裕介、上田 悟、浮田 尚哉、Nguyen Hoang Oanh、佐々木 健志、土井 琢身、中村 宜文、滑川 裕介、山崎 剛)

(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 年計画で特別教育研究経費（拠点形成）を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機 PACS-CS（計算ノード数 2560、ピーク演算性能 14.3Tflops）が平成 18 年 7 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として格子 QCD の研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学系メンバーを中心として組織されている。その目標は、domain-decomposed HMC (DDHMC) アルゴリズムと polynomial HMC (PHMC) アルゴリズムを組み合わせることによって 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 年度は物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くすることによって物理量のクォーク質量依存性を調べることが主要課題であった。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 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。

次のステップとして平成 22 年度は 2 つの大きなテーマに取り組んだ。一つは 1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションの開発である。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と同じように 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。我々は、基本的戦略として reweighting 法によって電磁相互作用と up-down クォークの質量差を取り入れることを試みている。本年度は、格子上における電磁相互作用の定式化とそれに対する reweighting 法の適用テストを実施し、年度末から本格計算へと移行した。もう一つのテーマは物理点における体積効果の検証である。このため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 94Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始）を利用したより大きな空間サイズのシミュレーションを実行中である。PACS-CS を用いた物理点計算では、格子サイズは $32^3 \times 64$ であったが、T2K-Tsukuba を利用した計算では、格子サイズは 64^4 であり、空間体積は 8 倍になっている。図 1 はハドロン質量および π メソン、 K メソン崩壊定数の実験値との比較を表している。up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するためのインプットは π メソン、 K メソン、 Ω バリオンの質量であり、今後 reweighting 法を用いたクォーク質量の物理点へのチューニングが必要であることがわかる。また、 ρ メソン質量と Δ バリオン質量の実験値からのズレが他のハドロンに比べて顕著であるが、それらは実験的には共鳴状態であることが知られており、その効果は図中の結果には取り入れられていない。その他のハドロンに関しては、実験値とのズレは最大で数%程度である。

これまで PACS-CS および T2K-Tsukuba を利用して生成された配位を用いて様々な物理量を計算することが可能であるが、特に興味深いものはハドロン共鳴状態の解析である。その深い理解の為には、ハドロン散乱位相を格子上の数値計算により定量的に評価し、実験値と比較することが非常に重要である。こ

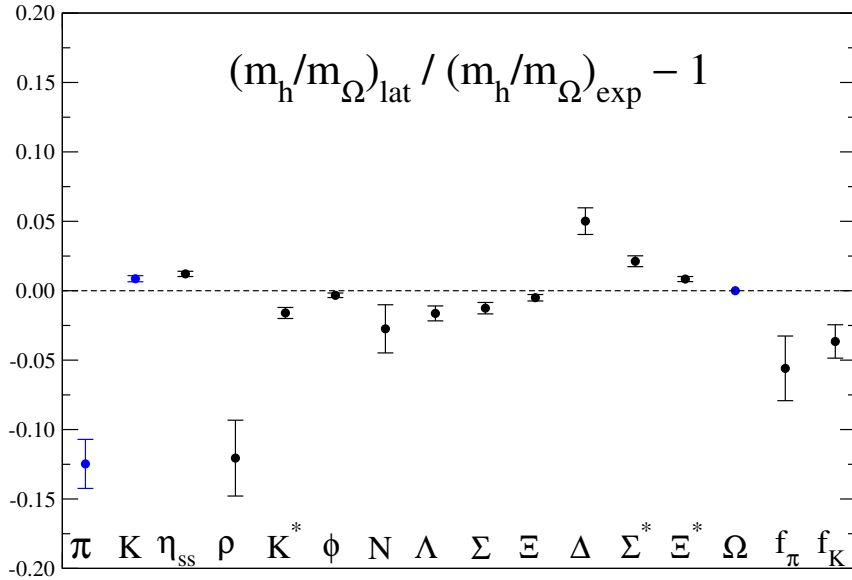


図 1: ハドロン質量および π メソン、 K メソン崩壊定数の実験値との比較。 Ω バリオンの質量で規格化されている。青丸は up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決めるためのインプットを表す。

の研究では、 $J^{PC} = 1^{--}$ の共鳴状態である ρ 中間子の研究を、2 体 π の散乱位相から行った。 ρ 中間子の研究はこれまで、動的クォークとして u, d クォークのみを扱った研究しかなかった。この研究では更に s クォークの効果を取り入れ、より現実に近い状況で研究を行った。数値計算は、PACS-CS グループによって生成されたゲージ配位 ($a = 0.0907$ fm, $L = 2.9$ fm) の中で、クォーク質量: $m_\pi = 410$ MeV と $m_\pi = 300$ MeV の二つの質量のもとで行った。図.2 にそれぞれの質量での散乱位相 $k^3 / \tan \delta(k)$ を載せた。ここで、 k は π 中間子の散乱運動量である。これらの散乱位相から P -wave の有効長公式を用いて、それぞれの質量での $\rho\pi\pi$ 有効相互作用定数を求めた。図中の実線はその有効長公式の fitting line である。我々の得た相互作用定数の結果は、 $m_\pi = 410$ では $g = 5.53 \pm 0.38$ 、 $m_\pi = 300$ では $g = 5.98 \pm 0.56$ である。これらから相互作用定数のクォーク質量依存性が、非常に小さいことがわかった。また、これらの値から実際のクォーク質量 ($m_\pi = 140$ MeV) での ρ 中間子の崩壊幅を評価すると、 $\Gamma_\rho = 130 \pm 18$ MeV と $\Gamma_\rho = 152 \pm 28$ MeV である。これらは実験値 150 MeV をよく再現している。これらの研究の暫定的成果は既に論文 3 に掲載されている。また最終研究成果は 2011 年度に論文掲載予定である。

また、格子 QCD による原子核の直接構成の研究は平成 21 年度にヘリウム原子核の束縛エネルギー計算 (論文 1) によって開始されたが、平成 22 年度は 2 核子系の計算を試みた。2 核子系にはスピン三重項チャンネル (重陽子) とスピン一重項チャンネルが存在するが、前者のみが束縛状態であり、その束縛エネルギーが 3MeV 弱と極めて小さいことが大きな特徴である。そのためヘリウム原子核の直接計算よりも困難であることが予想される。我々は先ず計算コス

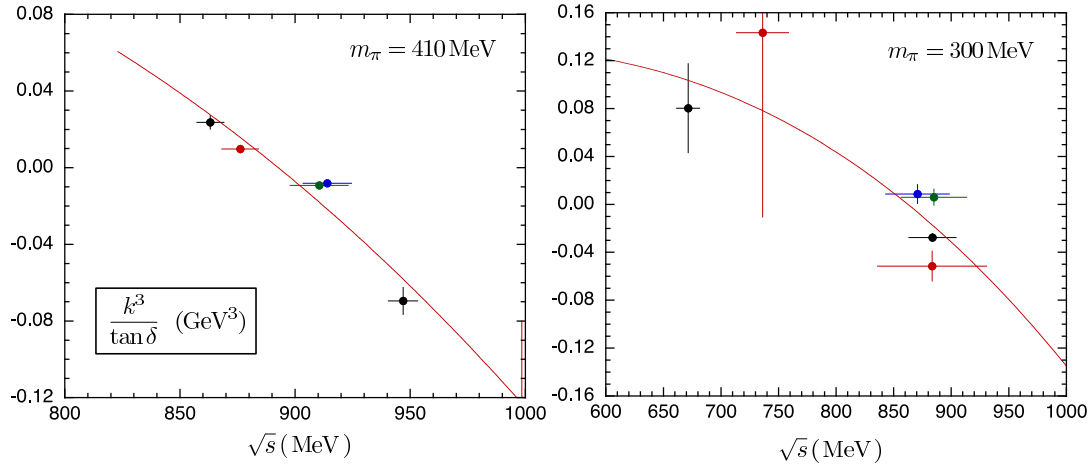


図 2: $I = 1$ チャンネルの 2 体 π 中間子系の散乱位相 $k^3/\tan \delta(k)$ 。横軸は重心系エネルギー。 $m_\pi = 410\text{MeV}$ (左図) および $m_\pi = 300\text{MeV}$ (右図) の場合。現実には $m_\pi = 140\text{MeV}$ 。

トを抑えるため、クエンチ近似で重いクォーク質量を用いた試験的計算を行った。散乱状態と束縛状態を識別するためには、2 核子系のエネルギーと 2 個の自由核子エネルギーの差の体積依存性を調べる必要がある。格子の空間サイズ L を 24 から 96 まで変化させる計算を行った結果、束縛エネルギーは無限体積の極限でも有限の値として存在し、スピン三重項チャンネル (図 3 左) とスピン一重項チャンネル (図 3 右) の両者とも束縛状態であるという結論が得られた。もちろん、自然界ではスピン三重項チャンネルのみが束縛状態であり、スピン一重項チャンネルは束縛していないため、我々が見出したスピン一重項チャンネルの束縛状態は、クエンチ近似および重いクォーク質量で計算を行ったことによる効果だと考えている。今後真空偏極効果を取り入れ物理的クォーク質量に近づけていけば、スピン一重項チャンネルの束縛エネルギーは徐々に減少し、最終的には非束縛状態になるのではないかと推測し、現在クォーク質量依存性を調べている。

(2) クォーク質量の繰り込み定数

$N_f = 2+1$ QCD においてクォーク質量の繰り込み定数を Schrödinger functional formalism を用いて格子上の数値計算から非摂動的に求めた (論文 5,6、国際会議 8,9)。また、その結果を用いてクォーク質量の非摂動的な繰り込み群の流れを求めた。

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

2 つの核子の間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に近距離での斥力 (斥力芯と呼ばれている) を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の 1 つである。青木、石井らは、東京大学の初田との共同研究で、二核子系の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を用いて格子

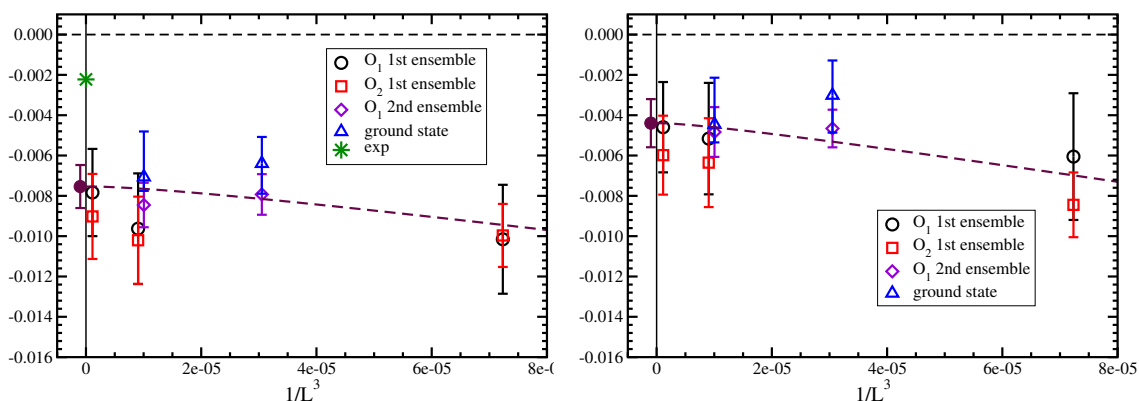


図 3: 2核子系エネルギーと2個の自由核子エネルギーの差の体積依存性。 L は格子の空間方向の長さ。白抜きシンボルは原子核相関関数における演算子の選び方の違いを表す。破線は空間体積無限大への外挿の様子。左図：スピン三重項チャンネル（重陽子）、右図：スピン一重項チャンネル。

QCDにより計算する方法を提案し、さまざまな研究を進めている。青木はポテンシャルの近距離での振舞を解析的に調べる方法を提案したが、今年度はその方法を3フレーバーに拡張し、チャンネルによっては斥力ではなく引力になるという結果を得た(論文8)。また、ポテンシャルのエネルギー依存性及び、角運動量 L 依存性を調べ、ポテンシャルのエネルギー及び角運動量依存性が小さいことを示した(論文18)。

HAL QCD Collaborationは、格子QCDを用いてフレーバーSU(3)対称極限な世界におけるバリオン間相互作用を調べた。彼らはS波状態に注目し、最近に開発された方法を用いて、必要十分な6つのポテンシャルを導出した(論文7)。フレーバー1重項チャンネルが他と異なり短距離で引力であり、Hダイバリオン状態が存在する可能性があるため、さらに研究を進めた。体積を大きくするなどした計算を行なった結果、フレーバーSU(3)対称極限ではHダイバリオンが存在することを示した(論文10、図4)。

さらに、sクォークがu,dより重くなり、フレーバーSU(3)が破れた場合に、ポテンシャルを計算する方法を検討し、実際に数値計算を実行した。その結果、粒子基底で書いた3x3のポテンシャル行列が得られた(論文26,27、発表24,25)。

バリオン間三体力の研究

近年、原子核や中性子星などの諸性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が指摘されている。土井らは、格子QCDによる三体力の決定を目指し、今年度は三体系内での有効二体相互作用に着目した計算を行った。図5は、PACS-CS Collaborationによって生成されたパイオン質量が700MeVに対応する2+1フレーバーゲージ配位を使って計算された、三重水素原子核中の三

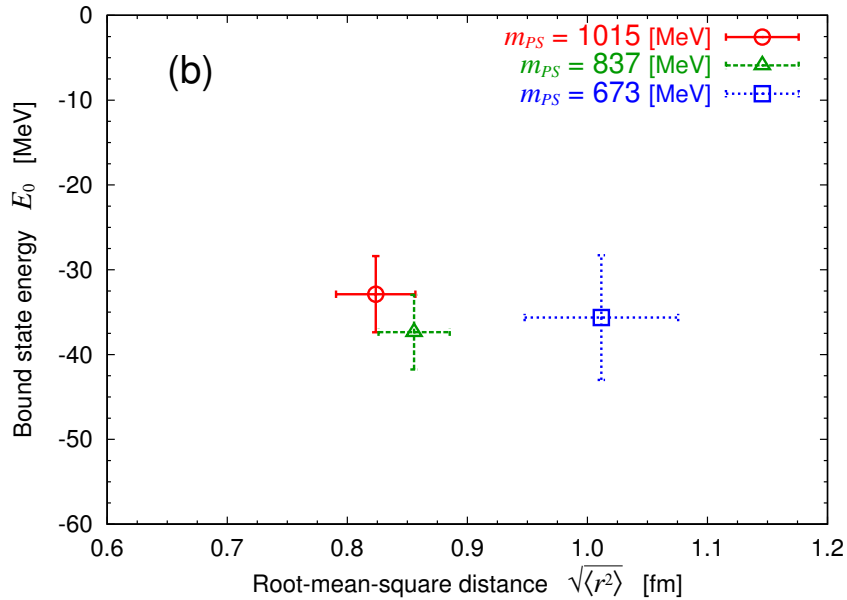


図 4: 格子 QCD によるバリオン間力の研究。H ダイバリオンの束縛エネルギー (縦軸、MeV 単位) と 2 バリオン間の平均距離 (横軸、fm 単位) のパイ中間子質量依存性。

体相互作用である。ここでは 3 つの核子が直線上に並んだ配位での相互作用を計算している。三体相互作用に近距離での斥力の兆候が見えており、興味深い結果である (論文 23、発表 19,21,22,8,9,10)。

(4) 厳密なカイラル対称性を持つクォーク作用を用いた研究 (JLQCD Collaboration)

JLQCD Collaboration は、格子上で厳密なカイラル対称性を持つオーバーラップ・フェルミオンを力学的クォーク作用に用いた $N_f = 2$ 格子 QCD と $N_f = 2+1$ 格子 QCD でゲージ配位を生成し、それを用いて、パイ中間子の形状因子の計算 (論文 16)、カイラル凝縮の決定 (論文 9)、核子中のストレンジクォークの成分量の決定 (論文 17)、パイ中間子の 2 光子への崩壊過程の研究 (論文 17) などを行った。また、将来に向けて、有限温度相転移に対するトポロジーを固定した影響を調べた (論文 14)。

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

金谷、青木らは、東京大学初田教授、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田助教らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。

固定格子間隔アプローチと T -integral 法による状態方程式の研究

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

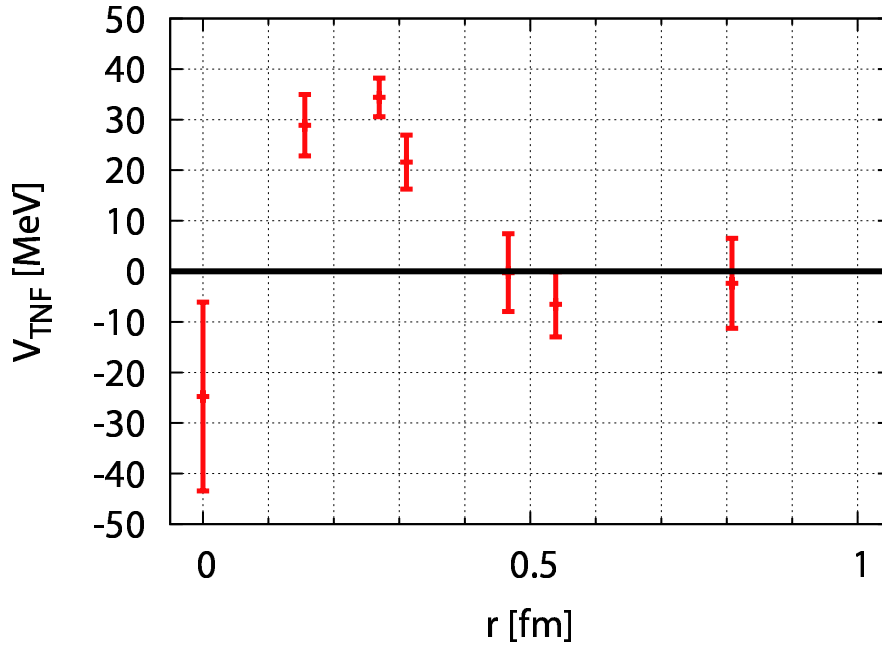


図 5: 三重水素原子核中の三体力ポテンシャル。3 核子が直線上に等距離で並んだ場合で、横軸は中心の核子から端の核子までの距離。

ク質量が現実より重い点で開始した。固定格子間隔アプローチでは、既存のゼロ温度配位を活用できるメリットがある。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して、そのシミュレーション・ポイントで有限温度シミュレーションを実行し、ウィルソン型クォークとして初めて、 $N_f = 2+1$ の状態方程式の計算に成功した (図 6、論文 31,33,38、国際会議発表 31,36)。

有効ポテンシャルによる QCD 有限温度・有限密度相転移の研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の次数を判定するうえで、観測量のヒストグラムはもっとも直感的な情報を含んでいる。我々は、測定が容易なプラケットのヒストグラムから有効ポテンシャルを定義し、その振る舞いから相転移の次数を研究する方法を提案した。そしてその応用として、SU(3) 純ゲージ理論のシミュレーションとホッピングパラメータ展開により、クォークが重い領域での QCD の有限温度相構造を研究した。reweighting 法から導かれる有効ポテンシャルの微分の簡単な振る舞いを利用して、様々なゲージ結合定数 β におけるシミュレーション結果を組み合わせ、プラケット期待値の広い範囲で有効ポテンシャルの微分を評価した (図 7 左)。それに基づき、有効ポテンシャルを計算して、純ゲージ理論の 1 次相転移が、クォークの効果によりクロスオーバーに変わる臨界点の位置を評価した (図 7 右、論文 37、国際会議発表 30,33,37,38)。

現在、この研究などに、化学ポテンシャルに関する Taylor 展開の手法を組み合わせ、有限密度における QCD 相構造の研究を進めている (論文 32,35)。

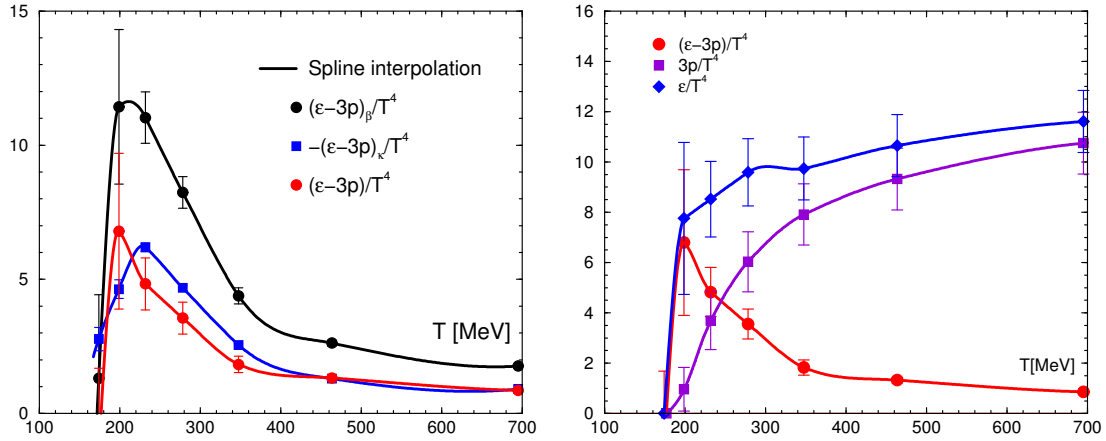


図 6: 固定格子間隔アプローチによる、ウィルソン型クォークを用いた $N_f = 2 + 1$ QCD の状態方程式。u, d クォークは現実より重くなっている。左図: トレース・アノマリー (赤丸)。 $T \sim 170$ MeV が、クォーク・グルオン・プラズマ相への相転移温度となる。ゲージ部分 (黒丸) とクォーク部分 (青四角) の間に大きなキャンセレーションがある。右図: トレース・アノマリー (赤丸)、圧力 (紫四角)、エネルギー密度 (青菱形) の温度依存性。

格子上の中間子スペクトル関数の研究

チャーモニウムなどのスペクトル関数の研究は、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) の性質を研究する上で重要な情報を与えている。これまで格子上では、最大エントロピー法を用いた計算が主に行われてきたが、仮想モデルの選び方に由来する結果の不定性の問題や、有限の格子上では離散的なはずのスペクトル関数が連続関数になってしまう原理的な欠陥があり、最終的なスペクトル関数の信頼性が問題となっている。我々は、対角化の方法を用いて、離散的なスペクトル関数を評価する方法を開発し、その有効性を検証した。自由 Wilson クォークの場合に、中間子伝搬関数から対角化の方法を使って得られるスペクトル関数と、スペクトル関数の解析解を比較し、対角化の方法で用いる規定の数を十分大きくすることで、解析解が再現されることを確認した。他方、時間方向の格子サイズや数値精度の限界による制限も明らかにした。次に、クエンチ近似 QCD を研究し、基底状態に関しては、最大エントロピー法によるスペクトル関数のピークの位置とピーク周りの面積を、対角化の方法でよく再現することを示した。他方、第一励起状態に関しては、対角化の方法の方が実験値に近い結果を導くことを示した。有限温度では、格子サイズの制限により明確な結論は得られなかったが、少なくとも臨界温度の 1.4 倍の温度まで、 J/ψ や η_c が消失する兆候は確認できなかった (論文 30, 34、国際会議発表 29,32,35)。

重いクォーク間の自由エネルギーと遮蔽質量の研究

ゲージ不変なポリアコフ ラインを時間反転と荷電反転とでそれぞれ偶部分と奇部分に分類し、それらの相関関数から、電氣的遮蔽と磁氣的遮蔽をゲージ不変に定義する方法を提案した。実際に、 $N_f = 2$ QCD の場合に相関関数の長

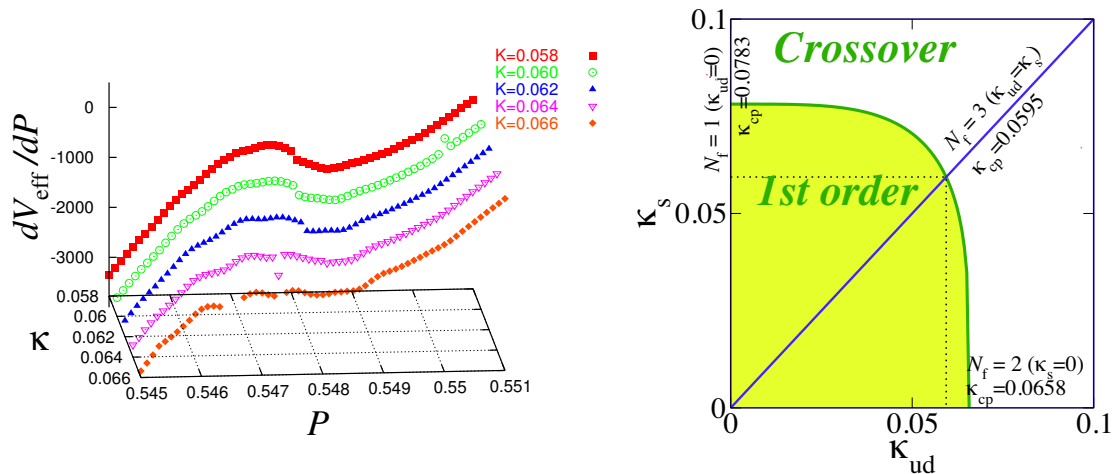


図 7: 有効ポテンシャルによる、重クォーク領域における QCD 有限温度相転移の次数に関する研究。左図: プラケット有効ポテンシャルの微分。右図: 重クォーク領域における $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度相転移次数のクォーク質量依存性。ホッピングパラメータ κ は、重クォーク領域ではクォーク質量の逆数に比例する。1 次相転移領域とクロスオーバー領域の境界が、2 次相転移の臨界点となる。

距離での遮蔽を調べ、電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量を計算した。電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量の比 (スクリーニング比) が有効模型や超対称模型と同様な振る舞いをしていることがわかった (論文 29)。

また、固定格子間隔アプローチで生成された $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度ゲージ配位上で、重いクォーク間の自由エネルギーを研究した。極めて高温でも、十分短距離では、自由エネルギーが温度ゼロでの重いクォーク間ポテンシャルに一致することを示した。これは、温度効果は長距離のもので、十分短距離では高温相でも温度効果が無いという、理論的予想と一致しているが、従来の研究では、自由エネルギーの原点が温度毎に異なるくりこみを受けるために、この理論的予想を使って、短距離で一致するように手で調整されていた。固定格子間隔アプローチでは、くりこみが温度に依らないためにそうした調整は不要であり、理論的予想を初めて確認することに成功した。また、長距離では、クォークの閉じ込めがやぶれて、自由エネルギーが一定値になる様子も確認された。 $N_f = 0$ の結果と比べると、 $N_f = 2$ および $2 + 1$ の結果は有意に大きく、軽いクォークが大きな影響を持っていることが示された (論文 36,39)。

(6) ILDG/JLDG の構築・運用に係わる活動

格子 QCD シミュレーションの基礎データである配位を国際規模で共有する International Lattice Data Grid (ILDG) (論文 41) プロジェクトに参画し、システムの構築・改良に携わった。ILDG に投入する配位のメタデータを半自動的に収集するシステムの構築プロジェクト (Metadata Capture Project) をエンジンバラ大学と共同で推進した。また、国内の格子 QCD 研究者のデータグリッド Japan Lattice Data Grid (JLDG) の改良に携わった。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論と次元正則化

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

昨年度までの研究で、石橋は馬場・村上とともに、弦理論に次元正則化を適用することが出来ることを見出した。石橋は村上（岡山光量子研）とともに、次元正則化を用いて光円錐ゲージの超弦の場の理論の散乱振幅を計算し、全ての外線が (NS,NS) セクターに属する場合の tree 振幅について、コンタクトタームの問題を解決できることを示した（論文 42）。

以上の結果を、外線が Ramond セクターに属する場合に拡張するためには、世界面上で spin field と呼ばれる場を構築する必要がある。弦理論を次元正則化すると世界面上の縦波方向の自由度が相互作用を持ってしまうため、spin field を定義することが難しくなる。石橋は村上（岡山光量子研）とともに、縦波方向を自由場で記述する方法を開発し、それを用いて、次元正則化において Ramond セクターを扱うことが可能であることを示した（論文 43）。また、これらの結果を元に、次元正則化を用いれば全ての tree 振幅についてコンタクトタームの問題を解決できることを示した（論文 46）。

石橋は馬場・村上（岡山光量子研）とともに、次元正則化のループ振幅への応用について議論した（論文 44）。

(2) 重力理論／ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅

重力理論とゲージ理論の双対性により、強結合における 4 次元超対称ゲージ理論の散乱振幅が、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とが知られてる。

佐藤は初田（京都大基礎物理学研究所）、伊藤（東京工業大）、酒井（慶應義塾大学）と共に、こうした極小曲面を記述する積分方程式が（運動量が 3 次元空間に制限される場合）、homogeneous sine-Gordon 模型と呼ばれる 2 次元可解模型の有限サイズ効果の研究に用いられる熱力学的ベータ方程式と一致していることを明らかにした（論文 48）。

さらに、このような 4 次元超対称ゲージ理論と 2 次元可解模型の対応に基づき、パラフェルミオン共形場理論の摂動を用いて、強結合 6 点散乱振幅に対する運動量の複比が等しくなる運動量配位周りの解析的な展開式を導いた（論文 49）。

この展開式ではパラメタの一部は数値計算の結果を用いて評価されたが、佐藤は共同研究者と共に、 g -関数（境界エントロピー）とスペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比（ Y -関数）の関係を用いると、完全に解析的な方法で展開式が得られることを示した。また、運動量が2次元空間に制限される場合に、このような方法により10点散乱振幅の解析的な展開式を具体的に導いた。この結果を2ループの摂動計算と比べることにより、適当に規格化された振幅の展開式が、強結合側と摂動論側で非常に近いことも明らかにした。この結果は、collinear 極限や系のもつ離散対称性の制限が非常に強いことを示唆している（論文50）。

【3】 高エネルギー・ハドロン物理

（八田佳孝、植田高寛）

(1) 電子陽電子衝突における光子生成断面積の計算

LEP での電子陽電子消滅実験において、軟光子の生成断面積に異常があることが DELPHI コラボレーションによって近年報告された。生成された光子の数が終状態ハドロンからの Bremsstrahlung から予想される量より数倍多いのである。八田と植田は AdS/CFT を用いて $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論において光子断面積を厳密に計算し、Bremsstrahlung とは異なる、非摂動的で新しい光子生成の起源を示した（論文52）。

(2) 強結合ゲージ理論における放射について

八田らは2本の連続した論文53,54において強結合 $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論における放射（radiation）の問題を扱った。AdS空間で運動するストリングから放出されるエネルギーの空間分布は、超重力近似では古典力学のように光速で伝わり、空間的な幅（broadening）を持たない。これは量子力学やUV/IR対応と一見矛盾する結果に見える。八田らはストリングのミンコフスキー境界近傍の部分だけが境界でのエネルギーに寄与することを指摘してこの問題を解決し、ストリングの効果（超重力近似を超えた効果）によって broadening が回復すると議論した（論文53）。

また、任意の加速度運動をする重いクォークに双対なストリングからの放射のエネルギー密度分布を超重力近似の枠内で厳密に計算し、すべての寄与がミンコフスキー空間におかれたストリングの端点からくることを示した（論文54）。

(3) 仮想光子中の非偏極パートン分布におけるクォーク質量効果の再足し上げ

光子は量子効果を通じてハドロン的な振る舞いをするのが可能であり、この意味において光子中のパートン分布関数が定義される。仮想光子中のパートン分布関数は、摂動論的QCDによって評価することができる。植田らは、仮想光子中の非偏極パートン分布に対するクォーク質量の効果を考えて時に現れる対数項の再足し上げについて議論した（論文55）。

〈論文〉

1. PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD, Phys. Rev. D 81, No. 11 (2010) ref. 111504(R), pp.1-4
2. Yoshinobu Kuramashi, Progress in Lattice QCD, Proceeding of Science (ICHEP 2010) 545.
3. Naruhito Ishizuka for PACS-CS Collaboration, Calculation of ρ meson decay width from the PACS-CS configurations, Proceeding of Science (LATTICE2010) 108.
4. Takeshi Yamazaki, Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE2010) 021.
5. Y. Taniguchi for PACS-CS Collaboration, Non-perturbative renormalization of quark mass in $N_f = 2 + 1$ QCD with the Schroedinger functional scheme, PoS **LATTICE2010** (2010) 242
6. Y. Taniguchi for PACS-CS collaboration, Non-perturbative renormalization of quark mass in $N_f=2+1$ QCD with the Schroedinger functional scheme, JHEP **1008** (2010) 101, 1-25
7. T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL QCD collaboration), Baryon-Baryon Interactions in the Flavor SU(3) Limit from Full QCD Simulations on the Lattice, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 591-603.
8. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Operator product expansion and the short distance behavior of 3-flavor baryon potentials, JHEP09(2010)083.
9. H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (JLQCD and TWQCD collaborations), Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice, Phys. Rev. D83 (2011) 074501.
10. Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 106(2011) 162002.
11. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon Interactions from Lattice QCD, AIP Conference Proceedings Vol. 1235 (2010) 16-22.
12. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon-Baryon interactions from lattice QCD, Chinese Physics C 34 No.9 (2010) 1236-1240.

13. Sinya Aoki, Lattice QCD and Nuclear Physics, to be published in LES HOUCHEs SUMMER SCHOOL: SESSION 93: MODERN PERSPECTIVES IN LATTICE QCD: QUANTUM FIELD THEORY AND HIGH PERFORMANCE COMPUTING, 3-28 Aug 2009, Les Houches, France.
14. JLQCD Collaboration: Guido Cossu, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Hideo Matsufuru, Jun-ichi Noaki, Eigo Shintani, Finite temperature QCD at fixed Q with overlap fermions, PoS (Lattice 2010) 174.
15. Sinya Aoki, Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD, PoS(ICHEP2010) 362.
16. JLQCD Collaboration: T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, Light meson form factors in $N_f = 2 + 1$ QCD with dynamical overlap quarks, PoS (Lattice2010) 146.
17. JLQCD Collaboration: K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, Nucleon strange quark content in 2+1-flavor QCD, PoS (Lattice2010) 160.
18. Keiko Murano, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Non-locality of the nucleon-nucleon potential from Lattice QCD, PoS (Lattice2010) 150.
19. E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada, Two-photon decay of π^0 from two-flavor lattice QCD, PoS(Lattice 2010)159.
20. Noriyoshi Ishii, Lambda-Nucleon and Nucleon-Nucleon Interactions on the Lattice, Few-Body Systems 49, 269-281 (2011).
21. T. Blum, R. Zhou, T. Doi, M. Hayakawa, T. Izubuchi, S. Uno and N. Yamada, Electromagnetic mass splittings of the low lying hadrons and quark masses from 2+1 flavor lattice QCD+QED, Phys. Rev. D 82, (2010) ref. 094508 pp.1-47
22. A. Li, A. Alexandru, Y. Chen, T. Doi, S.-J. Dong, T. Draper, M. Gong, A. Hasenfratz, I. Horvath, F.-X. Lee, K.-F. Liu, N. Mathur, T. Streuer and J.-B. Zhang, Overlap Valence on 2+1 Flavor Domain Wall Fermion Configurations with Deflation and Low-mode Substitution, Phys. Rev. D 82, (2010) ref. 114501 pp.1-19
23. T. Doi for HAL QCD Collaboration, The study of the Three Nucleon Force in full QCD Lattice calculations, Proceeding of Science (Lattice 2010) 136.
24. T. Doi, M. Deka, S.-J. Dong, T. Draper, K.-F. Liu, D. Mankame, N. Mathur and T. Streuer, Nucleon strangeness form factors and moments of PDF, Proceeding. of 12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU 2010), (4pages), arXiv:1010.2834 [hep-lat]

25. N. Mathur, A. Alexandru, Y. Chen, T. Doi, S.-J. Dong, T. Draper, M. Gong, F.-X. Lee, A. Li, K.-F. Liu, T. Streuer, J.-B. Zhang, Meson spectra from overlap fermion on domain wall gauge configurations, *Proceeding of Science (Lattice 2010)* 114
26. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Lattice QCD study of baryon-baryon interactions in the $(S,I)=(-2,0)$ system using the coupled-channel formalism, *Proceeding of Science (Lattice 2010)* 157.
27. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Coupled Channel Approach to $(S,I) = (-2,0)$ Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD, *Proceedings of the 21st European Conference on Few-Body Problems, Few-Body Syst Vol.50 (2011)* pp. 347-349.
28. K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi and N. Yamada [JLQCD collaboration], Nucleon strange quark content in $2 + 1$ -flavor QCD, *Proceeding of Science (LAT2010)* 160.
29. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda, Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov-Line Correlations in Two-flavor Lattice QCD, *Phys. Rev. D* 81, No.9 (2010) ref.091501(R), pp.1-5.
30. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, H. Ohno and T. Umeda, Heavy-quark free energy at finite temperature with $2 + 1$ flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach, *PoS (LATTICE 2009) (2010)* ref.165, pp.1-7.
31. K. Kanaya, S. Aoki, H. Ohno, T. Umeda, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, Towards the equation of state in $2+1$ flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach, *PoS (LATTICE 2009) (2010)* ref.190, pp.1-7.
32. S. Ejiri, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, T. Umeda, Equation of State and Heavy-Quark Free Energy at Finite Temperature and Density in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action , *Phys. Rev. D* 82, No.1 (2010) ref.014508, pp.1-35.
33. K. Kanaya, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, H. Ohno, H. Saito, N. Ukita, T. Umeda, QCD thermodynamics at zero and finite densities with improved Wilson quarks, *Progr. Theor. Phys. Suppl.* , No.186 (2010) 556-562.
34. Kazuyuki Kanaya, Finite Temperature QCD on the Lattice – Status 2010, *PoS(LATTICE 2010) (2011)* ref.012, pp.1-21.

35. S. Ejiri, Y. Nakagawa, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, H. Saito, T. Hatsuda, Y. Maezawa, T. Umeda, Scaling behavior of chiral phase transition in two-flavor QCD with improved Wilson quarks at finite density, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.181, pp.1-7.
36. H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito, T. Umeda, An application of the variational analysis to calculate the meson spectral functions, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.209, pp.1-7.
37. H. Saito, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, T. Hatsuda, Y. Maezawa, T. Umeda, The order of the deconfinement phase transition in a heavy quark mass region, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.212, pp.1-7.
38. T. Umeda, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, T. Hatsuda, Y. Maezawa, EOS in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed-scale approach, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.218, pp.1-7.
39. H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito and T. Umeda, Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD, Phys. Rev. D submitted.
40. Kazuyuki Kanaya, Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite temperature, AIP Conference Proceedings 1343 (2011) 57-62.
41. Mark G. Beckett, Paul Coddington, Balint Joo, Chris M. Maynard, Dirk Pleiter, Osamu Tatebe, Tomoteru Yoshie, Building the International Lattice Data Grid, Comp. Phys. Comm. 182 (2011) 1208-1214
42. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization II, JHEP **1008** (2010) 102.
43. N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone Gauge NSR Strings in Noncritical Dimensions II – Ramond Sector, JHEP **1001** (2011) 008.
44. K. Murakami and N. Ishibashi, Amplitudes in Noncritical Dimensions and Dimensional Regularization, UTHEP622, to be published in PROGRESS OF THEORETICAL PHYSICS SUPPLEMENT,
45. N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone Gauge String Field Theory and Dimensional Regularization, UTHEP621, to be published in PROGRESS OF THEORETICAL PHYSICS SUPPLEMENT.
46. N. Ishibashi and K. Murakami, Spacetime Fermions in Light-cone Gauge Superstring Field Theory and Dimensional Regularization, UTHEP624.

47. K. Sakai and Y. Satoh, Constant mean curvature surfaces in AdS_3 , JHEP **1003** (2010) 077.
48. Y. Hatsuda, K. Ito, K. Sakai and Y. Satoh, Thermodynamic Bethe ansatz equations for minimal surfaces in AdS_3 , JHEP **1004** (2010) 108.
49. Y. Hatsuda, K. Ito, K. Sakai and Y. Satoh, Six-point gluon scattering amplitudes from Z_4 -symmetric integrable model, JHEP **1009** (2010) 064.
50. Y. Hatsuda, K. Ito, K. Sakai and Y. Satoh, g-functions and gluon scattering amplitudes at strong coupling, JHEP **1104** (2011) 100.
51. Yuji Satoh, Gauge/string duality and thermodynamic Bethe ansatz equations, 京都大学数理解析研究所講究録別冊、in press.
52. Y. Hatta and T. Ueda, Soft photon anomaly and gauge/string duality, Nucl. Phys. B **837**, (2010) pp.22-39.
53. Y. Hatta, E. Iancu, A.H. Mueller, and D.N. Triantafyllopoulos, Aspects of the UV/IR correspondence: energy broadening and string fluctuations, JHEP **1102** (2011) ref.065, pp.1-47.
54. Y. Hatta, E. Iancu, A.H. Mueller, D.N. Triantafyllopoulos, Radiation by a heavy quark in N=4 SYM at strong coupling, Nucl. Phys. B, in press, arXiv:1102.0232 [hep-th].
55. Y. Kitadono, R. Sahara, T. Uematsu and T. Ueda, Resummation of large logarithms in the heavy-quark effects on the parton distributions inside the virtual photon, Eur. Phys. J. C **70**, No. 4 (2010) pp. 999-1007.
56. T. Kaneko and T. Ueda, Sector decomposition via computational geometry, Proceedings of Science (ACAT 2010) ref. 082, pp. 1-7.

〈著書・総説等〉

1. 山田信博監修、「科学の芽」賞熟考委員会編（金谷 和至 他 著），『もっと知りたい！「科学の芽」の世界 part 2』，筑波大学出版会 (2010)

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 大野 浩史
「A variational study on charmonium properties at finite temperature in lattice QCD（格子 QCD における対角化法を用いた有限温度下でのチャーモニウムの性質に関する研究）」

2. 武田 光平

「Nucleon strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry (厳密なカイラル対称性を持つ格子 QCD からの核子ストレンジクォーク含有量)」

[修士論文]

1. 岩井 雄大

「弦理論を用いた強結合超対称ゲージ理論における散乱振幅の解析」

2. 馬場 隆行

「局所化の方法を用いた N=2 超対称ゲージ理論の低エネルギー有効作用の計算」

〈非常勤講師・集中講義〉

1. 青木 慎也 「Intorduction to lattice QCD and applications to nuclear physcs」, 北陸信越地区素粒子論グループ合宿研究会、2010 年 5 月 22 日

2. 青木 慎也 「非専門家向けの格子 QCD 入門：数値シミュレーションを中心として」, 新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」レクチャーシリーズ第二回、京都大学 基礎物理学研究所、京都、2010 年 12 月 15-16 日

3. 青木 慎也 「格子ゲージ理論の基礎と応用」, 東京大学 大学院総合文化研究科客員教授、2010 年 4 月～2012 年 3 月 (2 年間)。

4. 青木 慎也 「Baryon Interaction on the lattice」, Asian School on Lattice Field Theory 2011 (Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, Mar.14-25, 2011)

5. 金谷 和至 「Finite Temperature QCD on the Lattice」, Asian School on Lattice Field Theory 2011 (Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, Mar.14-25, 2011)

6. 八田 佳孝 「Small-x physics in QCD and gauge/string duality」, 東京大学大学院理学研究科 2010 年 10 月 27-29 日

〈研究成果発表 (講演)〉

[国際会議]

1. 藏増 嘉伸 「Progress in Lattice QCD」 (招待講演),
35th International Conference on High Energy Physics (Palais des Congrès,
Paris, France, July 22-28, 2010)
2. 藏増 嘉伸 「Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD」 (招待講演),
CERN Theory Institute "Future Directions in Lattice Gauge Theory" (CERN,
Geneva, Switzerland, July 19-Aug. 10, 2010)
3. 藏増 嘉伸 「Recent Results from PACS-CS Collaboration」 (招待講演),
Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiment" (Mishima,
Japan, Nov. 4-6, 2010)
4. 藏増 嘉伸 「Application of Block Krylov Subspace Algorithms to the Wilson-Dirac Equation with Multiple Right-Hand Sides in Lattice QCD」 (招待講演),
Sixth Workshop on QCD Numerical Analysis (Boston University, Boston,
USA, Sep. 8-10, 2010)
5. 石塚 成人 「Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations」,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2010.
(the Tanka Village Resort, Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
6. 山崎 剛 「Calculation of Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD」 (招待講演),
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2010.
(the Tanka Village Resort, Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
7. 滑川 裕介 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」,
Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiment" (Mishima,
Japan, Nov. 4-6, 2010)
8. Y. Taniguchi 「Non-perturbative renormalization of quark mass in $N_f = 2 + 1$ QCD with the Schroedinger functional scheme」,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Tanka Village,
Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010
9. Y. Taniguchi 「Non-perturbative renormalization of quark mass in $N_f = 2 + 1$ QCD with the Schroedinger functional scheme」,
国際シンポジウム 「From Quarks to Supernovae」, 静岡県賀茂郡東伊豆町
奈良本, Nov. 28-30, 2010
10. 青木 慎也 「Neutron electric dipole moment from lattice QCD」 (招待講演),
International Workshop on Particle's EDM and Implications, (Shanghai, China,
June 14-16, 2010.)

11. 青木 慎也 「Hadron-Hadron Interactions from lattice QCD」 (招待講演),
Elba XI Workshop “Electron-Nucleus Scattering XI”, (Elba, Italy, June 21-25,
2010.)
12. 青木 慎也 「Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD」 (招待講演),
35th International Conference on High Energy Physics(ICHEP), (July 22-28,
2010, Paris, France.)
13. 青木 慎也 「Extraction of hadron interactions from lattice QCD」 (招待講演),
CERN Theory Institute “Future directions in lattice gauge theory - LGT10 “,
(19 July - 13 August, 2010, CERN, Switzerland.)
14. 青木 慎也 「Nuclear Force from lattice QCD and its extensions」 (招待講演),
MLL-colloquium, (October 21, 2010, TU, Munich, Germany)
15. 青木 慎也 「Extraction of hadron interactions from lattice QCD」 (招待講演),
Japanese-German Seminar 2010 ”Lattice QCD confronts experiments” (4-6,
November, 2010, Mishima, Japan)
16. 青木 慎也 「From Quarks to Supernovae」 (招待講演),
International Symposium ”From Quarks to Supernovae”, (28-30, November,
2011, Atagawa Heights, Izu, Shizuoka, Japan)
17. 青木 慎也 「 α_s from PACS-CS」 (招待講演),
Workshop on Precise Measurement of α_s , (9-11 February 2011, Max Planck
Institut für Physik, Munich, Germany)
18. 石井 理修 「NN interaction from the lattice」 (招待講演),
International conference on the structure of baryons, BARYONS’10, (Dec.7-
11, 2010, Osaka, Japan)
19. 土井 琢身 「The study of the Three Nucleon Force in full QCD Lattice calcu-
lations」 ,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Sardinia,
Italy, Jun. 14-19, 2010)
20. 土井 琢身 「Nucleon strangeness form factors and moments of PDF」 (招待講演),
12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of
the Nucleon (MENU2010) (Virginia, USA, May 31 - Jun. 4, 2010)
21. 土井 琢身 「Exploring Three Nucleon Forces in Lattice QCD」 ,
International conference on the structure of baryons (BARYONS’10) (Osaka,
Japan, Dec. 7-11, 2010)

22. 土井 琢身 「Exploring Two and Three Nucleon Forces in Lattice QCD」 (基調講演),
International Symposium on "From Quarks to Supernovae" (Atagawa, Japan, Nov. 28-30, 2010)
23. 土井 琢身 「Hadron-Hadron Interactions from Lattice QCD」 (招待講演),
Nucleon-Nucleon Interaction and Nuclear Many-Body Problems (Mumbai, India, Nov. 18-27, 2010)
24. 佐々木 健志 「Coupled Channel Approach to $(S,I)=(-2,0)$ Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD」 (招待講演),
The 21st European Conference on Few-Body Problems in Physics (Salamanca, Spain, Aug. 29th-Sept. 3rd, 2010)
25. 佐々木 健志 「Lattice QCD study of baryon-baryon interactions in the $(S,I)=(-2,0)$ system using the coupled-channel formalism」 ,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
26. 武田 光平 「Nucleon strange quark content in $2 + 1$ -flavor QCD」 ,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
27. 石塚 成人 「Lattice QCD calculation of the rho meson decay width」 ,
国際シンポジウム 「From Quarks to Supernovae」 (熱川ハイッ, 静岡県, 2010年11月28日-30日)
28. K. Kanaya 「Finite temperature QCD on the lattice – status 2010」 (招待講演),
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
29. H. Ohno 「An application of the variational analysis to calculate the meson spectral functions」 ,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
30. H. Saito 「Deconfinement transition in QCD near the heavy quark limit」 ,
The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
31. K. Kanaya 「Status of EOS calculation in $2+1$ flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach」 (招待講演),
International workshop "Extreme QCD 2010" (XQCD 2010) (Physikzentrum Bad Honnef, Germany, June 21-23, 2010)

32. H. Ohno 「Scaling study of the chiral phase transition in two flavor QCD at finite chemical potential for the improved Wilson quark action」 ,
International workshop "Extreme QCD 2010" (XQCD 2010) (Physikzentrum Bad Honnef, Germany, June 21-23, 2010)
33. H. Saito 「A method for identifying the order of deconfinement phase transition in QCD」 ,
International workshop "Extreme QCD 2010" (XQCD 2010) (Physikzentrum Bad Honnef, Germany, June 21-23, 2010)
34. K. Kanaya 「Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite temperature」 (招待講演),
International conference on "Quark Confinement and the Hadron Spectrum IX" (QCHS9) (Complutense University of Madrid, Madrid, Spain, Aug. 30-Sept. 4, 2010)
35. H. Ohno 「A method to calculate meson spectral functions with a variational method in lattice QCD」 ,
Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiments" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
36. K. Kanaya 「QCD thermodynamics with Wilson-type quarks」 ,
Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiments" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
37. H. Saito 「The deconfinement phase transition in heavy quark region」 ,
Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiments" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
38. H. Saito 「Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark mass region」 ,
Asian School on Lattice Field Theory 2011 (TIFR, Mumbai, India, Mar.14-25, 2011)
39. 吉江 友照 「Status Report: JLDG」 ,
The 16th International Lattice Data Grid Workshop (Video workshop hosted by Boston Univ., March 5, 2011)
40. Nobuyuki Ishibashi 「Light-cone Gauge String Field Theory and Dimensional Regularization」 ,
"String Field Theory and Related Aspects" (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, October 18-22, 2010)
41. Yuji Satoh 「Gauge/string duality and thermodynamic Bethe ansatz equations」 (招待講演),

RIMS workshop, Infinite Analysis 10 “Developments in Quantum Integrable Systems” (Kyoto University, Kyoto, Japan, June 14-16, 2010)

42. 八田 佳孝 「Application of the AdS/CFT correspondence to high energy scattering in QCD」 ,
Nordita program “AdS/CFT duality and its applications” (Stockholm, Sweden, May 30-Jun. 8, 2010)
43. 八田 佳孝 「On the difference between pp and ppbar cross sections at high energy」 ,
Low-x meeting (Kavala, Greece, Jun. 23-27, 2010)
44. 八田 佳孝 「Eccentricity and elliptic flow in pp collisions at the LHC」 ,
ExtreMe Matter Institute Workshop “Structure functions, geometric scaling and parton saturation” (GSI, Germany. Nov. 22-24, 2010)
45. 八田 佳孝 「Eccentricity and elliptic flow in pp collisions at the LHC」 (招待講演) ,
The 3rd Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2010) (Wuhan, China, Oct. 18-20, 2010)
46. 植田 高寛 「Soft photon production from gauge/string duality」 ,
Low-x meeting 2010 (Kavala, Greece, Jun. 23-27, 2010)
47. 植田 高寛 「A geometric approach to sector decomposition」 ,
3rd Computational Particle Physics Workshop (Tsukuba, Japan, Sep. 23-25, 2010)

[国内学会、研究会]

1. 藏増 嘉伸 「Current Status and Future Perspectives in Lattice Gauge Theories」 ,
次世代格子ゲージシミュレーション研究会 (理化学研究所, 和光市, 2010年9月24-26日)
2. 藏増 嘉伸 「エクサスケールコンピューティングで基礎科学が目指すもの」 ,
2011年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (産業技術総合研究所, つくば市, 2011年1月18-19日)
3. 石塚 成人 「Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations」 ,
日本物理学会 (九州工業大学戸畑キャンパス, 北九州市, 2010年9月11-14日)
4. 滑川 裕介 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」 ,
“New Hadrons” Workshop 2010 (理化学研究所, 和光市, 2011年2月28-3月1日)

5. 谷口 祐介 「 $N_f=2+1$ QCD における Schroedinger functional scheme を用いた非摂動論的な繰り込み」,
日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11-14 日, 九州工業大学
6. 青木 慎也 「次世代スパコンの目指すもの」 & 「私から見た次世代スパコン」,
シンポジウム『次世代スパコンで展開が期待される素粒子物理学』、北陸信越
地区素粒子論グループ合宿研究会、2010 年 5 月 23 日
7. 土井 琢身 「Hadron Interactions from Lattice QCD」,
Workshop on “Next-generation lattice gauge simulation” (理化学研究所、和
光、2010 年 9 月 24-26 日)
8. 土井 琢身 「Lattice QCD approach to Three Nucleon Force (2)」,
日本物理学会 (九州工業大学、北九州、2010 年 9 月 11-14 日)
9. 土井 琢身 「Exploring Three Nucleon Forces in Lattice QCD」,
Workshop on “Current status and prospects for few-body problems in physics”
(福岡国際会議場、福岡、2010 年 8 月 20-21 日)
10. 土井 琢身 「Lattice QCD approach to Three Nucleon Force」,
Workshop on “From YN interactions to Neutron stars”, (理化学研究所、和光、
2010 年 8 月 24 日)
11. 佐々木 健志, 「Hyperon-hyperon interaction from lattice QCD through the
coupled channel formalism」,
KEK 理論センター研究会「ストレンジネス核物理 2010」(KEK, つくば、2011
年 12 月 2 - 4 日)
12. 大野 浩史 「Scaling study of the chiral phase transition in two-flavor QCD for
the improved Wilson quarks at finite density」,
新学術領域研究 (研究領域提案型) 「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」計画研究 A01 班 「量子色力学にもとづく真空構造と
クォーク力学」第 3 回研究会 (筑波大学 計算科学研究センター, July 7, 2010)
13. 斎藤 華 「重いクォークに対する 非閉じ込め相転移の次数」,
原子核三者若手夏の学校 (パノラマランド木島平, 長野, Aug. 8, 2010)
14. 大野 浩史 「格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムスペク
トル関数の研究」,
熱場の量子論とその応用 (京都大学 基礎物理学研究所, Aug. 30, 2010)
15. 大野 浩史 「格子 QCD における対角化の方法を用いたメソンスペクトル関数
の計算」,
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大学戸畑キャンパス、北九州市, Sept.
13, 2010)

16. 斎藤 華 「クォーク質量が大きい領域での QGP 有限温度相転移の解析」,
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大学戸畑キャンパス、北九州市, Sept.
13, 2010)
17. 斎藤 華 「有限密度格子 QCD シミュレーションに向けた試み」,
次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2010 および第 1 回戦略プ
ログラム 5 分野合同ワークショップ (ニチイ学館, 神戸ポートアイランドセン
ター, 神戸, Jan. 17, 2011)
18. 吉江 友照 「計算素粒子物理学のデータ共有基盤 JLDG の高度化」,
平成 21 年度 CSI 委託事業報告交流会 (学術総合センター, 東京, 2010 年 6 月
21 日)
19. 吉江 友照 「Hepnet-J/sc 報告」,
Hepnet-J ユーザー会 (東大宇宙線研究所神岡研究施設, 神岡, 2010 年 10 月
30-31 日)
20. 吉江 友照 「格子 QCD データグリッド ILDG/JLDG の構築と運用」(招待講
演),
第 3 回データ科学ワークショップ (筑波大計算科学研究センター, つくば, 2010
年 11 月 25-26 日)
21. 酒井 一博、佐藤 勇二, 「 AdS_3 時空における有限ギャップ開弦解」,
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大、北九州、2010 年 9 月 11-14 日)
22. 初田 泰之, 伊藤 克司, 酒井 一博, 佐藤 勇二 「Thermodynamic Bethe ansatz
equations for minimal surfaces in AdS_3 」,
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大、北九州、2010 年 9 月 11-14 日)
23. 初田 泰之, 伊藤 克司, 酒井 一博, 佐藤 勇二 「Six-point gluon scattering ampli
tudes from Z_4 symmetric integrable model」,
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大、北九州、2010 年 9 月 11-14 日)
24. 佐藤 勇二 「Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and inte
grability」,
立教大学「場の理論、量子重力研究会」招待講演 (立教大学、東京、2011 年 1
月 5-6 日)
25. 初田 泰之, 伊藤 克司, 酒井 一博, 佐藤 勇二 「2 次元 CFT を用いた 4 次元グ
ルーオン散乱振幅の解析」,
日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大、新潟、2011 年 3 月 25-28 日)
26. 八田 佳孝 「AdS/CFT による核子構造研究」,
KEK 研究会「核子構造研究の新展開 2011」, (高エネルギー加速器研究機構、
茨城、2011 年 1 月 7-8 日)

27. 八田 佳孝「AdS/CFTのコライダー物理への応用」(シンポジウム招待講演),
日本物理学会秋季大会(九州工業大学、北九州、2010年9月11-14日)
28. 植田 高寛「軟光子放出過程のゲージ弦対応による解析」,
日本物理学会秋季大会(九州工業大学、北九州、2010年9月11-14日)
29. 植田 高寛「Eccentricity and elliptic flow in high multiplicity pp collisions」,
第33回素粒子論グループ四国セミナー(徳島大学、徳島、2010年12月25-26日)

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 青木慎也 他,
科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」主催国際シンポジウム“From Quarks to Supernovae”
(熱川ハイツ, 伊豆, 静岡, 2010年11月28-30日)
参加者 約80名
2. 青木慎也 他,
科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」レクチャーシリーズの主催
第一回 2010年6月9-10日 東京大学 理学部, 東京
第二回 2010年12月15-16日 京都大学 基礎物理学研究所, 京都
3. 金谷 和至 他,
日本学術振興会 二国間交流事業 日独セミナー「格子QCDの新段階 — 実験の再現から予言へ (Lattice QCD confronts experiment)」
(三島市・三島商工会議所会館, 2010年11月4-6日)
参加者 44名 (内、ドイツ13名、米国3名)
4. 金谷 和至 他,
国際ワークショップ「有限温度有限密度QCDの非摂動論的展望 (Nonperturbative aspects of QCD at finite temperature and density)」
(筑波大学計算科学研究センター, 2010年11月8-9日)
参加者 43名 (内、海外7ヶ国12名)
5. 金谷 和至 他,
Asian School on Lattice Field Theory 2011
(Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, 2011年3月14-25日)
参加者 約40名

II . 素粒子実験グループ

| | |
|----------|--------------------|
| 教授 | 金 信弘, 受川 史彦 |
| 講師 | 原 和彦, 武内 勇司, 佐藤構二 |
| 研究科特別研究員 | 倉田 正和, 永井康一 |
| 科研費研究員 | 三宅 秀樹, 永井義一, 戸村 友宣 |
| 大学院生 | 17 名 |
| 学群 4 年次生 | 5 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 は現在進行中, ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始, ILC は検討設計中の実験である。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。また, ニュートリノ崩壊の探索を目的とした高分解能光検出器の開発を行っている。

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は, 米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり, 日本をはじめアジア, 北米, 欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれている。1996 年の物理実験 Run I の終了後 CDF 検出器およびテバトロン加速器の増強を経て, 2001 年度より Run II 実験が開始された。

1996 年に前回の物理実験 Run I が終了した後, テバトロン加速器は, 大幅な増強が行われ, ビーム輝度およびエネルギーが増大した。これに伴い CDF も, 検出器の増強を行ってきたが, 新しい検出器の建設を終え, 2001 年 6 月より本格的に物理データの収集 Run II を開始した。テバトロン加速器の瞬間ルミノシティはこれまでに, 最高値 $\mathcal{L} = 4.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されており設計値 $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を大きく上回っている。また, 週毎の積分ルミノシティも最大で 73 pb^{-1} , 全積分ルミノシティは 11.2 fb^{-1} に達している。CDF 検出器により記録されたデータ量は約 9.3 fb^{-1} である。また, テバトロン加速器の重心系エネルギーは 1.8 TeV から 1.96 TeV に増強され, 検出器も改良・増強の結果, 検出効率が向上した。このため, データ量の増大のみならず, 単位積分ルミノシティあたりの有効観測事象数の増加も得られている。

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

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

(1) トップクォークの物理

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見後十年以上が経過し, Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いて, その様々な性質が詳細に研究されている。テバトロンでのトップクォーク生成は, クォーク・反クォーク衝突を素過程とする対生成が主で

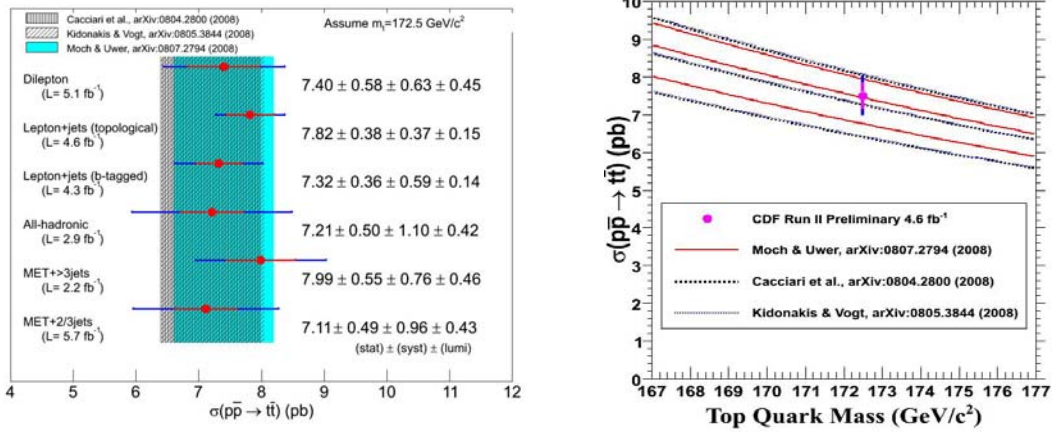


図 1: 左: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積の測定一覧. 右: 生成断面積の質量依存性.

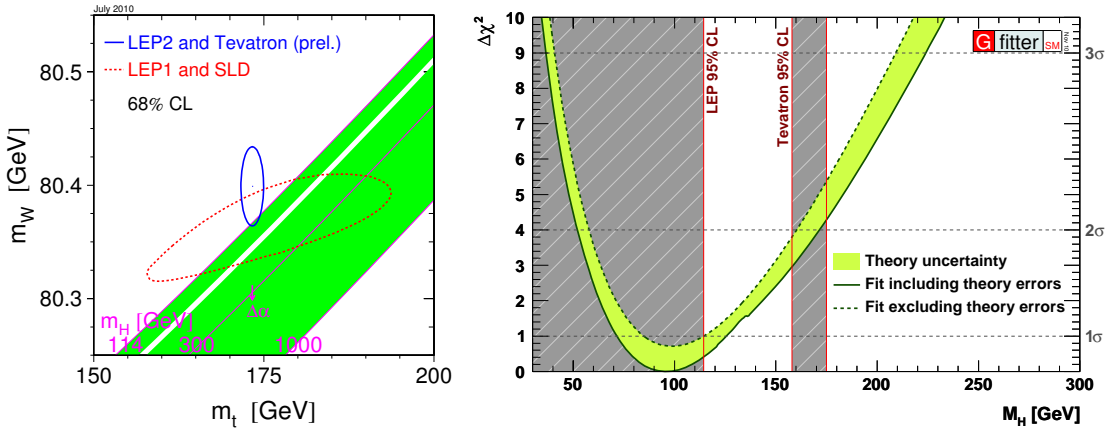


図 2: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

ある. その生成断面積は, 最大 5.1 fb^{-1} 相当のデータと多くの終状態を用いて測定されている (図 1). すべてのチャンネルを総合すると, $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.50 \pm 0.31 \pm 0.34 \pm 0.15 \text{ pb}$ という結果を得た. これは, その重心系エネルギー依存性ととも, 摂動論的 QCD による理論予言値とよく一致する.

質量の測定も同様に多くの終状態を用いて測定されている. CDF 実験の平均値は $m_{\text{top}} = 172.6 \pm 0.9 \pm 1.2 \text{ GeV}/c^2$ であり, 他実験も含むすべての測定の平均値は $173.1 \pm 0.6 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$ である. トップクォークの質量と W ボソンの質量をともに測定することにより, ヒッグス粒子の質量に対する制限を得ることができる. 図 2 にこれを示す. 標準理論ヒッグス粒子の質量について $m_{\text{Higgs}} = 83^{+30}_{-23} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) $m_{\text{Higgs}} = 95.7^{+30.6}_{-24.2} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $m_{\text{Higgs}} < 171.5 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た.

その他, 2010 年度に得られた結果に, dilepton チャンネルを用いたトップクォーク対生成機構の解明がある.

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. $t\bar{t}$ 系の角運動量は $|1, \pm 1\rangle$ となる. 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ことか

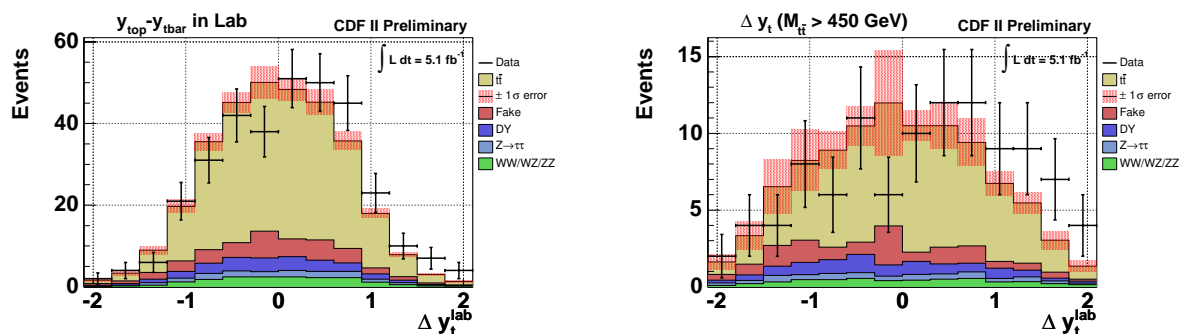


図 3: $t\bar{t}$ 対生成における前後方非対称度の測定． $t\bar{t}$ 対の質量 $m_{t\bar{t}}$ について，全領域（左）と高質量領域 $m_{t\bar{t}} > 450 \text{ GeV}/c^2$ （右）における結果．

ら，パートンの重心系における 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想される．標準理論を超える物理で軸性ベクトル結合を含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もある．

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．実験的には t および \bar{t} クォークのラピディティ y の差 Δy_t を測定するのが便利である．この分布を図 3 に示す．非対称度の測定値は $A_{\text{FB}} = +0.14 \pm 0.05$ （図左）である． $t\bar{t}$ 対の質量 $m_{t\bar{t}}$ について，高質量領域 $m_{t\bar{t}} > 450 \text{ GeV}/c^2$ （図右）を見ると，非対称度は $A_{\text{FB}} = +0.212 \pm 0.096$ と，より大きくなる．これらは背景事象の寄与を含む．補正後の値は， $A_{\text{FB}} = +0.42 \pm 0.15 \pm 0.05$ であり，非対称度がない場合から 2.6 標準偏差，予言値 $+0.06$ から 2.3 標準偏差だけ異なる．

Lepton plus jets チャンネルを用いた測定も同じ傾向を示しており，新たな物理の探索の観点から興味深い．

(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．

CDF Run II 実験での B 粒子の物理の目標のひとつは，ストレンジネスを持つ中性 B 中間子 B_s^0 の粒子・反粒子振動の観測にあった．2006 年度にはこれを達成し，弱い相互作用における CP 対称性の破れを記述する小林・益川理論を高精度で検証することに成功した．

中性流による稀崩壊 $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ は，いわゆる flavor-changing neutral current による崩壊であり，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 2009 年度に，この崩壊の測定結果が得られた．

現在，より多くのデータの解析と，信号再構成のための新たなトリガーと崩壊様式を用いることにより，より感度のよい測定を行っており，近くその結果が得られる予定である．

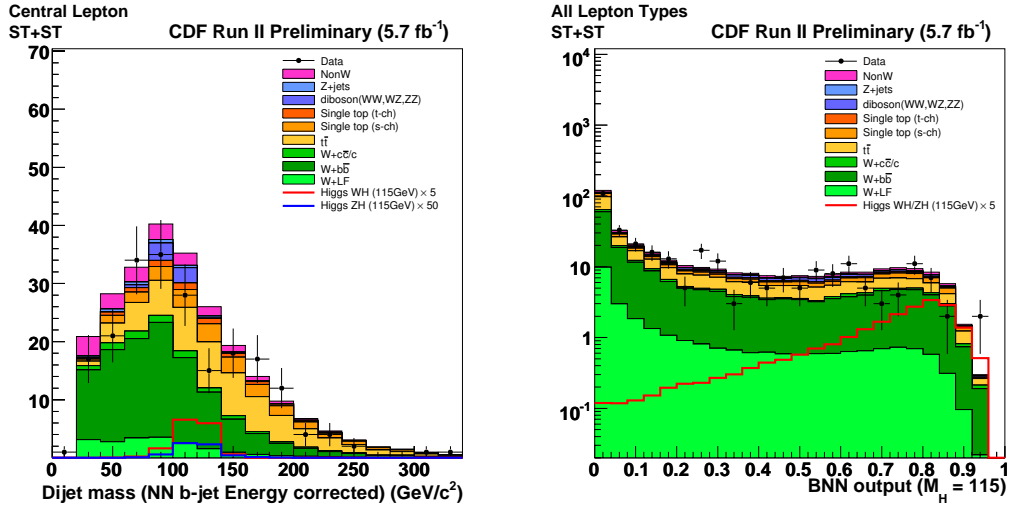


図 4: $p\bar{p} \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索．左：二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布．右：人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離．

これにより，Belle 実験を上回る精度が得られる見込みであり，標準理論の検証および新物理の探索に寄与する．

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

生成率は，単一生成が一番高いが，ヒッグス粒子が軽い場合には $p\bar{p} \rightarrow b\bar{b}X$ 過程によるバックグラウンド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．終状態は，高運動量のレプトンと消失運動量（あるいはレプトン対）と $b\bar{b}$ クォーク対となる． b クォーク起源のジェットを，トップクォーク探索時と同様に，二次崩壊点の存在を要求して同定する．主なバックグラウンドは，QCD 過程による W 粒子と $b\bar{b}$ 対の随伴生成である．図 4（左）に $b\bar{b}$ 候補対の質量分布を示す．他の運動学的変数を加えて人工ニューラルネットワークの入力として利用し，信号と背景事象の分離を行った．その出力を図 4（右）に示す．

中間質量領域（ $140 \text{ GeV}/c^2$ 程度）では， $H \rightarrow W^+W^{(*)-}$ 崩壊が寄与し始める． W ボソンとの随伴生成では，終状態に W ボソンが 3 個存在し，そのうちの二つは必ず同電荷を持つ．それらがレプトンに崩壊すれば，同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による寄与を探索したが，いずれも既知のバックグラウンドによるものと矛盾しない．よって，ヒッグス粒子生成に対する上限を設定した．図 5

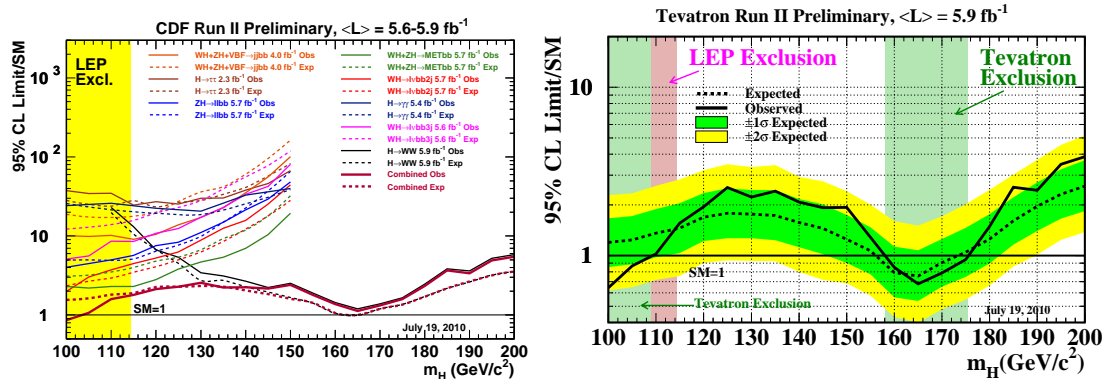


図 5: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限（観測値）の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．左：CDF 実験の結果，右：CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの．

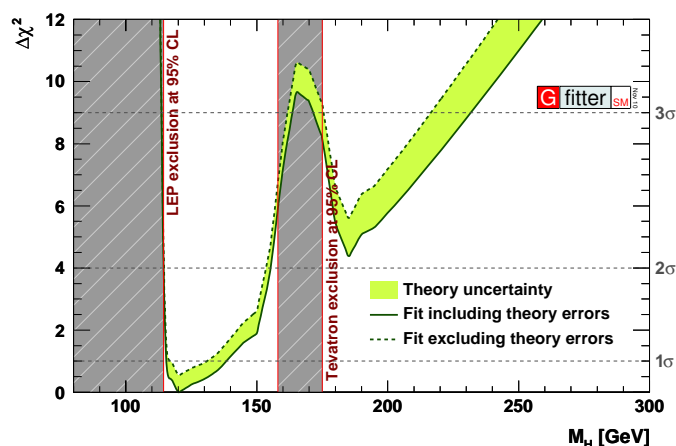


図 6: 標準模型ヒッグス粒子探索の質量に対する制限．間接探索と直接探索の結果を総合したもの．

（左）にこれらの上限値の標準理論による予言値に対する比を示す．低質量領域では実験値は予言値の 2 倍程度であり，質量 $160 \text{ GeV}/c^2$ 近辺ではほぼ予言値に等しい．テバトロンでのもうひとつの実験（D0 実験）の結果と総合した場合の上限値を同図（右）に示す．質量領域 $M_{\text{Higgs}} < 109 \text{ GeV}/c^2$ および $158 < M_{\text{Higgs}} < 175 \text{ GeV}/c^2$ では実験的に得られた上限値が理論値を下回っており，標準理論のヒッグス粒子はこの質量領域において棄却された．

この直接探索の結果を踏まえて得られた，ヒッグス粒子の質量に対する制限を図 6 に示す．比較的軽いヒッグス粒子が示唆されており，今後の研究の進展が待たれる．

以上に CDF Run II 実験においてこれまでに得られた結果および今後期待される成果を述べた．同実験は，米国 2011 年度末をもつての運転の終了が決定したが，それ以降も数年は物理解析を継続する．最終的に 12 fb^{-1} 相当のデータを蓄積する予定であり，ヒッグス粒子の質量に対するより強い制限，標準理論を超える物理の探索など，素粒子物理学の知見を深める多くの結果を生み出すと期待される．

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) は, 2010 年 3 月末に重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突を初めて実現し, 2010 年度は積算輝度 48.1 pb^{-1} の衝突を達成した. ATLAS 実験グループは効率良いデータ収集で 45.0 pb^{-1} を集めることで, 2010 年度を最初の LHC 物理の年とした. さらに核子あたり 2.76 TeV での鉛-鉛衝突実験も 1ヶ月間行い, $1.7 \mu\text{b}^{-1}$ のデータを用いた重イオン衝突の測定も行った.

2010 年度の最大陽子陽子衝突輝度は, $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり, エネルギー (設計 14 TeV) とともに設計値である $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に至っていないが, 今度, 徐々に改善され, 2021 年からは, LHC の設計値を超えた sLHC 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) 標準模型の物理

標準模型粒子の測定として W/Z 粒子の生成断面積, $W+\text{jets}$ 事象の研究, トップ対生成の生成断面積, 光子生成, ジェットの生成, b の物理, J/ψ の生成等に関する研究を進めている.

摂動 QCD (pQCD) 計算は高エネルギーでのハドロン衝突を記述するために不可欠のものであるが, W 生成をプローブとして pQCD を評価するために $W+\text{jets}$ 生成事象を研究している. 図 7 は, W とジェットが随伴生成される事象における, ジェット p_T を横軸にとった $W+\text{jets}$ 微分断面積である. 特に 2 番目に p_T の大きなジェットに注目することで, pQCD 計算の差異への感度を上げているが, 考慮した 4 つの計算とは断面積の絶対値を含め不確かさの範囲で一致した. 今後, より統計を蓄積して詳細な比較を行う.

トップの物理については, $t\bar{t}$ 対生成, 単トップ生成の探索, トップの質量測定などが行われている. 質量測定はいくつかの解析方法で行っているが, もっとも精度の良い結果は $169.3 \pm 4.0 \pm 4.9 \text{ GeV}/c^2$ となり, テバトン平均の $173.3 \pm 0.6 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$ と一致した値が得られた. 図 8 は, $t\bar{t}$ 生成を 3 レプトン終状態で同定する選択で, レプトン対に崩壊するトップの質量を再構成したものである. また $t\bar{t}$ 対生成断面積を CMS グループの結果および QCD 計算と比較している.

(2) ジェット生成を用いた標準模型を超える物理の探索

QCD ジェットの生成断面積を精度良く測定することで, QCD の検証とともに標準模型を超える物理の探索が可能である.

衝突から発生する p_T の最も高い 2 ジェットの不变質量に対する生成断面積を測定し, 図 9 には 2 つのジェットのラピディティ差 $y^* = (y_1 - y_2)/2$ に対し $|y^*| < 0.6$ の中央領域に生成される事象数を $|y^*| < 1.7$ に生成される事象数で規格化した分布を示す. この分布はジェットが QCD 過程で生成されるとほぼフラットな分布となり, 図に比較したように QCD 計算 (PYTHIA + MRST2007LO* の LO 計算に NLOJET による NLO 補正を施したもの) と一致がよい. 破線で示した分布は, クォークコンタクト項のエネルギースケールが 5 TeV の場合の予想分布で, この結果からクォークは 95%信頼度で 9.5 TeV までは構造が無いと結論した.

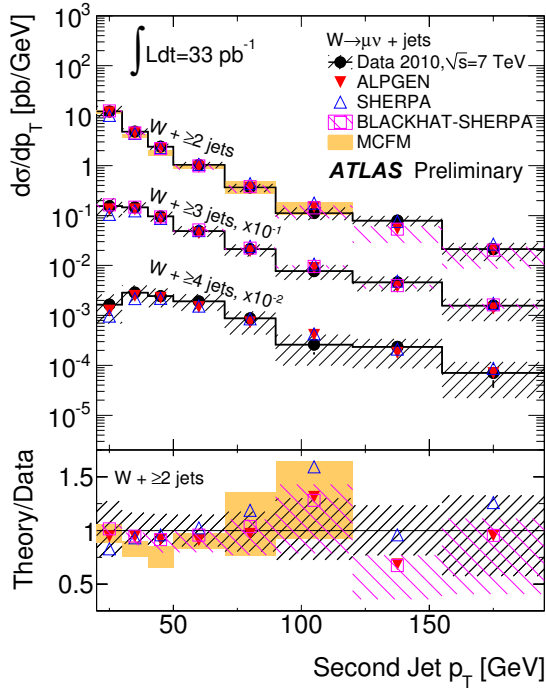


図 7: W +jets 生成に於ける 2 番目に横運動量の高いジェットの p_T 分布. $p_T > 20$ GeV, $|\eta_j| < 2.8$ のジェット数ごとに, いくつかの pQCD 計算と比較している. 分布はバックグラウンドを差引き, 検出器の分解能による分布のゆがみ補正も行っている. 下は各 pQCD 計算とデータとの比で, 不確かさの範囲で全てデータとの顕著な差異はない.

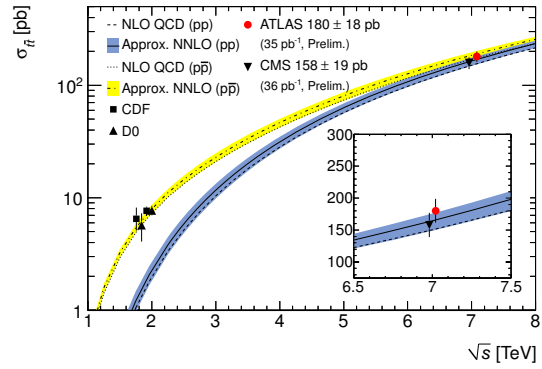
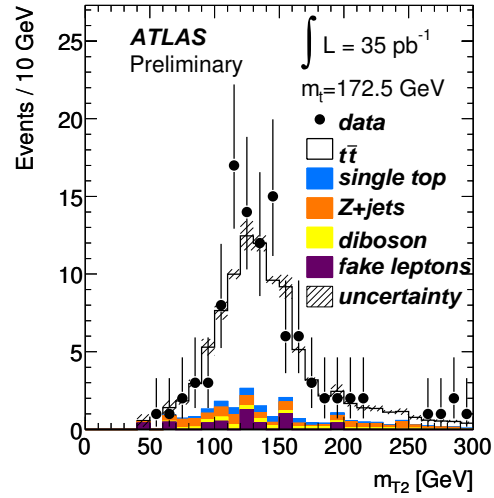


図 8: $t\bar{t}$ 対生成に於ける (上) 質量測定の一例, (下) 断面積の NNLO QCD 計算および他の実験との比較.

クォークに構造があり励起状態が存在すると, $qg \rightarrow g^*$ の過程で生成され $g^* \rightarrow qg, qW, qZ, q\gamma$ の崩壊が期待される. これらの結合が標準模型のクォークと同じと仮定すると 2 ジェットの不变質量分布に励起状態質量に特徴づけられるピークが観測される. そのようなピークを探したところ図 10 に示すように励起状態の質量に対する下限値が得られる. 95%信頼度で 0.60 TeV から 2.64 TeV は排除された. 同様に axigluon に対しても 2.10 TeV までを排除した.

(3) Higgs および SUSY 粒子の探索

Higgs 粒子の探索は LHC 実験の最大の目標であり, 超対称性 SUSY は階層性の問題を解決する最も有力な理論である.

SUSY-Higgs 探索を含め, いくつかの崩壊モードで Higgs 粒子の探索が行われている. 最も標準模型 Higgs に感度の良いのは $Higgs \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ に崩壊するモードであり, その探索結果を図 11 に示す. 縦軸は標準模型での生成断面積で規格化した Higgs 生成の 95%信頼度での下限値を示す. 下限値の評価方法として 2 種類の方法を採用比較しているが, 破線が Higgs が無いと仮定した場合のバックグラウンドのばらつきから予想されるライン, 実線は

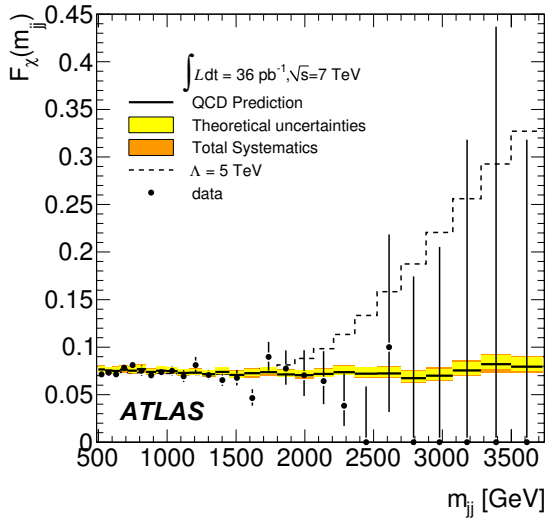


図 9: 2 ジェットが中央領域に生成される割合の 2 ジェット不変質量に対する分布 .

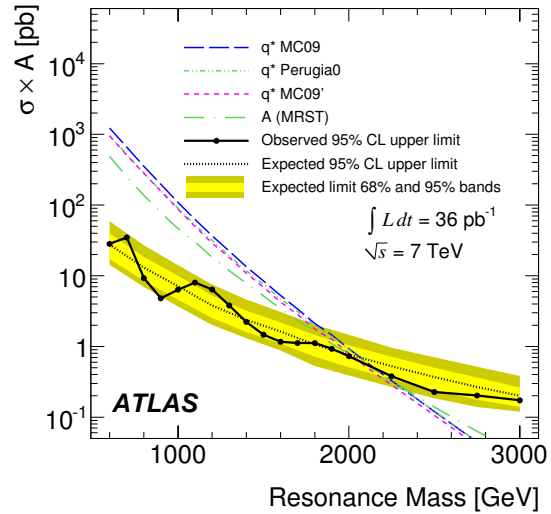


図 10: 励起状態クォーク生成の 95%信頼度での質量下限値 .

実際のデータからの値で、両者がほぼ一致していることはモンテカルロ等の評価法が信頼できることを意味する。それを中心とする帯域は評価の不確かさを意味する。テバトロンでの測定結果とも比較し、また、テバトロンよりは劣るが極めて初期の段階で比較できる測定に達したことは特筆すべきである。

SUSY の探索はいくつかの生成崩壊モードで行われているが、図 12 には、陽子陽子衝突から SUSY 粒子である squark, gluino が生成され、それらが最も軽い SUSY 粒子 (LSP) に崩壊する過程から期待される信号を捕えることで行った SUSY 探索の結果を示す。特に SUSY モデルとしては MSUGRA を仮定した場合、squark 質量 = gluino 質量の条件では $815 \text{ GeV}/c^2$ 以下を排除した。これは図に示すように今までの LEP やテバトロンでの測定よりも遥かに感度の良い測定である。

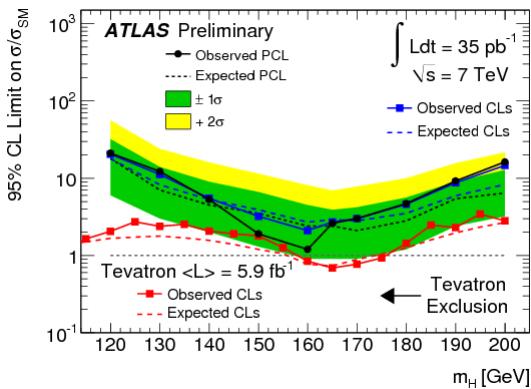


図 11: 排除される Higgs 生成断面積 (標準モデルの断面積で規格化)

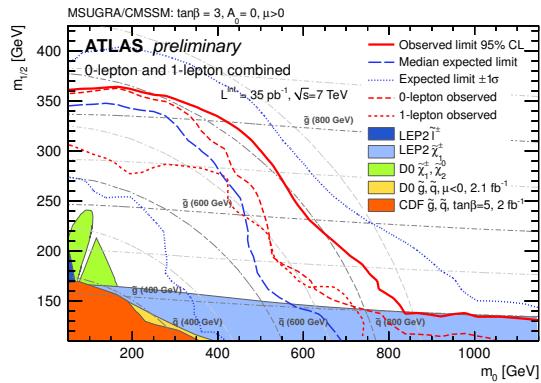


図 12: MSUGRA での SUSY スカラーとフェルミオン質量空間での質量下限値。太い実線が 95%CL での測定下限値。

(4) Pb-Pb 衝突でのジェットクエンチの観測

核子あたり 2.76 TeV の Pb-Pb 衝突で、2 ジェット生成事象でのジェットの p_T バランスの測定を行った。 p_T の非対称性を $A_J = (p_T(1) - p_T(2)) / (p_T(1) + p_T(2))$ で定義し、 $p_T(1) > 100$, $p_T(2) > 25$ GeV を要求する。前方カロリメータ ($3.2 < |\eta| < 4.9$) でのエネルギー和から核子衝突の中心度を定義し、中心度で 4 つの区間に分けて A_J の分布を求めたものが図 13 である。衝突中心度が高いと、非対称度が増え、図に示した 2 ジェット間の角度分布も、より角度が狭いイベントが増加する。同じ解析を陽子陽子衝突で行うとこのような依存性はなく、重イオン衝突に特有な現象と結論できる。この現象は、例えば、生成されたクォークやグルーオンがハドロン化する前にプラズマ状態の周囲と多重散乱することでエネルギーを失い、その散乱が事象毎に違うために p_T バランスが失われるとするジェットクエンチ現象で説明できる。

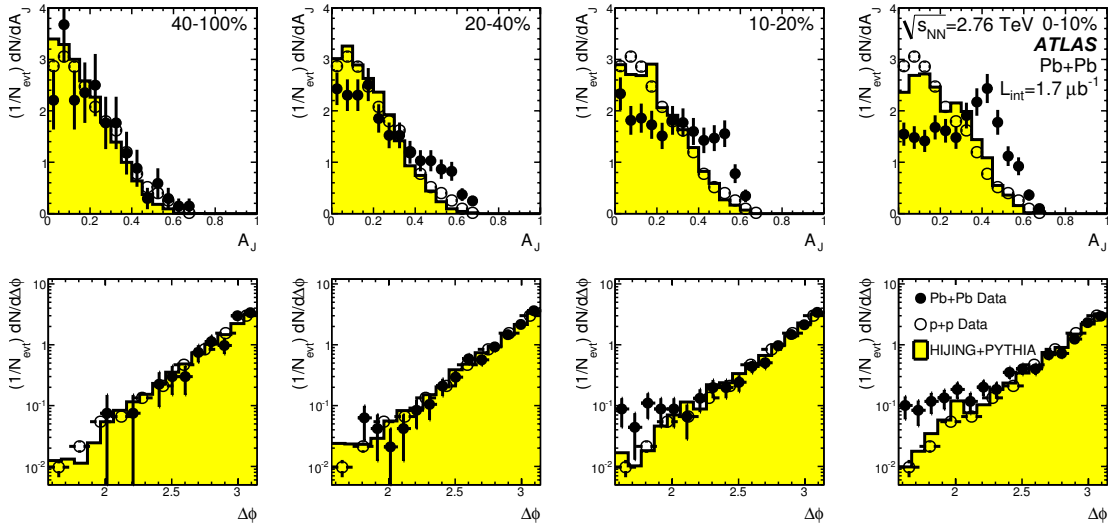


図 13: (上)2 ジェットの p_T 非対称度分布, (下)2 ジェット間の角度分布を衝突中心度で区別 (右ほど中心度が高い) して, Pb-Pb 衝突と p-p 衝突で比較。

(5) sLHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

sLHC での内部飛跡検出器には、 10^{15} 1-MeV n_{eq} cm^{-2} 相当の放射線量が予想されている。現行のセンサー基板には n 型の高抵抗シリコンを用いているが、放射線を浴びると実効的に p 型不純物が増える。読み出し電極には p 型シリコンを用いているので、基板が p 型に変換した後は全空乏化電圧がシステムの耐圧 (500 V) を超えると電極での信号分離ができなくなる。そのため、sLHC 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。p-n 接合が常に読み出し電極側にあるので、全空乏化電圧がシステム耐圧を超えたら、部分空乏状態でも信号が読み出せる利点がある。

p 型基板を用いたマイクロストリップでは、可動電子層が蓄積しやすく電極間の信号分離を劣化させる。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て、P-STOP による電極分離の構造を変えたセンサーを試作した。陽子線と中性子線を実際に照射し、放射線損傷の評価を行った結果、sLHC の高放射線線量を受けても使用可能な設計が

確立した．全空乏化電圧の上昇も急激ではなく，収集電荷量も 50%を下回ることはない．これらの成果を受けて，本センサーは ATLAS の正式の基本設計として認められるに至った．

2010 年度は，主に ^{60}Co γ を sLHC の運転時に近い線量率で照射し，センサーの振る舞いを詳細に調べた．また，加速器事故で一度に大量の粒子が入射された場合に発生する大電流からのセンサー保護機能の評価を継続して行った．

図 14 は 100 Gy/h の照射率で ^{60}Co γ 線をセンサーに当てながらブレークダウン電圧を測定したものである．sLHC では，最大 50 Gy/h 程度なのでその条件に近い．2 種類の高純度 FZ 基板について測定した結果，未照射時に 1000 V ないし 600 V であった値が照射直後に 500 V ないし 100 V に低下し，その後次第に未照射での値に回復していく．センサーの全空乏化電圧は約 200 V なので，それを下回る FZ2 は使用できない．この変化はセンサーの周辺構造の設計によるものと考えられ，今後，より詳細な評価と改良を加えることで，安定して動作するセンサー設計をめざす．

ビームロスなどに起因する大電流が短時間に発生すると，一時的に電極電位が低下し，アンプにつながれたアルミ電極間にある酸化膜を破壊することが想定される．そのため，電極電位が低下した場合に，有効に電流を逃がす機構をパンチスルーを用いて設計した．実際に赤外線レーザーをセンサーに入射し，パンチスルーがどのように実現されるかを測定した．電極の抵抗のために起る電圧降下は，レーザーの入射位置，信号読み出し位置の影響を受けるので，図 15 は，8 mm 長の電極に対して，入射位置，読み出し位置の 4 つの組み合わせで，電極電位がどこまで上がるかを直接測定した．このような電圧が加わる時間情報も得ているので，パンチスルー構造の改良とともにセンサー設計の仕様となる耐久試験を計画している．

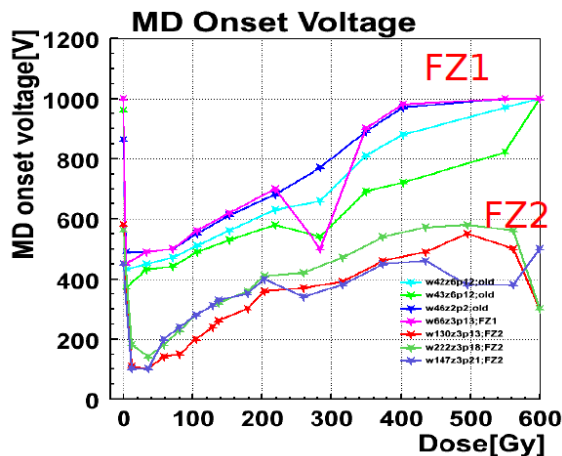


図 14: コバルト照射中のマイクロ放電電圧の変化を 2 種類の FZ ウェハーで試験．照射率は 100 Gy/h.

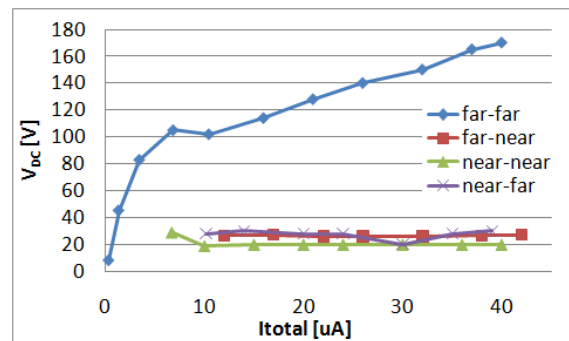


図 15: 赤外パルスレーザーを入射した時に，読み出し電極に発生する最大電圧．レーザーの入射場所や電圧を測定する場所の 4 つの組み合わせでのデータ．横軸の電流値 $40\mu\text{A}$ で約 10^6 個の荷電粒子が一度に通過した場合に相当する．

(6) 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ために，沖セミコン

ダクター社の $0.20\mu\text{m}$ SOIプロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で開発研究を行っている。

素粒子実験での衝突点近傍に設置されるピクセル検出器には、荷電粒子を捕えられる十分な深さの空乏層が実現され、しかし多重散乱を抑えるために物質量を減らす要請もある。一体型でノイズを低く抑えられる SOI デバイスにとって、同時に十分に高い S/N とセンサー薄型化が実現できれば、極めて有効な特長となる。

通常センサーは $260\mu\text{m}$ の厚みであるが、さらに $100\mu\text{m}$ まで薄くする試作を行った。図 16 は赤外レーザーを表面から赤色レーザーを裏面から入射した場合の信号量をバイアス電圧を変えて測定した。赤外に対しては、空乏層の広がりに応じて、また赤色には空乏層が裏面に達する電圧で急激に信号量が増え、その後一定になる特徴的な応答が得られ、薄型化により SOI センサーで初めて全空乏化デバイスが実現された。同センサーは東北大学 670MeV の陽電子ビームで試験を行った。通常厚のセンサーとの信号量分布の比較を図 17 に示す。期待通り、同じバイアス電圧では等量の収集電荷量が観測された。S/N は約 20 を達成し、飛跡検出器として十分な性能を示した。

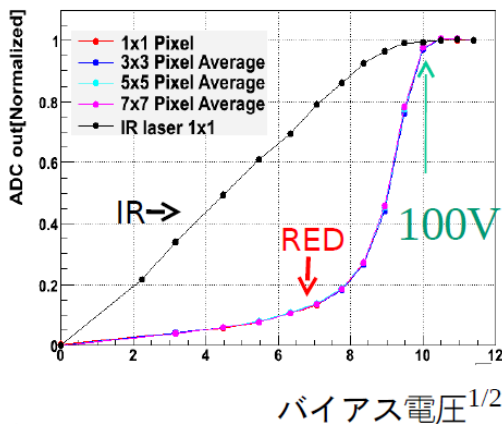


図 16: 薄型化した INTPIX の赤外および赤色レーザーに対する応答。

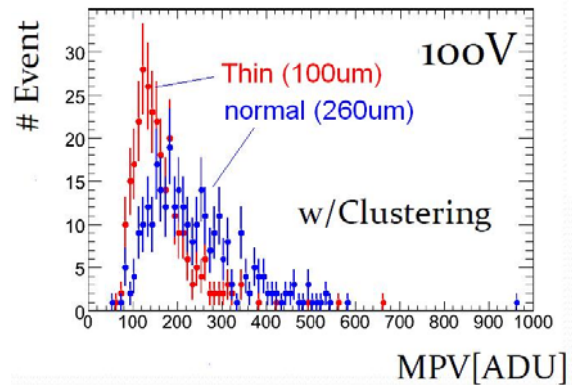


図 17: 陽電子ビームにより測定された波高分布。バイアス = 100V 。

【3】 ILC 実験

次世代のエネルギーフロンティアにおける素粒子実験を遂行するため、重心系エネルギー 0.5 TeV の電子・陽電子衝突型線形加速器を建設する計画が提案されている。国際協力により進められているこの計画は ILC 計画と名付けられ、参加各国の大学や研究機関で精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている。ILC での実験では、素粒子である電子を衝突に用いるので、加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ、またバックグラウンドの少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる。

現在筑波大学グループでは、KEK、神戸大、信州大、新潟大等と共同で、ILC 実験において検討される検出器候補のひとつ、ILD 検出器(図 18 左下)のうち、電磁カロリメータの研究開発を行なっている。ILD の電磁カロリメータでは、シンチレータとタングステン板を積層構造にしたサンプリング型のものが候補となっている。

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であり、そのために ILC 実験

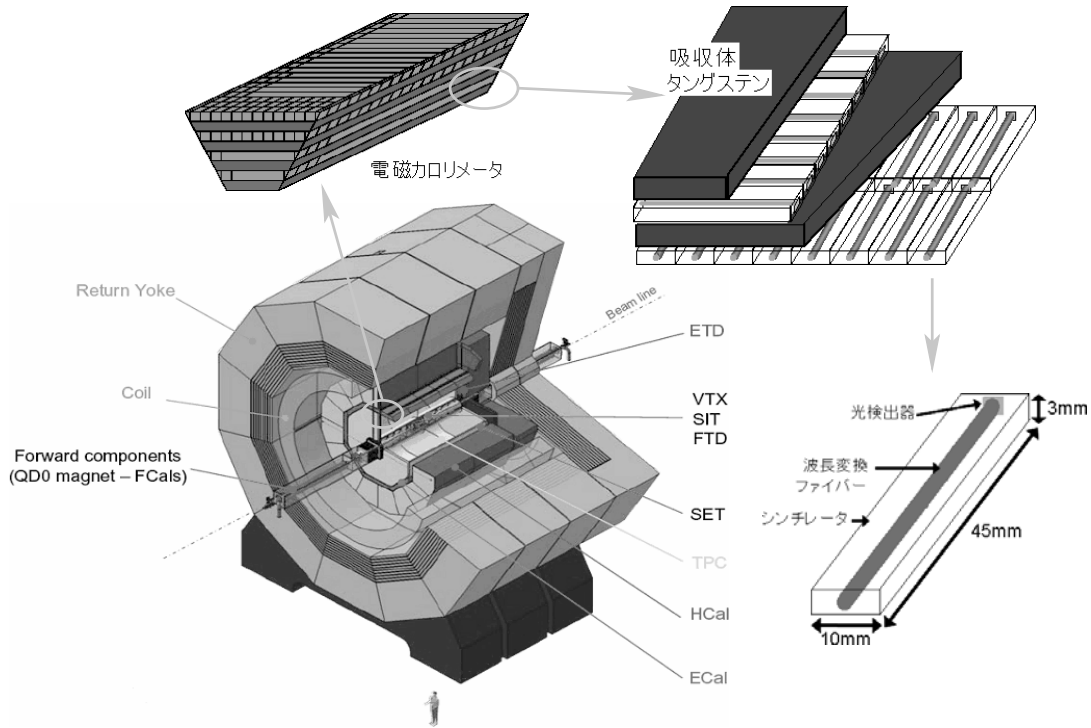


図 18: ILC(ILD) 検出器の構造，および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの．カロリメータは，吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており，シンチレータ層は，ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている．またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ，光検出器によって読み出される．

では，ジェットに対するエネルギー測定精度をより向上させるため，Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネルギー測定方法が提唱されている．この方法では，ジェット中の粒子をカロリメータ中で一つ一つ区別し，中性粒子についてはカロリメータでエネルギーを測定し，荷電粒子の運動量については，より優れた分解能を持つ飛跡検出器で測定することにより，ジェットに対するエネルギー分解能の向上を図るものである．このような方法を用いるには，カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネ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．我々は，このような細分割を実現するために，図 18 右上のように，シンチレータを短冊（ストリップ）型にし，交差させて交互に積み重ねる方法が考えられている．

しかしながら，ILC カロリメータでは，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．また，磁場中で使用されることもあり，これまで広く用いられてきた光センサーである光電子増倍管の使用は難しい．このため，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，ILC カロリメータの読み出し用センサーとしては，ほぼ唯一の解となる．

我々は，これまで，浜松ホトニクス，KEK を中心とした光センサーグループと共に，ILC カロリメータでの使用を前提として 1600 ピクセルの $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の MPPC のサンプル

を用い光検出効率，応答線形性，増幅率，ノイズ頻度，クロストークの測定，放射線耐性，信号頻度依存性，そして温度加速試験による基礎特性の長期安定性の測定を行ってきた。

昨年度(2010年度)においては，MPPC単体の試験から更により実機に近づけた形として，シンチレータのストリップ及び波長変換ファイバーとMPPCを組み合わせたモジュールでの応答特性の試験を主に行った。また，ILCカロリメータグループにおいて，MPPCを用いたストリップ型細分割電磁カロリメータのプロトタイプを試作し，2008年および2009年に米国フェルミ国立加速器研究所において，ビームテストによる性能試験を行っているが，このビームテストの結果をMPPCの応答特性とシンチレータストリップ内の応答一様性を考量した上でのシミュレーションとの比較を行った。MPPCは，非常に短い光パルスに対

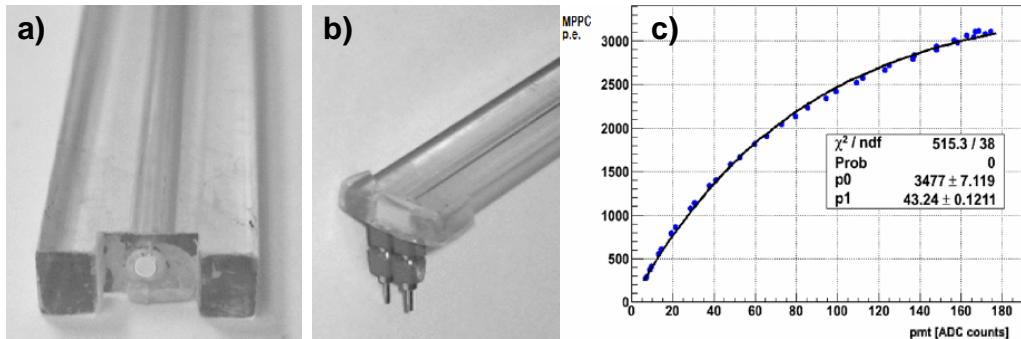


図 19: a) ILC 電磁カロリメータ細分割ストリップシンチレータ．波長変換ファイバーが埋め込まれている．b) ストリップに MPPC を取り付けた状態．c) レーザ光入射に対する MPPC 読み出しストリップの応答．横軸は，光量モニターのために波長変換ファイバーのもう一端に接続している光電子増倍管の出力電荷．

しては，ピクセル数以上の出力を出せないため，ピクセル数に近い光電子数入力に対しては飽和が起こる．しかし，MPPC のピクセルは，4ns という非常に短い回復時間を持っていることがわかっており，入力される光パルスの時間幅がこの回復時間よりも長いときは同じピクセルが何度も出力を出すことによって，MPPC は，ピクセル数以上の出力を出すことができると考えられる．したがって，MPPC の出力飽和が始まるのがどのくらいの光電子数で，完全に出力が飽和するのがどこなのかは，光パルスの時間形状に依存する．図 19 は，より実機に近い光パルス入力が MPPC に入射した場合の MPPC の応答を見るために用いた細分割ストリップシンチレータ，およびシンチレータ部分にレーザーを入射させることにより得た MPPC の応答曲線を示している．1600 ピクセルの MPPC に対して，飽和点が約 3400 ピクセル数相当であることがわかる．図 20 は，ストリップ型細分割電磁カロリメータの実証試験のために行われたビームテストのデータと比較するためのシミュレーションの様子を示す．細分割ストリップは，一端から MPPC で光を読み出す構造のため，ストリップ内のどの位置に荷電粒子が通過したかによって出力の大きさが異なることが図に示されている．このシミュレーションにおいては，先に述べられた MPPC 応答曲線，およびこのストリップ内の減衰曲線が考慮されている．このシミュレーションの結果から，ストリップ内の位置による応答非一様性は，電磁カロリメータのエネルギーの分解能には，ほとんど寄与しないということわかった．

今後，これらの研究を更に発展させ，より実機に近い条件での MPPC の特性を調べ，新たな試作機による実証試験等も計画している．

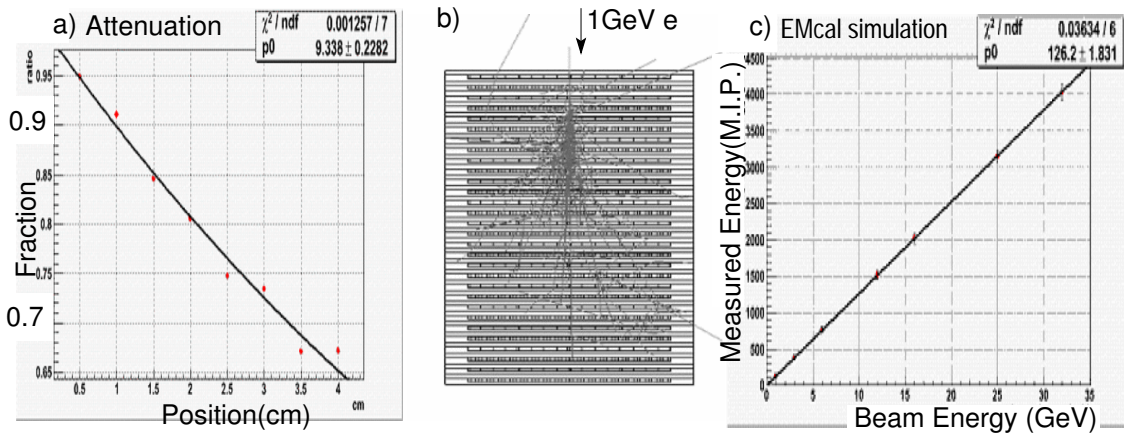


図 20: a) ストリップ読み出しの減衰曲線．MPPC 端からの距離に対する規格化された出力の大きさを示す．b) ストリップ型細分割電磁カロリメータに 1GeV 電子を入射したシミュレーションの様子．c) シミュレーションに MPPC 応答曲線とストリップ内の減衰曲線を考慮したシミュレーションによる電磁カロリメータ応答．入射粒子のエネルギーに対する読み出しエネルギーを MIP 相当で示す．

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

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

本開発研究では，従来用いられている Nb (3.1 meV), Al (0.34 meV) よりもさらにエネルギーバンドギャップの小さい Hf (0.051 meV, $T_c = 0.165$ K) あるいは W (0.0049 meV, $T_c = 0.016$ K) を超伝導素材として用い，遠赤外線領域 ($E_\gamma \sim$ 数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数%の精度で測定するための超伝導体検出器 (STJ) の開発を目指している．

この検出器はニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標としている．ニュートリノは，標準模型の枠内で重いニュートリノ (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{43} 年で崩壊する．また重たい未知の右巻き weak boson W_R が存在するモデルにおいては，このニュートリノの寿命ははるかに短くなると予想される．現在の W_R の質量下限および W_L との混合角の上限を用いるとニュートリノの寿命は最も短くて 10^{17} 年程度となる．

このような長寿命のニュートリノの崩壊を観測するには，非常に多くのニュートリノが必要となるため， $110/\text{cm}^3$ 程度存在すると予測されている宇宙背景ニュートリノを用いる．

ニュートリノの二体崩壊で生成する光子のエネルギーを $\sim 30\text{meV}$ とすると背景雑音となる赤外線背景輻射の光子のエネルギースペクトルに対し，ニュートリノ崩壊の信号はそのエネルギーを上限として低エネルギー側のみに裾を引くスペクトル分布として観測される．この信号の検出に必要な検出器に対する要求は，宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションを行った結果，30 meV の光子に対して 2~3%のエネルギー分解能を有することであることが分かっている．

そこで、2007年1月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学、KEK、理研の共同研究によって、この STJ 開発を進めてきた。この開発研究では、これまでの超伝導体検出器の開発において問題となっていることを解決しつつ、新しい超伝導体素材である Hf あるいは W を用いた超伝導体検出器の開発を行っている。

これまで、Hf 成膜（スパッタリング）のためのガス圧力・放電パワー等の最適条件の探索、および Hf 膜のパターン加工方法の確立を行った。特に Hf 膜の場合、これまでの Nb 膜や Al 膜において用いられてきた加工技術が使えないため、うまく成膜されていることが確認できれば、Hf 膜のパターン加工例としては、世界初である。

検出器作成の残る技術的ステップは、安定した絶縁膜の作成条件であるが、これまで、超伝導体部分に Nb、絶縁体部分に Hf を様々な条件で酸化して HfO_x の膜を使用した Nb-Hf STJ を作成し、絶縁膜の作成条件の探索を行ってきた。Nb を使用することのメリットは、Nb の近接効果により、転移温度を高くすることができるということであるが、しかし、Nb の上に Hf を成膜する際に均一に成長せず、酸化膜による絶縁がうまくいかないことがわかった。

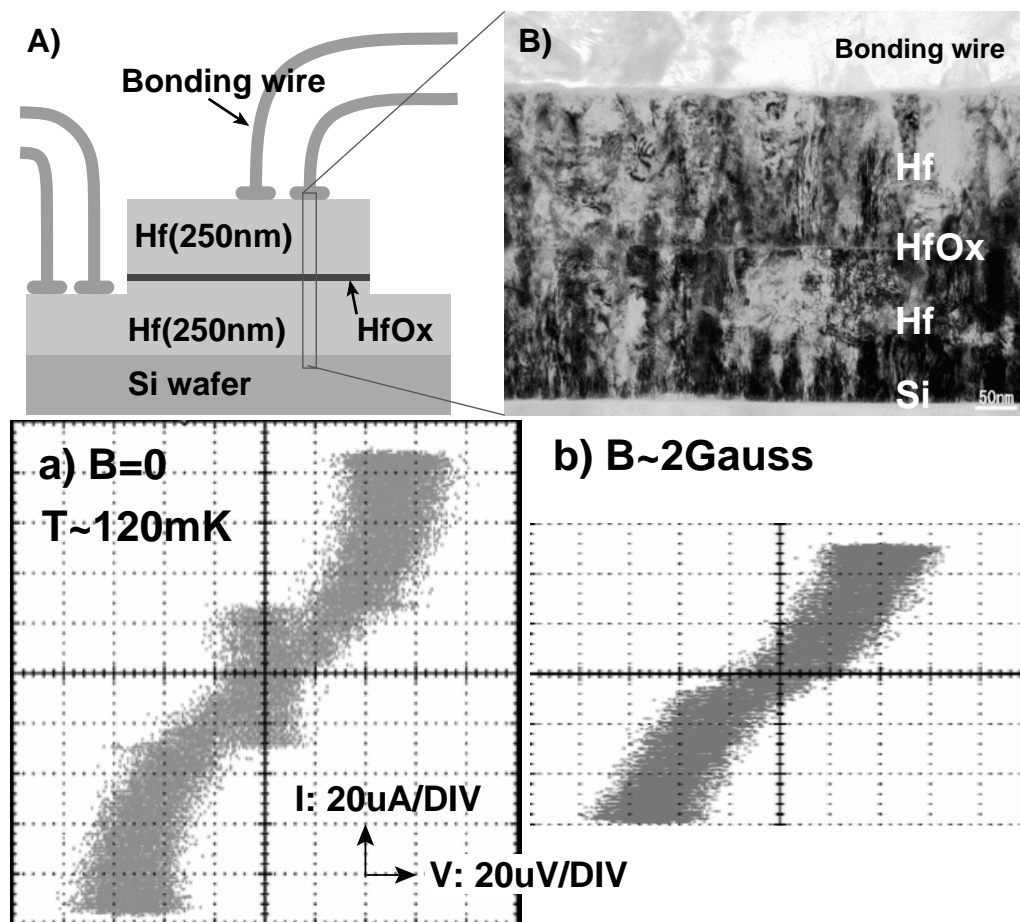


図 21: A) 評価用に作成した Hf の SIS 構造を持つ電極。ボンディングワイヤーを直接上下部電極に取り付けている。B) ボンディングワイヤー直下の Hf SIS 構造の TEM 画像。a) 試作 Hf-STJ の I-V 曲線（磁場無し）。b) 磁場をかけた状態。磁場無しでは見えていた $V=0$ におけるジョセフソン電が消失している。

そこで、昨年度(2010年度)においては、Nbを使用することをやめて、Hfで直接超伝導体-絶縁膜-超伝導体(SIS)の構造を作りI-V特性を見ることで確認するという方針をとった。図21A)に、試作したHf-STJの構造を模式図で示した。上下部電極の読み出しには、素子製造過程での不確定要素をできるだけ排除するようにワイヤーを直接電極にボンディングするというシンプルな方式を採用した。また、TEM解析により、SISの構造ができていることも確認された(図21B)。

測定には、最高でもHfの転移温度(160 mK)以下の温度、更に検出器として実用的に運用するには、20 mK程度の極低温での安定した運転が必要となってくるが、これには、低温物性グループ(大塚研)より希釈冷凍機を借用し、現在のところ最低温49 mKを達成している。現在、この冷凍機の中にファイバーを導入し可視光に対するSTJ素子の応答が見れるように準備中である。

Hf-STJ試料を多数作成し、低温でI-V曲線を測定したところ、そのうちいくつかの試料にSIS構造ができていることを示すジョセフソン電流が確認できた(図21 a,b)。しかしながら、まだ確実にSIS構造を持つ試料を作成するには至っておらず、またリーク電流が大きいため検出器として動作させるには、更に改善の必要がある。

今後は、今年度中に、Hf-STJの実証テストを行い、光入力に対する応答を見ることを目指している。更に数年のうちに20 mm角程度のHf, Wという超伝導素材を用いた超伝導体検出器実証モデルの開発を目指す。

【5】 外部資金

1. 日米科学技術協力事業「陽子・反陽子衝突による重い粒子の検出(CDF)」
共同研究(日本側参加機関：筑波大物理，大阪市大理，早稲田大理工，岡山大理，近畿大理工，京都教育大理。日本側研究代表者：受川 史彦)
物件費：55,000千円，旅費：9,600千円
2. 科学研究費補助金「陽子反陽子衝突実験CDFによるトップとボトム・フレーバーの物理」
共同研究(研究代表者：金 信弘) 特定領域研究 24,100千円
3. 科学研究費補助金「P型シリコンを用いた高耐放射線マイクロストリップ検出器の開発」
原 和彦：基盤研究(C) 390千円
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) 1,950千円
5. 科学研究費補助金「二体ミュオン粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いたbクォーク電弱希崩壊の精密測定」
三宅 秀樹：若手研究(B) 2,340千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Search for Supersymmetry with Gauge-Mediated Breaking in Diphoton Events with Missing Transverse Energy at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 011801 (2010).
2. “Measurements of the Top-Quark Mass using Charged Particle Tracking,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 032002 (2010).
3. “Inclusive Search for Standard Model Higgs Boson Production in the WW Decay Channel using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 061803 (2010).
4. “Combination of Tevatron Searches for the Standard Model Higgs Boson in the W^+W^- Decay Mode,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 061802 (2010).
5. “Measurement of the Top Quark Mass in the Dilepton Channel using m_{T2} at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 031102 (2010).
6. “Measurement of Branching Fraction Ratios and CP Asymmetries in $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$ Decays in Hadron Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 031105 (2010).
7. “Search for New Bottomlike Quark Pair Decays $Q^+Q^- \rightarrow (tW^\mp)(\bar{t}W^\pm)$ in Same-Charge Dilepton Events,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 091801 (2010).
8. “Measurement of the $WW + WZ$ Production Cross Section Using the Lepton + Jets Final State at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 101801 (2010).
9. “Measurement of the Λ_b^0 Lifetime in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-$ Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 102002 (2010).
10. “A Study of the Associated Production of Photons and b -quark Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 052006 (2010).
11. “Search for Technicolor Particles Produced in Association with a W Boson at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 111802 (2010).
12. “Measurement of the Top Quark Mass and $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$ Cross Section in the All-Hadronic Mode with the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 052011 (2010).

13. “First Measurement of the b -jet Cross Section in Events with a W Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 131801 (2010).
14. “Search for the Higgs Boson Using Neural Networks in Events with Missing Energy and b -quark Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 141801 (2010).
15. “Search for Single Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in the Missing Transverse Energy Plus Jets Topology,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 072003 (2010).
16. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using Soft Electron b-Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**81**, 092002 (2010).
17. “Search for WW and WZ Resonances Decaying to Electron, Missing E_T , and Two Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 241801 (2010).
18. “Measurement of the W^+W^- Production Cross Section and Search for Anomalous $WW\gamma$ and WWZ Couplings in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 201801 (2010).
19. “Search for Pair Production of Supersymmetric Top Quarks in Dilepton Events from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 251801 (2010).
20. “Measurement of the Ratio $\sigma_{t\bar{t}}/\sigma_{Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell}$ and Precise Extraction of the $t\bar{t}$ Cross Section,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 012001 (2010).
21. “Combined Tevatron Upper Limit on $gg \rightarrow H^- \rightarrow W^+W^-$ and Constraints on the Higgs Boson Mass in Fourth-Generation Fermion Models,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 011102 (2010).
22. “Study of Multi-Muon Events Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Eur. Phys. J. C**68**, 109 (2010).
23. “Search for New Color-Octet Vector Particle Decaying to $t\bar{t}$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Lett. B**691**, 183 (2010).
24. “Measurement of W -Boson Polarization in Top-quark Decay in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 042002 (2010).
25. “Studying the Underlying Event in Drell-Yan and High Transverse Momentum Jet Production at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 034001 (2010).

26. “Search for the Production of Scalar Bottom Quarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 081802 (2010).
27. “Measurement of $Z\gamma$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 031103 (2010).
28. “Exclusion of an Exotic Top Quark with $-4/3$ Electric Charge Using Soft Lepton Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 101801 (2010).
29. “Search for New Physics with a Dijet Plus Missing E_T Signature in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 131801 (2010).
30. “Measurement of the Top Pair Production Cross Section in the Dilepton Decay Channel in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 052002 (2010).
31. “Measurement of $d\sigma/dy$ of Drell-Yan e^+e^- Pairs in the Z Mass Region from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Lett. B**692**, 232 (2010).
32. “Search for Anomalous Production of Events with Two Photons and Additional Energetic Objects at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 052005 (2010).
33. “Search for the Supersymmetric Partner of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 092001 (2010).
34. “Search for R-parity Violating Decays of Sneutrinos to $e\mu$, $\mu\tau$, and $e\tau$ Pairs in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 191801 (2010).
35. “Updated Search for the Flavor-Changing Neutral-Current Decay $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 091105 (2010).
36. “Measurement of the $WW + WZ$ Production Cross Section Using a Matrix Element Technique in Lepton + Jets Events,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112001 (2010).
37. “Direct Top-Quark Width Measurement at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 232003 (2010).
38. “Diffractive W and Z Production at the Fermilab Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112004 (2010).

39. “Improved Search for Higgs Boson Produced in Association with $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 251802 (2010).
40. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton + Jets Channel Using a Matrix Element Method and *in situ* Jet Energy Calibration,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 252001 (2010).
41. “Observation of Single Top Quark Production and Measurement of $|V_{tb}|$ with CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**82**, 112005 (2010).
42. “Search for Randall-Sundrum Gravitons in the Diphoton Channel at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**83**, 011102 (2011).
43. “Search for a New Heavy Gauge Boson W' with Event Signature Electron + Missing Transverse Energy in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D**83**, 031102(R) (2011).
44. “Measurement of the B^- Lifetime Using a Simulation Free Approach for Trigger Bias Correction,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1004.4855 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
45. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section with an *in situ* Calibration of b -jet Identification Efficiency,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1007.4423 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)
46. “Search for the Supersymmetric Partner of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1009.0266 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
47. “Measurement of b Hadron Lifetimes in Exclusive Decays Containing a J/ψ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3138 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
48. “Measurement of $t\bar{t}$ Spin Correlation in $p\bar{p}$ Collisions Using the CDF II Detector at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1012.3093 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
49. “Evidence for a Mass Dependent Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Pair Production,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.0034 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)

50. “Measurement of the Forward-Backward Asymmetry in the $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ Decay and First Observation of the $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ Decay,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.1028 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
51. “Search for High Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in $\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.4578 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
52. “Production of Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, Ξ^\pm , and Ω^\pm Hyperons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.2996 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
53. “Measurement of the Top Quark Mass in the Lepton + Jets Channel Using the Lepton Transverse Momentum,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.4926 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)
54. “Search for Heavy Bottom-Like Quarks Decaying to an Electron or Muon and Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.5728 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
55. “Observation of the $Y(4140)$ Structure in the $J/\psi\phi$ Mass Spectrum in $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1101.6058 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “Search for the Higgs boson in the All-Hadronic Final State using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1102.0024 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “Observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1102.1961 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
58. “Search for Quark Contact Interactions in Dijet Angular Distributions in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B 694** 327-345 (2010).
59. ”Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** 161801 (2010).

60. "Observation of a centrality-dependent dijet asymmetry in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** 252303 (2010).
61. "Measurement of the $W \rightarrow \ell\nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, JHEP **12** 060 (2010).
62. "Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **71** 1 (2011).
63. "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 121803 (2010).
64. "Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D83** 052005 (2011).
65. "Study of Jet Shapes in Inclusive Jet Production in pp Collisions at $\sqrt{s}= 7$ TeV using the ATLAS Detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **D83** 052003 (2011).
66. "Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 131802 (2011).
67. "Measurement of the production cross section for W-bosons in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B694** 325-345 (2011).
68. "Measurement of the centrality dependence of J/ψ yields and observation of Z production in lead-lead collisions with the ATLAS detector at the LHC", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B697** 294-312 (2011).
69. "Study of Jet Shapes in Inclusive Jet Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS Detector", ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. **D83** 052003 (2011).

70. "Search for Massive Long-lived Highly Ionising Particles with the ATLAS Detector at the LHC",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B698** 353-370 (2011).
71. "Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 131802 (2011).
72. "Drift Time Measurement in the ATLAS Liquid Argon Electromagnetic Calorimeter using Cosmic Muons",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 755 (2010).
73. "Readiness of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 723 (2010).
74. "The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 787 (2010).
75. "The ATLAS Simulation Infrastructure",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 823 (2010).
76. "Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 875 (2010).
77. "Readiness of the ATLAS tile calorimeter for LHC collisions",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, EPJC **70** 1193 (2010).
78. "Measurement of the centrality dependence of J/ψ yields and observation of Z production in lead-lead collisions with the ATLAS detector at the LHC",
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B697** 294-312 (2011).
79. " Combined performance studies for electrons at the 2004 ATLAS combined test-beam ",
E. Abat, K. Hara *et al.*, JINST **5** P11006 (2010).
80. "Testing of bulk damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments",
K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.090.

81. "Testing of surface properties pre-rad and post-rad of n-in-p silicon sensors for very high radiation environment",
S. Lindgren, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.094.
82. "Development of n-on-p silicon sensors for very high radiation environment",
Y. Unno, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.080.
83. "Radiation effects in silicon-on-insulator transistors with back-gate control method fabricated with OKI Semiconductor 0.20 μm FD-SOI technology",
M. Kochiyama, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.086.
84. "Development of SOI pixel process technology",
Y. Arai, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.04.081.
85. "Development of SOI monolithic pixel detectors",
Y. Arai, K. Hara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2010),doi:10.1016/j.nima.2010.02.190.
86. "Development of low-mass, high-density, hybrid circuit for the silicon microstrip sensors in high track density environment",
Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, PoS RD09, 021 (2010).

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 戸村 友宣: "Recent B Physics Results from CDF,"
CPV from B Factories to Tevatron and LHCb (2010年9月1日-2日), 東北大学.
2. 佐藤 構二: "Tevatron におけるヒッグス粒子探索と新物理探索,"
基礎研究会 素粒子物理学の進展 2011 (2011年3月7日-10日), 京都大学 基礎物理学研究所.
3. 三宅 秀樹: "Tevatron における B 物理の最新結果,"
基礎研究会 素粒子物理学の進展 2011 (2011年3月7日-10日), 京都大学 基礎物理学研究所.
4. 林隆康: LHC-ATLAS 実験における $W + \text{jets}$ 事象の研究
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
5. 埴慶太: ATLAS 初期に於けるタウ粒子同定の研究
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
6. 黒川悠文: γ コンバージョンを用いた ATLAS 内部飛跡検出器の物質評価 (2)
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
7. 新庄康平: SOI 技術を用いた読み出し一体型ピクセル検出器の開発 (検出部ウェハの薄型化)
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010年9月11日-14日), 九州工業大学.
8. 林隆康: LHC - ATLAS 実験における $W + \text{jets}$ 事象の生成断面積測定
日本物理学会第 66 回年次大会 (2011年3月25日-28日), 新潟大学.

9. 埴慶太：ATLAS 実験における W 事象を用いたタウ粒子同定効率とエネルギー測定精度の評価と改良
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
10. 新庄康平：センサー部薄型化 SOI ピクセル検出器の陽電子ビーム照射試験
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
11. 高橋優：SLHC 実験に用いる高放射線耐性 P 型シリコンマイクロストリップセンサーのガンマ線照射試験
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
12. 小池博子：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究，
日本物理学会 2010 年秋季大会（2010 年 9 月 11 日–14 日），九州工業大学
13. 木内健司：Hf-STJ 開発状況報告，
KEK 測定器開発室月例会議 SDC 重点レビュー（2011 年 2 月 15 日），高エネルギー加速器研究機構
14. 木内健司：ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子 (Hf-STJ) 検出器の研究開発，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
15. 小池博子：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性試験，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
16. 田中航平：ILC 電磁カロリメータの応答一様性の評価，
日本物理学会第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学
17. 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，”
日本物理学会 第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.
18. 武政 健一：“陽子・反陽子衝突実験におけるトップクォーク対生成事象でのスピン偏極度相関の測定，”
日本物理学会 第 66 回年次大会（2011 年 3 月 25 日–28 日），新潟大学.

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Hideki Miyake, “Results on *B* Physics at CDF,”
CERN Joint EP/PP Seminars, April 27, 2010, Geneva, Switzerland.
2. Yoshikazu Nagai, “Search for Higgs Boson Production in Association with a *W* Boson at CDF,”
2010 Phenomenology Symposium, May 10–12, 2010, Madison, Wisconsin, USA.
3. Yoshikazu Nagai, “Standard Model Low mass Higgs search at CDF,”
35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), July 22–28, 2010, Paris, France.

4. Fumihiko Ukegawa: “Photo-sensor studies,”
6th Join Korea-Japan ScEcal Meeting, September 3, 2010, Kobe University, Kobe, Japan.
5. Koji Sato, “Tevatron,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2011), March 2–5, 2011, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
6. K. Hara, “Plans of the SOIPIX Collaborationp”,
Invited Talk at VERTEX2010, Loch Lomond, Scotland, UK, June 6-11, 2010.
7. K. Shinsho and K. Hara, “Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ”,
IEEE Nuclear Science Symposium, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov. 6, 2010.
8. K. Hara, “ Design of Punch-Through Protection”,
ATLAS Upgrade Tracker Workshop, Oxford, UK, Mar.27-Apr. 1, 2011.
9. Ken-ichi Takemasa, “A Measurement of $t\bar{t}$ spin correlations coefficient in Dilepton candidates,”
Fermilab Users’ Meeting, June 2–3, 2010, Batavia, Illinois, USA.

(4) 会議・研究会報告書

1. H. Miyake, “Rare decays/ B_s CPV measurements at Tevatron,”
in proceedings of “XXth Hadron Collider Physics Symposium,” PoS(HCP2009)033.
2. Y. Nagai, “Standard Model Low Mass Higgs Search at CDF,”
in proceedings of “35th International Conference on High Energy Physics,” PoS(ICHEP 2010)067.
3. K. Hara (for the ATLAS Collaboration), “ATLAS commissioning and early physics of resonance and jet production”,
Chinese Physics C34-9 (2010) 1530.
4. K. Hara,*et al.*, “Development of INTPIX and CNTPIX Silicon-On-Insulator Monolithic Pixel Devices”,
Proceeding of Science (VERTEX2010) 033, Loch Lomond, UK, June 6-11, 2010.
5. K. Shinsho, K. Hara,*et al.*, “Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N23-2, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov. 6, 2010.

(5) 学位論文

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻，2011年2月．

1. 木内 健司：高エネルギー分解能を有するハフニウム系超伝導トンネル接合光子検出器の開発研究
2. 黒川悠文：光コンバージョンによる ATLAS 内部飛跡検出器の物質量の研究
3. 小池博子：リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いる光検出器 MPPC の応答線形性の研究
4. 田中航平：リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータの応答一様性の評価
5. 橋本就吾：CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究
6. 濱崎菜都美：パンチスルーを用いたシリコンセンサー保護機能の評価

【 構成員の異動 】

1. 2010年4月に永井義一が研究員として着任．
2. 2011年3月に戸村友宣研究員が東京大学宇宙線研究所助教に転出．

III. 宇宙物理理論グループ

教授 梅村 雅之

准教授 森 正夫

講師 吉川 耕司

助教,主任研究員 岡本 崇 (科研費基盤S, 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 (計算科学研究センター), 川口 俊宏 (科研費基盤A)

大学院生 8名

4年生 6名

【1】 概要

本年度,当グループスタッフは, FIRST プロジェクトを推し進めると共に, これを用いた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, 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築, 高赤方偏移銀河のサブミリ波特性の研究を行った。また, 銀河進化標準モデルの構築を目的として, FIRST,T2K-Tsukuba を用いて, ライマンアルファ輝線天体とライマンブレイク銀河の理論進化モデルの構築, 宇宙再電離と銀河形成・進化, 銀河衝突とダークマターハローの構造, 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性, ダークマターハローの力学構造の安定性解析, コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解, 超新星爆発と銀河進化の研究を行った。さらに, 宇宙論・銀河形成分野で, 衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究, 衛星銀河問題の解決, 合体銀河における星団形成, 宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究を行った。

また, シミュレーション手法と計算機の開発として, TREE 構造で高速化した新たな輻射流体力学コード START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer)の開発, Tree 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用, Vlasov-Poisson 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション, GPGPU を用いた数値シミュレーションの開拓, Advanced Vector eXtension を用いた N 体計算の高速化を行った。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)が採択され, 輻射流体力学実現のための演算加速器を搭載した並列計算機システム構築を開始し, プロトタイプ制作を行った。

【2】 FIRST プロジェクト

(1) 宇宙シミュレータ FIRST

文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (S) 「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(平成 20 年度~平成 24 年度, 代表 梅村雅之)に基づき, 宇宙第一世代天体および原始銀河形成に関する大規模なシミュレーションを実行するプロジェクト (FIRST プロジェクト)を推進した。

宇宙第一世代天体の形成過程について大規模な輻射流体力学シミュレーションを行うためには、物質と光の作用および重力相互作用を極めて高速に計算する必要がある。目的とするシミュレーションのためには、物質・光の計算性能が数 Tflops, 重力計算性能が数 10Tflops の計算機を必要とする。我々は、これを実現するために、PC クラスタに新規開発したサーバ組み込み型の**重力計算専用ボード Blade-GRAPE**を埋め込んだ**宇宙シミュレータ FIRST**を完成させた。

FIRSTは、256の計算ノード、2つの管理ノード、3つのファイルサーバ、およびGfarmファイルシステムからなる。計算ノードのうち、16ノードは32ビット型Blade-GRAPEを有し、224ノードは64ビット型Blade-GRAPE X64を有する。ファイルサーバは3台で合計15TBの容量をもつ。Gfarmファイルシステムは、ネットワーク共有ファイルシステムであり、分散したローカルディスクから一つの共有ファイルシステムをつくる機構である。これにより、総計89TBの共有ファイルシステムが構築されている。FIRSTの総演算性能は、36.1TFLOPSであり、内ホスト部分3.1TFLOPS、Blade-GRAPE部分33TFLOPSである。また、主記憶容量は総計1.6TBである。

(2) 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

多くの銀河中心には 10^6 から 10^9 太陽質量の大質量ブラックホール(SMBH)が存在する。銀河はより小さな銀河同士の衝突合体によって形成されたため、その中にあるブラックホールも合体成長した可能性があるが、それらのブラックホールの合体成長過程は明らかになっていない。

SMBH同士が合体するにはそれぞれの軌道角運動量を抜く必要がある。2つのSMBHだけで合体することは難しい。SMBHの軌道角運動量を抜く機構の1つは銀河の星による力学的摩擦であるが、2つのSMBH間距離が収縮すると、SMBHの間を通る星がなくなるため力学的摩擦が効かなくなり、SMBH間距離の収縮が止まるからである(Begelman et al.1980; Makino, Funato 2004)。もう1つSMBHが銀河内に存在すると、そのSMBHが2つのSMBHの軌道角運動量を持ち去るため、2つのSMBHは合体できる(Iwasawa et al.2006)。より多くのSMBHが銀河内に存在する場合、いくつかのSMBHは合体することが予想される。

我々は1つの銀河の中に取り込まれた複数のSMBHがどのように進化するかを、高精度N体計算によってシミュレートした。その結果、星との力学的摩擦によってブラックホール3体相互作用の効率が増し、結果としてブラックホールの連続的合体成長により中心に一つの巨大ブラックホールが形成されることを明らかとなった(Tanikawa & Umemura 2011)。

(3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築

ライマンアルファ輝線天体(LAEs)は、活発な星形成を起こしている天体であり、赤方偏移0~7の広い範囲で観測されている。最近の観測でLAEsはその質量や色等級で多様性を示すことがわかってきた。しかし、それらが銀河進化のどのようなフェーズに対応しているのかは明らかにされていない。そこで我々は、宇宙論的計算と化学進化モデルを組み合わせ、LAEのモデルを構築した。特に、銀河内の各サブストラクチャーの星形成史・化学進化を独立な事象として扱い、スペクトル生成コード'PEGASE'を用いてSEDの計算を行った。ライマンアルファ光度については、ダスト吸収の効果も考慮した。結果として、ライマンアルファ輝線天体には、大きく2種類のもので存在することが明らかになった。一つは比較的質量が軽く($\approx 10^{10}M_{\odot}$ 程度)、

銀河進化の極初期の星形成フェーズにある天体であり、もう一つは質量が重く ($\approx 10^{10-12} M_{\odot}$)、初期の星形成期を終了した後、ガスが降着して星形成を誘起する天体である。前者を Type 1 LAE、後者を Type 2 LAE と名づけた。また、これら 2 つのタイプで空間相関や予想される色光度を計算した結果、Type 2 LAE は近赤外の波長で観測される天体と空間相関がよく一致する事がわかった (Shimizu & Umemura 2010)。

(4) 高赤方偏移銀河のサブミリ波特性と ALMA での検出可能性

高赤方偏移の星形成銀河のダスト放射をシミュレーションするために、Mori & Umemura (2006) の高精度流体計算による銀河進化のシミュレーション結果に対して 3 次元輻射輸送計算を行い、ダスト温度の正確な決定とサブミリ波放射強度計算を行った。その結果、ダスト量は時間とともに単調に増加するのに対し、サブミリ波放射強度はライマンアルファ輝線天体の後期でピークとなることがわかった。これは、ライマンアルファ輝線天体の後期では、ダストが星形成領域に集中しダスト温度が高くなるためである。ライマンブレイク銀河期では、ダストは超新星爆発による激しいガスフローによって、星形成領域から遠ざかり、結果としてサブミリ波放射強度が減少する。また、ALMA の検出感度を想定すると、ライマンアルファ輝線天体期、ライマンブレイク銀河期共に 1 時間以内の観測で検出可能であることがわかった。

【3】 銀河進化標準模型の構築

(1) 概要

飛躍的な観測技術や検出装置の進歩により、それまでは全く知り得なかった宇宙の深遠部で、活発な星形成の兆候を示すライマンアルファエミッタ、ライマンブレイク銀河、サブミリ銀河等、莫大な数の銀河が観測されている。しかしながら、そういった天体が、我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究されてきた近傍銀河とどのように関連しあっているのか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、明確な答えを我々はもっていない。文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (A) 「理論と観測の融合による銀河発生学の探究」(平成21年度～平成24年度、代表 森正夫) に基づき、銀河の標準進化模型を構築すべく銀河形成・進化の理論研究を推進している。

(2) ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河の理論進化模型の構築

本研究では、“ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河に代表される高赤方偏移で発見されている天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない”という仮説を掲げ、銀河の化学力学モデルを駆使して、銀河の発生について詳細な理論模型を構築している。さまざまな質量のスケールで化学力学シミュレーションを行った結果、ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河が原始銀河の進化系列であることを見出すことができた。またライマンアルファエミッタで放射されるライマンアルファエミッションの光度は、原始銀河の質量および星形成率と密接な相関があることを示した。さらにその放射の物理的な起源として従来から考えられてきたメカニズムに加えて、衝撃波で加熱されたガスの放射冷却に起因するものが大きな影響を及ぼすことが分かった。

(3) 宇宙再電離と銀河形成・進化

赤方偏移 $z \sim 1100$ で一度中性化を迎えた宇宙は、その後形成される天体からの紫外線光子によって再び電離状態へと引き戻され、現在まで高度に電離した状態を維持している事が分かっている。この宇宙再電離に関しては、近年のクエーサー観測や WMAP による観測によってその電離史に大まかな制限はつけられてきた。しかしながら、宇宙再電離を引き起こした電離源に関しては未だ理論的にも観測的にもまったく分かっていない。これら電離源や電離史の研究では、これまでいつも銀河の電離光子脱出確率の不明瞭さが解析を困難にしていた。この電離光子脱出確率は銀河内の星から放射される全電離光子数のうち銀河間空間へ脱出する割合で、これによって銀河の電離光子放射率、紫外線背景輻射強度は大きく左右される。我々は宇宙論的流体計算により計算された多数の星形成銀河に対して、3次元輻射輸送計算を行う事により、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を見積った。結果として、赤方偏移 $z=3-6$ においては星形成銀河により銀河間ガスを電離する事が可能である事が示された。さらに電離源解明の鍵を握る電離光子脱出確率についての質量依存性やそのメカニズム、電離源を担う銀河の典型的質量について議論した。

(4) 銀河衝突とダークマターハローの構造

現在の標準的な宇宙構造形成論では、小質量銀河が衝突合体を繰返しながら成長し階層的に構造形成をおこなうことにより、現在の銀河の姿を構築したと考えられている。近傍銀河 M31 においても、アンドロメダストリームやシェルといった銀河衝突の痕跡が発見されており、ストリームの速度構造が詳細に観測・解析されている。一方、理論的には N 体シミュレーションを用いた研究により、観測されている空間構造を再現することに成功しているが、ストリームの速度構造についてはこれまで調べられてこなかった。そこで我々は、観測されている空間構造を再現できる計算結果を用いてストリームの速度構造を観測結果と比較し、多くの観測結果が説明できることを明らかにした。宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた構造形成では、ダークマターハローの密度分布がハローの外縁部で半径の -3 乗となることが示唆されており、ダークマターハローの“ユニバーサルプロファイル”として知られている。このプロファイルが現実の銀河でも成り立っていることを検証するためには、星の運動を観測し、これを解析することでダークマターハローの作るポテンシャルを調べ、これと“ユニバーサルプロファイル”の作るポテンシャルを比較することが有力な手段となる。銀河衝突の痕跡は銀河外縁部においても明るく、痕跡を形成している星の運動を観測することが可能であるため、銀河外縁部でのダークマターハローのプロファイルを観測的に調べるために適している。M31 のアンドロメダストリームを用いればそのダークマターハローの外縁部の構造に迫ることができる。我々の N 体シミュレーションでは、M31 のダークマターハローのプロファイルとして半径の -3 乗という密度分布を仮定し、その結果観測されているストリームの速度構造をよく再現できた。これは、半径の -3 乗というダークマターハローの密度分布が実際の銀河でも成り立っていることを示唆する重要な結果である。

(5) 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性

これまでの研究では銀河衝突現象の解析を重力多体系として解析してきたが、今後は銀河衝突に対するガスやダストの力学的な応答を調べる必要がある。特に銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性との物理的な関係は大変興味深い。銀河衝突過程によっては、ブラックホールの活動性を際立たせる場合とその活動性を著しく減衰させる効果が予想される。我々はそのような状

況を正確に解析する為、N体シミュレーションでは取り入れられないガスの効果を取り入れるための銀河衝突の流体モデルの構築に取り組み、HLLC法を採用した3次元並列流体コードの開発を開発した。銀河中心の降着円盤に対する質量供給源として力学的に安定なトラスを想定し、そのトラスと銀河衝突によって発生した衝撃波との衝突を様々なパラメータで数値実験を行った。その結果、衝撃波によってトラスが破壊され、降着円盤への質量供給が抑制されるパラメータ領域を確定することに成功した。

(6) ダークマターハローの力学構造の安定性解析

宇宙の構造形成のパラダイムとなっているコールドダークマター(CDM)シナリオは、N体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カスプ)構造を预言する。DMが力学的に主たる役割を果たし、カスプを持つことが期待される天体として矮小銀河が挙げられる。その観測結果によると、矮小銀河は中心部で密度は発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている。この理論と観測の不一致はコア-カスプ問題として知られ、CDMシナリオの未解決問題の一つである。コア-カスプ問題を解決するモデルとして、"かつて矮小銀河で大量の超新星爆発によるバリオン(ガス)の放出が起こり、その結果の重力場変動によりカスプがコアへと遷移した"というものがある。本研究では、これまで無視されてきた質量放出の起こる時間スケールに注目し、DMハローの力学応答への依存性を調べた。その結果、他の条件が同じであっても、放出時間が短いほどカスプはより平坦に遷移しやすい事を明らかにした。しかしながら矮小銀河の観測に合うような全く平坦な質量分布を再現することはできなかった。そして、従来言われてきた質量放出仮説のみではコア-カスプ問題を解決できないことを指摘した。

(7) コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

銀河風は超音速で流れる宇宙流体の1つとして知られている。銀河の中心付近で超新星爆発などにより星間ガスにエネルギーが放出されると星間ガスは銀河の外側に向かって超音速で流出するが、常に超音速で流れる場合だけではなく亜音速から始まって連続的に加速して超音速となって流れる遷音速流も存在する可能性がある。しかし先行研究では遷音速解が見つかっていなかった。本研究ではコールドダークマターハロー中の銀河風の遷音速流を発見することに成功した。銀河風をダークマターハロー中における球対称定常流であると仮定すると、内側では重力の効果が効いているために亜音速流は加速し、外側では膨張の効果が効いているために超音速流が加速するので、膨張の効果と重力の効果が釣りあっている点をちょうど音速で流れる場合は亜音速から超音速への連続的な加速が実現でき、遷音速流となることがわかった。解析の結果、銀河風が遷音速解を持つためには、ダークマターとバリオンを含む銀河の質量分布がダークマターハローのスケール長よりも内側で距離の二乗よりも大きなべきを持つ必要があることを見出した。

(8) 超新星爆発と銀河進化

銀河形成・進化過程で爆発的な星形成に伴って発生する多重超新星爆発は、銀河内のガスに多大なエネルギーを供給する。超新星爆発によって生成された衝撃波から高温の銀河ガスを生成し、やがて銀河からのアウトフロー(銀河風)を形成することになる。このような銀河風生成メカニズムの研究は、計算機性能の飛躍的な向上と近年の高精度銀河観測データの蓄積に後押しされながら、現在も精力的に行われているが、未だ明確な答えを我々は持っていない。そこで本研究では、軸対称密度場中での衝撃波の伝播を扱う事ができる、Laubach-Probst法と呼ばれる強

力な近似解法を用いて、銀河風生成メカニズムの理論的研究を行った。その結果、銀河風の生成効率と、銀河形状、星形成率との間の関係を明らかにした。

【4】 宇宙論・銀河形成

(1) 衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究

銀河団の銀河は銀河団が銀河や銀河群の度重なる衝突合体で成長するときに力学的・熱的影響を強く受け形成・形態進化を遂げ、その過程で銀河団ガスに重元素を供給してきた。重元素の量と分布はこれらの形成進化をひもとく鍵であり、それは数千万度の温度にある銀河団ガスから放射される X 線を分光し、輝線を調べることで分かる。これまでに多くの銀河団で重元素の組成や量、空間分布が X 線観測の研究によって調べられてきた。これらの研究においては重元素は衝突電離平衡にあり電子・イオンは温度平衡にあると仮定されるが、これは銀河団中心部ではこれらの平衡状態に達する時間スケールが十分短いと考えられるだけガスの密度が高いからである。しかしながら、ビリアル半径にせまる希薄な周縁領域や衝突加熱領域では平衡状態に達していない可能性を我々は注目している。もしそうであれば、平衡を仮定した解析結果は誤った重元素量を推定しかねない。そこで我々は T2K-Tsukuba を用いて鉄などの主要な重元素の衝突電離平衡と電子・イオンの温度平衡を仮定せず時間進化を解くダークマターとガスを含めた様々な衝突条件下（質量比・インパクトパラメータ）での衝突銀河団の 3 次元数値実験を世界で初めて行った。その結果、銀河団外縁部と銀河団中心部でそれぞれ特徴的な衝撃波が非平衡電離状態・2 温度状態を伴って形成されることが分かった。更に、観測時の衝撃波面に対する角度によって非平衡電離状態や 2 温度状態の観測可能性が大きく変わることもわかった。実際の衝突銀河団における物理状態は、将来の X 線観測衛星でその詳細が明らかになることが期待される。また、代表的な衝突銀河団として知られ、様々な角度から研究されている弾丸銀河団 (Bullet Cluster) についてもその再現シミュレーションを行い、弾丸銀河団においても非平衡電離状態や 2 温度状態が存在することを示した。

(2) 衛星銀河問題の解決

構造形成の標準的な理論となっているコールドダークマターモデルは、我々の天の川銀河のような銀河が数百から数千もの衛星銀河を持つことを予言する。一方、現在まで天の川銀河の周囲には 20 程度の衛星銀河しか発見されていない。この理論と観測の矛盾は「衛星銀河問題」と呼ばれ、標準モデルのもつ大問題とされてきた。一方、この問題はダークマターのみを考慮した宇宙論的シミュレーションによって指摘されているものである。そこで我々は、宇宙背景放射や超新星爆発による星間ガス加熱の影響を取り入れた宇宙論的な銀河形成シミュレーションを行い、コールドダークマターモデルが予言する「目に見える」衛星銀河の数やその性質を調べた。その結果、超新星爆発によるガスの加熱が十分に効けば、衛星銀河の光度関数は再現可能であることを示した。このような加熱は衛星銀河の光度-金属量関係も同時に再現することも明らかにした。一方、シミュレーションで得られた衛星銀河と観測された天の川銀河のそれを光度ごとに比較した場合、シミュレーションによるものの方が力学的な質量が重いことが判明した。これは、(i) 天の川銀河のダークハローが我々が今回候補としたものよりも軽い、(ii) 衛星銀河光度関数は親銀

河のダークハロー質量が同じでも様々なばらつきを持ち得る, (iii) シミュレーションでは捉えきれないバリオンの物理過程により, 衛星銀河のダークハロー中心部はシミュレーションで得られたそれより密度が下がっている, 等の可能性が考えられる。

(3) 合体銀河における星団形成

従来の銀河形成シミュレーションは数値的分解能が足りないため, 銀河内での星形成領域を直接取り扱うことは出来ず, 温度 10^4 度, 密度 $n_H \approx 0.1 \text{cc}^{-1}$ 程度の温かいガスで星形成が起ると仮定していた。そこで, 100 度以下, 密度 n_H が 100cc^{-1} 以上の低温高密度ガスを扱える高分解能シミュレーションを行い, 銀河の合体時に励起される星団形成について調べた。その結果, 合体の最終段階で銀河中心に複数の巨大星団が形成されることが明らかになった。これは赤外線で見られる ULIRG や LIRG によく見られる multiple-nuclei に酷似しており, multiple-nuclei の起源として従来考えられていた 3 つ以上の銀河の合体よりも自然なシナリオである。

(4) 宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究

ガス冷却や, 星形成, 超新星爆発等の物理過程を取り入れた宇宙論的な銀河形成シミュレーションを行い, $z = 3.1$ におけるライマンアルファ銀河の性質を観測と比較した。我々は, 星間ガスのクランピネスが親銀河のダークハロー内のサブハローの数に比例するという現象論的モデルを導入し, ライマンアルファ銀河の角度相関・紫外及びライマンアルファ光度関数・ライマンアルファ等価幅分布という 3 つの観測量を初めて同時に再現した。

【5】 シミュレーション手法と計算機の開発

(1) TREE 構造を用いた高速輻射流体スキーム START の開発

輻射は物質との相互作用を通じて, ガスの化学進化や力学進化に影響を与える。このような過程を矛盾無く解く為には, 輻射輸送計算と流体力学計算をカップルさせた輻射流体計算が必要となる。そのような輻射流体計算法の一つに Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics (RSPH)法というものがある(Susa 2006)。この手法では, 放射源一つにつきおおよそ $O(N)$ (N は SPH 粒子数)の計算量で輻射輸送計算が可能となる。我々は, この計算法を用いて種族 III 星からの紫外線フィードバックに関する研究を行ってきた(Hasegawa, Umemura and Susa 2009 など)。この RSPH 法を含め多くの輻射輸送計算では放射性再結合による放射はすぐその場で吸収されるという近似(On the spot 近似)を用い, 実際にはそれらの光子の輻射輸送計算を行ってはいない。これは, 再結合光子の輻射輸送を計算する事はすべての粒子を放射源として扱う事と同等であり, 計算量が $O(N \times N)$ と膨大となり, 実現が非常に困難となる為である。また同様の理由により, 星などの放射源の数が多数の場合にも計算を実行することが困難となってしまう。そこで, 我々はこれまで使用してきた粒子法流体力学 (SPH 法) をベースにした輻射流体力学コードの輻射輸送部分についてツリー構造によって大幅な加速を実現し, 新たな輻射流体力学コード START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer)を開発した。このコードを用いることにより, これまで正確に扱うことのできなかった散乱光子を近似なく扱うことが可能になった。この手法では, 放射源の数を N_s とした場合, 1 ステップ当たり $N \log(N_s)$ のオーダーの計算量で輻射流体

計算をする事が可能となる。これにより、これまで非常に困難であった散乱光を考慮した輻射流体計算や多数の星からの輻射性フィードバックを同時に取り扱った計算を可能とした。この手法を用いて、光電離に対する散乱光の役割を解析した結果、吸収体の大きさが電離光子の平均自由行程と同程度になる場合、On the spot 近似が適当でないことを明らかにした。

(2) Tree 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用

銀河形成において、大質量星が輻射として出すエネルギーは実は超新星爆発として出すエネルギーよりも2桁近く大きい。この輻射によるフィードバック効果を銀河形成シミュレーションに取り入れるため、メッシュ流体に対して多数の点光源からの輻射輸送計算を Tree 法を用いて光速に計算する方法を開発した。これは粒子法である Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) 法に対して実装された START コードのメッシュ流体版と言える。メッシュ法の方が一般に SPH 法よりも爆発現象を扱うのに有利であり、輻射性フィードバックと超新星爆発によるフィードバックを同時に適切に扱う上でこの方法が重要な役割を果たすと期待している。

(3) Vlasov-Poisson 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション

これまでの自己重力系の数値シミュレーションでは、質量分布を粒子分布に置き換えて粒子間の重力相互作用を計算する N 体シミュレーションが広く採用されてきたが、N 体シミュレーションには人工的な二体緩和が起きたり、速度分散が大きな系については速度分散による密度揺らぎの減衰といった効果をうまく再現できなかつたりという弱点があった。我々は無衝突ボルツマン方程式 (Vlasov 方程式) を Poisson 方程式 と組み合わせて自己重力系の数値シミュレーションを実行するシミュレーションコードの開発を世界で初めて行い、様々なテスト計算を行った。その結果から、質量保存やエネルギー保存などを満足できる精度で満たしながら正しく自己重力系のシミュレーションが可能であることを示した。また、宇宙大規模構造でのニュートリノの影響を調べるシミュレーションに適用する為、宇宙論的膨張に沿った共動座標系での Vlasov 方程式を解けるよう拡張を行った。

(4) GPGPU を用いた数値シミュレーションの開拓

General Purposed GPU (GPGPU)は次世代の数値シミュレーションにおける重要な技術要素として注目されている。我々は、NVIDIA 社の GPGPU と開発言語 CUDA を用いて自己重力多体系の N 体計算と輻射輸送計算の高速化を行った。N 体計算では、FIRST に搭載されている Blade-GRAPe を凌駕する性能を得ることができたが、ホスト計算機と GPGPU の間の PCI-Express での通信によるオーバーヘッドの為に少ない粒子数では Blade-GRAPe と同様に性能の劣化が見られた。PCI-Express のコントローラが CPU に統合されている Intel の Sandy Bridge アーキテクチャのマシンに GPGPU を搭載した場合には少粒子数でもかなり性能が向上することが分かった。輻射輸送計算では、long-characteristic 法による輻射輸送計算と化学反応計算の高速化を行い、CPU での計算と比較して輻射輸送計算を 150 倍程度、化学反応計算を 20 倍程度高速化することに成功した。

(5) Advanced Vector eXtension を用いた N 体計算の高速化

Intel 社が新しく発表した Sandy Bridge アーキテクチャに基づく CPU に実装されている Advanced Vector eXtension (AVX)命令セットを用いて、衝突系・無衝突系の N 体計算の高速化

を行った。従来の Streaming SIMD Extension (SSE)命令を用いた高速化よりも、更に高速化することに成功し、1 コアでの性能は衝突系で 20Gflops, 無衝突系で 80Gflops を達成した。これらの性能は GPGPU での最大性能には及ばないが、粒子数に依存せずどのような粒子数でも同じ性能が得られることから、大規模並列計算に適しているといえる。

(6) 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」

宇宙論的流体力学計算と輻射輸送計算を完全に統合した自己矛盾のない銀河形成の輻射流体モデルを世界で初めて構築することを目指している。このような目的のため、本年度は、高速な計算機の開発準備のための GPU による計算加速器を搭載した PC クラスターの試作機を作成した。また、その計算機上で効率よく計算の行うことができるシミュレーションコードの開発及び最適化を行い、そのパフォーマンスの測定を行った。特に本年度集中的に行った研究は、自己重力多体問題計算コードの開発、輻射輸送コードの開発、高精度流体力学コードの開発である。

<競争的資金採択状況>

- ・ 基盤研究 (S) : 梅村 雅之 (代表者) (継続)
「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」 (1,120 万円)
- ・ 基盤研究 (A) : 森 正夫 (代表者) (継続)
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」 (560 万円)
- ・ 挑戦的萌芽研究 : 吉川 耕司 (代表者) (継続)
「6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション」 (90 万円)
- ・ 若手研究 (スタートアップ) : 岡本 崇 (代表者) (継続)
「三次元輻射流体シミュレーションで探る銀河形成の物理」 (60 万円)
- ・ 若手研究 (B) : 川口 俊宏 (代表者) (継続)
「原始活動銀河核のブラックホール・銀河共進化究明と偏光X線放射予測」 (80 万円)
- ・ 基盤研究 (C) : 川口 俊宏 (分担者) (代表者: 峰崎 岳夫) (新規)
「活動銀河核多波長モニターデータベースと活動銀河核変光・放射機構の研究」 (10 万円)
- ・ プレ戦略イニシアティブ: 森 正夫 (代表者) (新規)
「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」 (450 万円)
- ・ 研究活動スタート支援: 川勝 望 (代表者) (新規)
「多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明」 (146 万円)

<学位論文>

修士論文

1. 扇谷 豪
超新星爆発のガス加熱による重力場変動のダークマターハロー中心密度分布への影響
2. 中村 繁幸
銀河風と矮小銀河の形状の関係について
3. 三木 洋平
銀河衝突による銀河進化と活動銀河中心核への影響に関する理論的研究
4. 横山 貴士
非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化

学士論文

1. 嶋田隼人
宇宙の大規模構造に対するニュートリノの影響
2. 吉次将士

非熱的電子によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果

3. 八重樫祥治

中心ブラックホールとダークマターハロー中の定常銀河風

4. 野口岳大

輻射優勢宇宙における原始ブラックホールの進化

5. 安部牧人

SWIFT 光度曲線データに基づくガンマー線バースト重力レンズ効果の研究

6. 齋藤祐里子

漂う巨大ブラックホールとアンドロメダストリーム

<論文>

Refereed Papers

1. Owen, P.H., Eke, V.R., Frenk, C.S., Okamoto, T., 2011, The Baryons in the Milky Way Satellites, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
2. Okamoto, T., Yoshikawa, K., Umemura, M., 2011, ARGOT: Accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
3. T. Kawaguchi, and M. Mori, Near-Infrared Reverberation by Dusty Clumpy Tori in Active Galactic Nuclei, Astrophysical Journal, submitted.
4. Tanikawa, A. Yoshikawa, K., Okamoto, T., Nitadori, K., 2011, N-body Simulation for Self-Gravitating Collisional Systems with a New SIMD Instruction Set Extension to the x86 Architecture, Advanced Vector Extensions, New Astronomy, submitted.
5. Shimizu, I., Yoshida, N., Okamoto, T., 2011, Lyman-alpha Emitters in Cosmological Simulations I: Lyman-alpha Escape Fraction and Statistical Properties at $z=3.1$, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
6. Matusi, H. Saitoh, T.R., Makino, J., Wada, K., Tomisaka, K., Kokubo, E., Daisaka, H., Okamoto, T., Yoshida, N., 2011, ORIGIN OF MULTIPLE NUCLEI IN ULTRALUMINOUS INFRARED GALAXIES, Astrophysical Journal, submitted.
7. Tanikawa, A., Umemura, M., 2011, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, Astrophysical Journal, 728, L31-L35.
8. Matsuda, Y.; Yamada, T.; Hayashino, T.; Yamauchi, R.; Nakamura, Y.; Morimoto, N.; Ouchi, M.; Ono, Y.; Kousai, K.; Nakamura, E.; Horie, M.; Fujii, T.; Umemura, M.; Mori, M., 2011, The Subaru Ly α blob survey: a sample of 100-kpc Ly α blobs at $z = 3$, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 410, L13-L17.

9. Hasegawa, K., Umemura, M., 2010, START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 2632-2644.
10. Shimizu, I., Umemura, M., 2010, Two types of Lyman-alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 913-921.
11. Kawaguchi, T. and Mori, M., 2010, Orientation Effects on the Inner Region of Dusty Torus of Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, 724, L183-L187.
12. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 430-432.
13. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 400-402.
14. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in CDM Halos and Supernova Feedback, *AIP Conference Proceedings*, 1269 (Osaka), 421-423.
15. Akahori, T., Yoshikawa, K., 2010, Hydrodynamic Simulations of Merging Galaxy Clusters: Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 335-345.
16. Prokhorov, D.A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Nagataki, S., Seon, K.-I., 2011, Can electron distribution functions be derived through the Sunyaev-Zel'dovich effect?, *Astronomy and Astrophysics*, 529, A39.
17. Okamoto, T., Frenk, C. S., Jenkins, A., Theuns, T., 2010, The properties of satellite galaxies in simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 208-222.
18. Bett, P., Eke, V., Frenk, C. S., Jenkins, A., Okamoto, T., 2010, The angular momentum of cold dark matter haloes with and without baryons, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404, 1137-1156.
19. Imanishi, M., Ichikawa, K., Takeuchi, T., Kawakatu, N., Oi, N., Imase, K., 2011, Infrared 3-4 μ m Spectroscopy of Nearby PG QSOs and AGN-Nuclear Starburst Connections in High-luminosity AGN Populations, *Populations*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63 (Subaru special issue), 447-456.
20. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2011, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, *The Astrophysical Journal*, 270, 120-131.
21. Tanikawa, A., Fukushige, T., 2010, Mass-Loss Timescale of Star Clusters in an External Tidal Field. II. Effect of Mass Profile of Parent Galaxy", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 1215-1230.

22. Nagamine, K., Choi, Jun-Hwan , Yajima, H., 2010, Effects of Ultraviolet Background and Local Stellar Radiation on the H I Column Density Distribution, *Astrophysical Journal Letters*, 725, L219-L222.
23. Yajima, H., Choi, Jun-Hwan, Nagamine, K., 2011, Escape fraction of ionizing photons from high-redshift galaxies in cosmological SPH simulations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 411-422.
24. Prokhorov, D.A., Dubois, Y., Nagataki, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Unveiling the 3D temperature structure of galaxy clusters by means of the thermal SZ effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, accepted.
25. Yoshida, T. , Ebisawa, K. , Matsushita, K. , Tsujimoto, M. , Kawaguchi, T., 2010, Long-Term Spectral Variations of Ultraluminous X-ray Sources in the interacting galaxy systems M51 and NGC4490/85, *Astrophysical Journal*, 722, 760-773

Non-Refereed Papers

1. Saitoh, T.R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2011, Shock-induced star cluster formation in colliding galaxies, *Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 270*, 483-486.
2. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., 2010, Ultraviolet and Infrared Radiation from Protogalaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 295-296.
3. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, The Impact of Ultraviolet Radiation on Secondary Pop III Star Formation, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 262-263.
4. Tanikawa, A., Umemura, M., 2010, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 242-245.
5. Umemura, M., 2010, First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 97-102.
6. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-zgalaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 52-59.
7. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1269*, 430-432.
8. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 107-110.
9. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H, 2010, The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 101-106.

10. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-z galaxies, American Institute of Physics Conference Series 1279, 52-59.
11. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, American Institute of Physics Conference Series 1279, 382-384.
12. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, American Institute of Physics Conference Series 1279 (Kyoto), 403-405.
13. Ohashi, T. et al., 2010, DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of SPIE, 7732, 77321S-77321S-9.
14. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2010, Nonthermal Emissions from Shocked Shells Driven by Powerful AGN jets, International Journal of Modern Physics D, 19, 893-899.

<解説記事>

1. 川勝 望, 和田 桂一 (2011), 銀河中心における超巨大ブラックホール形成の解明に向けて～多階層モデル構築の重要性～, 日本物理学会誌, 66, 285-289

<研究会開催>

1. 『初代星・初代銀河研究会』2011年 1月26～28日, 愛媛大学, 松山市
世話人: 長尾透 (愛媛大), 谷口義明 (愛媛大), 梅村雅之 (筑波大), 大向一行 (京大), 須佐元 (甲南大), 富永望 (甲南大), 森正夫 (筑波大), 吉田直紀 (東大)

<座長>

1. 川勝望
日本天文学会"活動銀河核"日本天文学会秋季年会, 金沢大学, 2010年9月13～16日

<国際会議発表・海外講演>

- 1) Umemura, M., First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)
- 2) Mori, M., Metal Enrichment in a Supernova-dominated High-z Galaxies, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)

- 3) Ogiya, G., and Mori, M., The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (April 19-23, 2010, Kyoto, Japan)(Poster)
- 4) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan)
- 5) T. Yoshida, K. Ebisawa, K. Matsushita, M. Tsujimoto, and T. Kawaguchi, A statistical study of long-term variabilities of ultraluminous X-ray sources, Ultra-Luminous X-ray sources and Middle Weight Black Holes (May 23-25, 2010, Madrid)
- 6) Kawakatu, N., Wada K, What determines AGN activity ?: Important of circumnuclear disk, Central Massive Objects: The Stellar Nuclei-Black Hole Connection (Jun.22-25, 2010, Munich, Germany)
- 7) Mori, M., Chemical and dynamical evolution of high-z galaxies, Probing the High Redshift Universe in COSPAR Scientific Assembly (18-25 July 2010, Bremen, Germany)
- 8) Mori, M., Chemical and dynamical evolution of Lyman alpha emitters and Lyman break galaxies, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (19-23 July 2010, Heidelberg, Germany)
- 9) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th Japan-Korea Young Astronomers Meeting 2010 (26-28 August 2010, Kanagawa, Japan)
- 10) Umemura, M. Yoshikawa, K., Hasegawa, K. and FIRST Project Team, 6-Dimensional Numerical Astrophysics by Next Generation Supercomputing, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 11) Tanikawa, A. and Umemura M., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 12) Ogiya, G., and Mori, M., Dynamical response of CDM halo to mass-loss driven by supernova feedback, 4th East Asia Numerical, Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 13) Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
- 14) Umemura, M., Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator "FIRST", Collaboration Meeting Lawrence Berkeley National Laboratory and University of Tsukuba, Japan (Feb. 24-25, 2011, Berkeley, USA) (Invited)

<国内講演>

招待講演

1. 梅村雅之, 「6次元計算宇宙物理学」, 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010年5月23日～5月28日, 千葉市幕張メッセ国際会議場)
2. 谷川衝, 「球状星団で形成されたコンパクト天体からなる連星の合体率」, 国立天文台理論研究部高エネルギーセミナー (2010年5月27日, 国立天文台, 三鷹市)
3. 川勝望, 「銀河中心に潜む超巨大ブラックホール形成はどこまで分かったのか?」, 第40回天文天体物理若手夏の学校, (2010年8月2日～5日, ホテル日航豊橋, 豊橋市)
4. 川勝望, 「ALMA-AGNサイエンス」, ALMA-近傍AGN観測検討会, (2010年8月23日, 国立天文台, 三鷹)
5. 梅村雅之, 「今後の共進化研究の戦略」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀河の共進化: 理論モデルと観測戦略 (2010年9月6日～9月8日, 東北大学, 仙台市)
6. 岡本崇, 「AGN フィードバックと銀河形成」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀河の共進化: 理論モデルと観測戦略 (2010年9月6日～9月8日, 東北大学, 仙台市)
7. 梅村雅之, 「銀河と巨大ブラックホールの形成史」, ALMA-Subaru Workshop 2010 (2010年9月29日～10月1日, 国立天文台, 三鷹)
8. 川口俊宏, 「活動銀河核中心100pc領域に迫る」, "TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学"研究会 (2010年10月4-5日, 国立天文台, 三鷹市)
9. 梅村雅之, 「ダークマター問題と初代星の誕生」, 金沢大学物理教室コロキウム (2010年10月22日, 金沢大学, 金沢市)
10. 谷川衝, 「Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy」, 国立天文台光赤外研究部 Galaxy Workshop Subaru (galshop) (2010年10月27日)
11. 梅村雅之, 「初代天体・銀河形成論」, 2010年度理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」 (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
12. 梅村雅之, 「初代星形成における輻射流体力学過程」, 恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで (2011年3月2日～4日, 北海道大学, 札幌市)
13. 岡本崇, 「Formation of the Local Groups satellite galaxies」, 恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで (2011年3月2日～4日, 北海道大学, 札幌市)
14. 川勝望, 「ガス降着による超巨大ブラックホール形成理論の現状と今後の課題」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

一般講演

- 1) 梅村雅之, 「多成分自己重力系の緩和過程」, 第一回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム～ポストペタスケールコンピューティングへの学際計算科学の展開～ (2010年5月7日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば市)
- 2) 川口俊宏, 森正夫, 「降着円盤の非等方性放射が活動銀河核ダストトーラス内縁構造に与える影響」, Grain Formation Workshop・銀河のダスト研究会 (2010年9月2-4日, 神戸大学, 神戸市)
- 3) 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich, 「N体シミュレーションによるアンドロメダ・ストリームの解析:矮小銀河の金属量分布」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 4) 吉川耕司, 吉田直紀, 梅村雅之, 「6次元位相空間上でのVlasov方程式の直接計算による自己重力系の数値シミュレーション」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 5) 岡本崇, 「ハロー星の性質と起源」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 6) 扇谷豪, 森正夫, 「断熱的重力場変動に対するダークマターハローの力学応答」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 7) 川口俊宏, 森正夫, 「降着円盤の放射の非等方性がダストトーラス内縁構造に与える影響」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 8) 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」における最先端研究体験企画」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 9) 谷川衝, 関口雄一郎, 牧野淳一郎, 「球状星団中で形成された連星中性子星の合体率」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
- 10) 川勝望, 平下博之, 梅村雅之, 「Blue Compact矮小銀河中心の巨大ブラックホール探査」, ALMA-Subaru Workshop 2010 (2010年9月29日～10月1日, 国立天文台, 三鷹)
- 11) 谷川衝, 「恒星の軌道運動の観測による球状星団中心の中間質量ブラックホール検出」, TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学 (2010年10月4日～5日, 国立天文台, 三鷹市)
- 12) 川口俊宏, 「JASMINEによるCyg X-1の軌道測定」, JASMINEサイエンスワークショップ-10uasで切り拓く天文学新時代-研究会 (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
- 13) 谷川衝, 「大質量ブラックホール多体系でのブラックホール合体成長に伴う銀河の構造進化」, JASMINEサイエンスワークショップ-10uasで切り拓く天文学新時代- (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
- 14) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 宇宙科学研究所 コロキウム (2010年12月3日, 宇宙科学研究所, 相模原市)
- 15) 岡本崇, 吉川耕司, 梅村雅之, 「スーパーメッシュを用いた高速輻射輸送法」, 理論

- 懇シンポジウム (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
- 16) 扇谷豪, 森正夫, 「質量放出による重力場変動の DM ハロー中心密度分布への影響」, 第 23 回理論懇シンポジウム, (2010年12月20日～22日, 京都大学, 京都市)
 - 17) 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich, 「Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream」, 第 23 回理論懇シンポジウム (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
 - 18) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 京都大学宇宙物理学教室 談話会 (2011年1月7日, 京都大学, 京都市)
 - 19) 谷川衝, 「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ー相対論的効果の影響ー」, 初代星・初代銀河研究会2011 (2011年1月26日～28日, 松山市)
 - 20) 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 東京大学天文学教育研究センター 談話会 (2011年, 2月10日, 東京大学, 三鷹市)
 - 21) 谷川衝, 梅村雅之, 「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成長と銀河の進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 22) 横山貴士, 梅村雅之, 「非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 23) 森正夫, 「アンドロメダ銀河と矮小銀河の衝突シミュレーション」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 24) 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「銀河衝突による活動銀河中心核への影響」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 25) 濟藤祐理子, 三木洋平, 川口俊宏, 森正夫, 「Wandering Blackhole and Andromeda Stellar Stream」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 26) 岡本崇, 吉川耕司, 「スーパーメッシュを用いた輻射輸送計算の加速法」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 27) 扇谷豪, 森正夫, 「バリオン重力場変動へのダークマターハローの力学応答」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 28) 川口俊宏, 森正夫, 「活動銀河核からの近赤外線放射の時間変動モデル」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 29) 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 小坂文, 川勝望, 川口俊宏, 長尾透, 松岡健太, 今西昌俊, 美濃和陽典, 大井渚, 今瀬佳介, 「赤方偏移3のSDSSクェーサーで探る超巨大ブラックホール・バルジ関係の宇宙論的進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 30) 土屋聖海, 森正夫, 新田伸也「球対称定常銀河風の解析: 遷音速解の発見とその条件」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
 - 31) 中村繁幸, 森正夫「銀河風と矮小銀河の形状の関係について」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

- 32) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫「アンドロメダストリームとダークマターハローの構造」,
日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

<社会・国民への発信>

1. 梅村雅之, 「宇宙に生まれる最初の星」, 全国同時七夕講演会 (2010年7月3日, 筑波大学, つくば市)
2. 川口 俊宏, 書評 (「巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて」, 丸善), 天文月報, 2011年1月号
3. 川口 俊宏, 寄稿 (「私の研究」), 青山学院大学 総合研究所 News SOKEN, 2010年10月号, Vol.10-1, p15

I V. 宇宙観測グループ

教 授 中井 直正

講 師 瀬田 益道

準研究員 宮本 祐介

大学院生 11名（数理解物質科学研究科後期課程3名、前期課程7名；教育研究科1名）

国土地理院つくば32m鏡の20GHz帯受信観測システムの整備を継続するとともに、オリオン分子雲や銀河面のアンモニア掃天観測など大規模な観測を継続している。また南極ドームふじ基地で南極天文学を開拓するためにプロトタイプとして30cm可搬型サブミリ波望遠鏡の開発・試験を継続し、さらに1.2mサブミリテラヘルツ望遠鏡の開発を開始した。

【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

前年度に鳥害により多数の穴があいた雨避けカバーを7月に交換するとともに鳥避けを周囲に設置した。その結果、雨が入ることを阻止するとともに現在まで鳥害による破損は生じていない。

受信機の安定化により観測の質向上と効率化を図った。そのため、いくつかの部品を交換してある程度の安定化を図ったが、さらに詳細な調査の結果、K帯シェルターの室温の変化による信号伝送ケーブルの温度変化が伝送線路の減衰を引き起こしていることを突き止めた。その対策は次年度に実施の予定である。

7月25日に32mアンテナに大きな落雷がおき、アンテナの駆動系に大きな障害が発生した。さらにビーム伝送系にあるS/X帯とK帯の受信機を切り替える斜鏡のエンコーダが故障していることも判明した。これらの故障は9月から2011年3月25日までの間に修理されたが、結局、年度末まで観測を行うことができなかった。受信機は幸いメンテナンスのため取り外して被害はなかったが、アンテナに搭載中であれば故障した可能性がある。そのため、落雷時に故障する可能性があり且つ納期に時間がかかるKバンド冷却低雑音増幅器などいくつかの予備部品を購入した。なお、3月11日の東日本大震災では大きな被害はなかった。

(2) 観測

4月29日に国立天文台のVERAと測地VLBIを行い、水沢とつくばの距離を1.4mmという高い精度で決定した。これは従来のS/X帯での測地VLBI観測に比べて1.5倍～2倍の精度であり、優れた性能を実証した。また大学連携VLBI観測に参加し、5月12日と5月31日に観測を行った。前者は三鷹での手違いにより観測データは記録されなかったが、後者では電波銀河の観測に成功し、解析中である。

4月～6月中旬において銀河系の銀河面に沿って銀緯±0.1度で銀経が-0.1度～1.3度の領域のアンモニアの(J,K)=(1,1)～(6,6)輝線および再結合線マッピングした(図1)。またオリオン分子雲とM17もアンモニアの6本の輝線、再結合線および連続波電波のマッピングを行った(図2)。

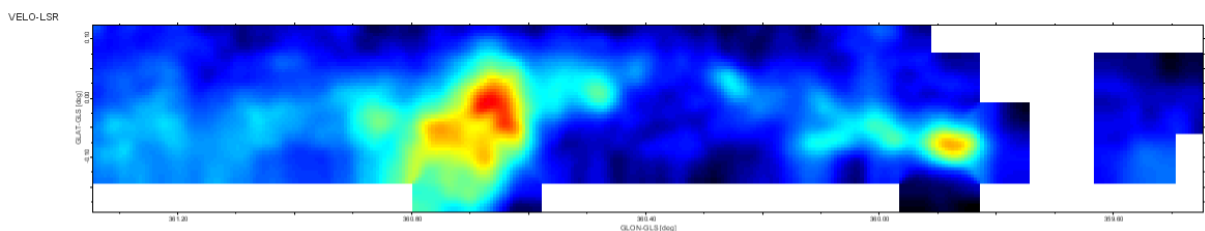


図 1. 銀河系（天の川銀河）の銀河面（銀経= $-0.1^{\circ} \sim 1.3^{\circ}$ 、銀緯= $\pm 0.1^{\circ}$ ）のアンモニア $\text{NH}_3(\text{J},\text{K})=(1,1)$ 輝線の積分強度の分布。

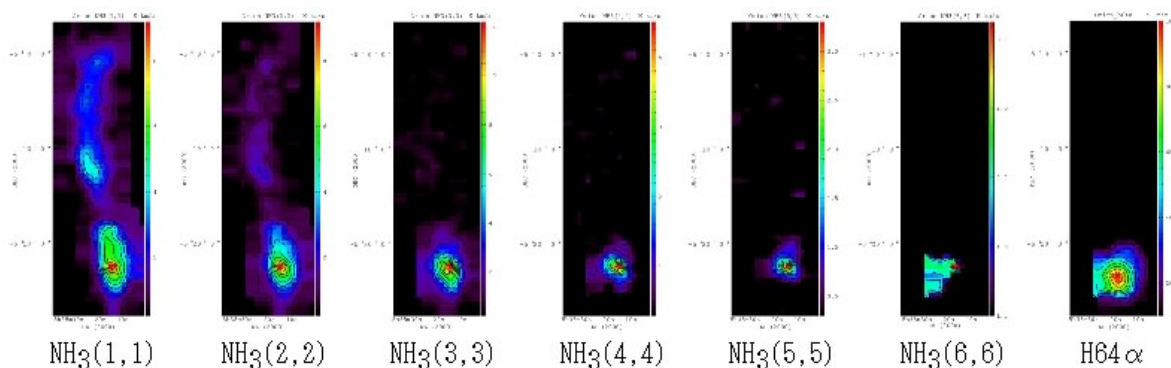


図 2. オリオン分子雲のアンモニア $\text{NH}_3(\text{J},\text{K})=(1,1)\sim(6,6)$ 輝線および再結合線 $\text{H}64\alpha$ の積分強度の分布

【2】南極天文学の推進

30cm サブミリ波望遠鏡は、500 GHz 帯での天の川の掃天観測を行う望遠鏡である。既に製作を終えているが、南極ドームふじでの観測の成功には、十分な試験観測が必要である。しかし、南極の観測サイトとしての優位性は、他の地での 500GHz 帯の試験観測の場所の確保の困難さを意味する。我々は、チリ北部の標高の高い砂漠地帯を有力な試験候補地として、試験場所の確保を目指した。その結果、標高 4500m のパリーナコータ集落を、試験観測地に選定した。高い標高から大気の 500GHz 帯の信号の吸収は少ないことが期待でき、アクセスや居住環境も良好である。空の条件が良い冬期（日本の夏）に 30cm 望遠鏡を現地に運び、評価試験を行った。

30cm 望遠鏡は可搬性を特徴としている。パリーナコータ集落では 4 人という限られた人数で、重機を用いることなく、3 日間程度の短い期間で組み立てや撤収作業ができることを実証した。また、高地では、空気が薄くなることにより、電子機器の冷却効率の低下と発電機の駆動問題が懸念されていたが、電子機器への冷媒循環装置を導入及び発電機のノズル高地仕様特殊部品への交換で、高地での動作には問題無い事を実証できた。さらに、30cm 望遠鏡による 500GHz での大気透過率の測定から、パリーナコータ集落はテラヘルツ望遠鏡の試験地として適していることを示せた。続いて、チリにおいては、本年度の目標であった、500GHz 帯の天体観測を実現した。大質量星形成領域である M17 分子雲やオリオン分子雲からの 500GHz 帯での一酸化炭素並びに中性炭素原子の輝線観測の観測に成功した。これらの輝線は、天の川のサーベイ観測における主要なプローブであり、ドームふじで 500GHz 帯での天体観測が現実的となったと言える。実際の天体観測により、実験室評価では見えていなかった問題点も明らかにできた。輝線スペクトルに現れる定在波的成分による観測感度の低下、受信機の安定化の不足による観測効率の低下等、ドームふじでの運用に向けての課題が明確となった。チリでの試験観測終了後に、日本に 30cm 鏡を戻し、定在波並びに安定化の対策は実施済みである。電波吸収帯の配置位置の最適化、受信機バイアス供給方式の見直し等の結果、実験室レベルでは問題点の解決に成功している。次年度には、30cm を再びチリに運び、試験観測を行い、対策の有効性を実証する予定である。その後、30cm 望遠鏡は、第 54 次南極観測隊で南極に向かうことを目指している。

30cm 望遠鏡に続くドームふじでの観測計画として、1.2m 鏡サブミリ波望遠鏡の開発を進めている。主鏡は、富士山望遠鏡として活躍した鏡を再利用するが、南極ドームふじ特有の環境への対応が重要な開発課題となっている。ドームふじでは低温下（最低気温マイナス 80 度 C）の運用を強

いられる。そのため、実験室に低温冷凍庫を整備し、低温下でモータ駆動試験や、放射冷却による鏡面の結露防止の基礎実験を進めた。また、サブミリ波を超えてテラヘルツ帯での観測にも耐える鏡面精度を有するかを評価する基礎実験もおこなった。次年度は、これらの基礎実験を進めると同時に、試験結果を反映した 1.2m 鏡の詳細設計、続いて製作へと進む予定である。

【3】銀河の観測的研究

活動的銀河中心核 (AGN) において水メーザーの超長基線電波干渉法 (VLBI) でメーザー円盤が検出されているものについて、その銀河回転曲線からメーザー円盤の質量と中心にあるブラックホールの質量を分離する新しい手法を考案し、いくつかの AGN においてメーザー円盤と分離してブラックホール単独の質量を決定した (査読論文 2)。

活動的銀河中心核 (AGN) で水メーザーが検出されているメーザースペクトルと硬 X 線スペクトルや吸収量との間に強い相関があることを明らかにした。

AGN である NGC5495 の中心核からの水メーザーのスペクトルの速度変化をモニターし、その変化率 (加速度) とメーザースペクトルからこの銀河の中心にあるブラックホールの質量を推定した。

野辺山 45m 電波望遠鏡および IRAM30m 電波望遠鏡を用いて赤方偏移 $z=0.405\sim 1.802$ にある電波銀河の CO および HCO⁺ の吸収線の上限值を得た (査読論文 3)。

我々の銀河系 (天の川銀河) において超長基線電波干渉法 (VLBI) を用いた視差法により距離が正確に求められた晩期型星を用いて銀河回転曲線を求めたところ、銀河系中心から太陽系までの距離を超えたところでも銀河回転はほぼ一定の速度であることがわかった。

< 論文 >

(査読論文)

1. Kikuchi, K., Nishibori, T., Ochiai, S., Ozeki, H., Irimajiri, Y., Kasai, Y., Koike, M., Manabe, T., Mizukoshi, K., Murayama, Y., Nagahama, T., Sano, T., Sato, R., Seta, M., Takahashi, C., Takayanagi, M., Masuko, H., Inatani, J., Suzuki, M., Shiotani, M., “Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)”, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 115, 12 (2010).
2. Huré, J.-M., Hersant, F., Surville, C., Nakai, N., Jacq, T., “AGN disks and black holes on the weighting scales”, *Astronomy and Astrophysics* 530, 145 (2011).
3. Curran, S.J., Whiting, M.T., Combes, F., Kuno, N., Francis, P., Nakai, N., Webb, J.K., Murphy, M.T., Wiklind, T. “On the absence of molecular absorption in high redshift millimetre-band searches”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, in press (2011).

(国際研究会集録等)

1. Maezawa, H., Yamakura, T., Koyama, T., Yamamoto, S., Shiba, S., Shiino, T., Sakai, N., Nakai, N., Seta, M., Mizuno, A., Nagahama, T., Fukui, Y., Irimajiri, Y., Sekine, N., Hosako, I. “Development of a 1.9 THz Band Hot-Electron Bolometer Heterodyne Receiver with a Quantum Cascade Laser”, *Twenty-First International Symposium on Space Terahertz Technology*, held March 23-25, 2010 at Oxford University's Said Business Center and the STFC Rutherford Appleton Laboratory, Oxford, UK. National Radio Astronomy

- Observatory (NRAO), p.444-449 (2010).
2. M. Seta, "Site Testing at Dome Fuji as a New Site for Astronomical Observatory", 4th Open Science Conference, Scientific Committee on Antarctic Research, Hotel Panamericano Buenos Aires, Argentin, Aug. 2010.
 3. M. Seta, "Radio Astronomy at Dome Fuji in Antarctica", The 11th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Nagoya Univ., Nov. 2010.
 4. T. Nitta, N. Nakai, M. Seta, M. Naruse, Y. Sekimoto, H. Matsuo, T. Noguchi, Y. Uzawa, N. Okada, K. Mitsu, "Development of Silicon Lens Array For Submillimeter Camera and Design of Broadband Antireflective Structure", The 11th Workshop on Submillimeter-Wave Receive Technologies in Eastern Asia, Nagoya Univ., Nov. 2010.
 5. T. Nagasaki, "30cm Submillimeter Wave Telescope for Astronomy at Antarctica", The 11th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Nagoya Univ., Nov. 2010.

<学会発表>

1. 中井直正、間明田好一、山内彩
「水メーザー観測によるブラックホール質量とバルジ関係」
日本天文学会 (2011年3月18日、筑波大学)
2. 石井峻、瀬田益道、中井直正、宮本祐介、永井誠、他 32m 望遠鏡グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡による M17 領域のアンモニア輝線観測」
日本天文学会 (2011年3月18日、筑波大学)
3. 吉田一樹、中井直正、石原裕子、山内彩、吉田正樹、北本俊二、前田良和、深沢泰司
「水メーザーと X 線でさぐる活動的銀河中心核のガス円盤構造」
日本天文学会 (2011年3月17日、筑波大学)
4. 新田冬夢、成瀬雅人、関本裕太郎、松尾宏、野口卓、鶴澤佳徳、岡田則夫、三ツ井健司、瀬田益道、中井直正
「超伝導共振器を用いたサブミリ波カメラ用シリコンレンズアレイの開発」
日本天文学会 (2011年3月17日、筑波大学)
5. 長崎岳人、石井峻、瀬田益道、中井直正、宮本祐介、荒井均、扇野光俊、大倉裕樹、Dragan Salak、二本松佳樹、永井誠、前澤裕之
「南極 30cm サブミリ波望遠鏡の開発 IV」
日本天文学会 (2011年3月17日、筑波大学)
6. 宮本祐介、中井直正、久野成夫
「渦巻銀河 M51 の分子ガスの運動と分布」
日本天文学会 (2010年9月24日、金沢大学)
7. 瀬田益道、石井峻、長崎岳人、宮本祐介、中井直正、本山秀明、南極天文コンソーシアム
「南極ドームふじ基地の天体観測サイト調査」
日本天文学会 (2010年9月23日、金沢大学)
8. 成瀬雅人、関本裕太郎、新田冬夢、野口卓、鶴澤佳徳
「超伝導共振器を用いたサブミリ波帯検出器アレイの開発」
日本天文学会 (2010年9月24日、金沢大学)
9. 荒井均、粉川慶太、瀬田益道、宮本祐介、扇野光俊、二本松佳樹、石井峻、中井直正、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ

「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡の左右両円偏波受信観測システムの開発」

日本天文学会 (2010 年 9 月 24 日、金沢大学)

10. 岡 朋治、指田朝郎、田中邦彦、松村真司、青野和也、瀬田益道、永井 誠、亀谷和久 (JAXA/ISAS)

「超新星残骸 W44 が星間雲に与えた力学的エネルギー総量の評価」

日本天文学会 (2010 年 9 月 22 日、金沢大学)

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 石井峻

「Development of the Transportable Telescope for Submillimeter-Wave Astronomy in Antarctica」(南極におけるサブミリ波天文学のための可搬型望遠鏡の開発)

(修士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 長崎岳人

「南極サブミリ波望遠鏡用サイドバンド分離型受信機系の開発」

2. 新田 冬夢

「南極サブミリ波望遠鏡搭載用超伝導カメラ光学系の開発」

3. SALAK Dragan

「A Study of the CO (J=1-0) Emission from the Starburst Galaxy M82」

(爆発的星形成銀河M82 からの CO (J=1-0)輝線の研究)

(修士論文) 教育研究科・教科教育専攻・理科教育コース

1. 吉田一樹

「Study on the Disk Structure of Active Galactic Nuclei Using Water-Vapor Maser and X-ray Emission」

(卒業論文)

1. 増田浩和

「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯受信機の安定化」

2. 鍋倉修英

「銀河系の回転曲線と質量分布」

3. 青木すみれ

「つくば 32m 電波望遠鏡の指向補正用器差パラメータの決定」

4. 刈田弘樹

「水メーザー観測による銀河 NGC5495 中心核のブラックホールの質量測定」

5. 齋藤浩太

「広域電波観測のための On The Fly マッピング法の開発」

6. 土井畑幸一郎

「南極 1.2m 電波望遠鏡のアンテナ系の開発」

<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 450 万円) (3/5 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 900 万円) (1/4 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 22 万円)
 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 170 万 5 千円) (1/3 年)
 5. 国立極地研究所平成 22 年度研究プロジェクト : 中井直正(研究代表者)、瀬田益道、他
「ドームふじ基地における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓」
(交付額 270 万円)
 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 702 万円) (2/3 年)
 7. 自然科学研究機構国立天文台 : 中井直正(研究代表者)
「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明」
(交付額 717 万 8 千円)
 8. 三菱財団助成 : 中井直正
「南極サブミリテラヘルツ望遠鏡の開発」
(交付額 490 万円) (1/2 年)

<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(2010 年 4 月 1 日~2011 年 3 月 31 日)

<受賞>

1. 筑波大学大学院数理物質科学研究科 2010 年度優秀論文賞(後期課程)、石井峻
「Development of the Transportable Telescope for Submillimeter-Wave Astronomy in Antarctica」(南極におけるサブミリ波天文学のための可搬型望遠鏡の開発)

V. 原子核理論グループ

教授 矢花 浩
講師 橋本 幸男
準研 船木 靖郎
大学院生 10 名

【1】原子核集団運動の理論、不安定核の構造

(1) BCS 形式による時間依存密度汎関数理論の拡張

(江幡、中務 (理研)、稲倉、橋本、矢花)

原子核を系統的に調査する為には、対相関と変形の効果を考慮する事が重要である。我々は対相関を含む時間依存の方法を開発し、三次元座標空間のメッシュ表示を採用し実時間計算を行った。新しい方法を正準基底表示時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov 理論 (Cb-TDHFB) と呼び、昨年度は現実的な Skyrme 有効相互作用を導入し、軽い核種における先行研究との比較を行った。Cb-TDHFB は BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論に基づく比較的単純な対相関を扱うが、より一般的に対相関を扱える HFB 理論に基づく先行研究と非常に近い結果を出す事が出来る事が分かった。今年度は先ず重い核種 (^{172}Yb) における比較を行った。その結果 Cb-TDHFB は 1000 倍程度小さい計算コストで軽い核と同様に非常に近い結果を出せる事が分かった。また、並列化はまだ導入していないが系統的計算のテストを開始し、軽い核の電気双極子振動 (E1) モードについて結果を蓄積している。現在では質量数 70 程度までの核種の結果が出ており、これまでの結果と比較する事で、対相関の E1 モードにおける効果を系統的に研究する事が可能になった。特に低エネルギーでの E1 モードに注目したところ、対相関の効果は基底状態を通して、モードに反映される事が分かった。現在は重い核種 (>100) 領域における系統的な計算の準備と重イオン反応計算の準備を進めている。

(2) 原子核の三次元的回転運動の理論

(橋本、堀端 (青森大))

原子核の回転運動は、さまざまな原子核集団運動の中でも最も顕著な例である。原子核平均場の回転運動は内部核子によるコヒーレントな運動の現れであり、その背後には、原子核平均場と密度分布が緊密に関係しているという原子核の自己無撞着性 (nuclear self-consistency) がある。原子核の回転運動の研究は、主に軸対称変形をした核の主軸まわりの定常回転を対象にしてクラッキング模型に基づいて行われている。一方、理論的な立場からは、より一般的な回転運動の存在が期待されている。たとえば、原子核が軸対称から離れ、三軸非対称変形をすると、“主軸まわりの定常的な回転”という基礎の上に一種のフォノンが生じたような運動モードが起こることが Bohr と Mottelson の教科書でも指摘されている。この運動は、ウォブリング (wobbling) と呼ばれ、回転軸が平均場の主軸から離れて才差運動のような振る舞いをする。本研究では、ウォブリング運動を含めた三次元的な回転運動が原子核においてどのように生じるかを微視的に理解することを目的としている。

今年度は昨年度に引き続いてオスミウム ^{182}Os の傾斜角回転 (tilted axis rotation; TAR) モードを含む励起状態について生成座標法 (GCM) を用いて調べた。平均場近似では、オスミウムは prolate 変形 (レモン型) をしているので、主たる回転軸が乗っている“赤道”から見て“北緯”方向と“南緯”方向に対称にクラックハートレーフォックボゴリェボフ (CHF B) 解が存在する。理論的なアイディアは、これらの対称な平均場解の間に量子力学的なトンネル効果のために結合が

生じ、北緯領域の解と南緯領域の解で縮退していたものが分離するという点である。われわれは、P. M. Walker らの実験で得られた K 量子数が 8 のバンドにおいて、基底状態のバンドとのバンド交差後の“シングネイチャ・スプリッティング”と呼ばれる現象がこのトンネリングのアイデアで説明できると期待している。GCM 計算で得られるスプリッティングの値は約 150keV から 250keV であるが、GCM 波動関数に期待される対称性の精度が十分ではないという問題点がある。そのために、GCM 計算の基礎となる HFB 波動関数の精度を上げ、また、GCM のコードの大幅な見直しを進めている。

(3) Gogny 力を用いた時間依存 HFB コードの開発

(橋本、三藤)

我々は、Gogny 力を用いた時間依存 HFB (TDHFB) 方程式を数値的に解く方法を開発・展開している。微小振幅の撃力を与えた波動関数を初期条件にした場合にはこの方法は準粒子 RPA になる。一方、非線形効果は振幅の増大とともに重要になってくる。昨年度は、球形のチタン (Ti) 52 の原子核について、軸対称変形の範囲内で大振幅振動運動の緩和現象を扱った。今年度は、非軸対称な振動も考慮した場合へと拡張した TDHFB 計算を実行した。四重極型の非軸対称性振動運動の場合でも、巨大共鳴領域のエネルギーに相当する高い振動数の振動運動をしつつ、その振動中心はゆっくりと緩和して最終的に球形を振動中心とする大振幅の運動へと落ち着いていく。その運動においては、軸対称運動の場合と同じように、 $p_{3/2}$ 軌道内での対相関力による占有数の変動を見ると、粒子状態の占有のされ方は断熱的であるように見える。同様な計算を、たとえばチタン 44 においても行い、緩和を伴う大振幅運動の際に、パリティの異なる $f_{7/2}$ 軌道と $d_{3/2}$ 軌道との間でも対相互作用によって粒子の占有状態の変化が起こることがわかった。その過程は断熱的と見える。一方、対相互作用の働かない変形領域においては、ハートレーフォックの局小点がポケットのようになってその近傍の軌道を一定の領域に閉じ込めることも明らかになった。これらの非線形大振幅運動の内容を、モード間結合の効果という視点から理解していくことが今後の方向である。

(4) 多 Slater 行列式の重ね合わせによる軽い原子核の記述

(福岡、船木、矢花、中務 (理研))

非経験的に原子核の性質を理解することは、今日の原子核理論分野における大きな目標となっている。 ^{12}C 核の基底状態まで生の核力に基づいた記述が可能となっており、励起状態に現れるクラスター状態に対する非経験的な記述が大きな目標となっている。本研究では、核子間相互作用としては、幅広い核種の基底状態や応答関数を平均場模型の範囲で記述する Skyrme 相互作用を用い、乱雑な初期波動関数から虚時間法を用いて多数の Slater 行列式を生成し、それらを重ね合わせることにより、与えられたハミルトニアンに対して収束した励起スペクトルの記述を行おうというものである。

^{12}C 核に対する記述を行ったところ、励起スペクトルに関しては概ね満足のいく結果が得られたものの、 0_2^+ 状態の半径は従来クラスター模型で記述されたものに比べて小さく、基底状態と大差ない結果となった。このため、本計算に用いている枠組みで、クラスター模型の波動関数を用いた計算を行った。その結果、クラスター模型波動関数では 0_2^+ 状態に対して大きな半径を持つ結果が得られた。しかし、クラスター模型波動関数と、乱雑な初期波動関数から生成した波動関数の両方を用いて重ね合わせたところ、 0_2^+ 状態にクラスター模型波動関数はほとんど混ざらず、小さい半径となる結果が得られた。実験的には、基底状態から 0_2^+ 状態への遷移行列要素が得られているが、それらはクラスター模型による予測と今回の計算との中間にある。

【2】クラスター構造

(1) ガスのクラスター構造状態、 α 粒子凝縮

(船木、山田(関東学院大)、堀内(RCNP)、東崎(RCNP)、G. Röpke(Rostock 大)、P. Schuck(IPN, Orsay))

原子核の基底状態は通常殻模型的構造を持つことが知られており、密度の飽和性に基づいて液体的構造を有している。これに対し、核子あたりわずか1 MeV 程度の励起状態に α 粒子からなる気体的クラスター構造状態が生じ、更にそれらが最低エネルギー軌道を占有する、 α 凝縮現象が起こることが最近になって知られるようになった。この原子核における新しい構造形態である、 α クラスターによる量子凝縮状態は、ホイル状態と呼ばれる ^{12}C 原子核の第二 0^+ 状態(励起エネルギー7.7 MeV)で実現されていることが明らかになっている。

昨年度に引き続き、核子の自由度を完全に扱った微視的枠組みの中で、4 α 凝縮タイプの模型波動関数を用いて ^{16}O 原子核の4 α 凝縮状態の存在を調べた。その際、我々が開発した、ACCC法(解析接続法)を利用した、共鳴状態を簡潔に取り扱う方法を同時に採用し、単なる束縛状態近似を超えた方法を用いて研究を行った。また微視的クラスター模型波動関数から α 粒子の自由度を抜き出し、 α 粒子の一体密度行列を導出し、波動関数の解析を行った。この結果、直交条件模型を用いて我々が行った理論計算とほぼ一致する結果を得た。この結果はPhysical Review誌に掲載された。

半微視的模型を用いて、4つの α 粒子による4体問題をこれまでより格段に広い模型空間を用意し解く計算コードを開発した。これは ^{16}O における4 α 閾値近傍程度までの励起スペクトルを $J^\pi \neq 0^+$ の状態に対しても再現し、かつ多体共鳴を取り扱う方法である、複素回転法を用いた研究を行うために必要である。またこれにより従来存在が予言されている4 α 直線鎖構造状態とガスの構造状態を同時に再現することも可能になると考えられる。計算コードは超並列計算用にチューニングしており、今後の発展を望んでいる。

(2) ^{11}B におけるHoyle アナログ状態

(山田(関東学院大)、船木)

^{11}B 原子核の3番目(3/2) $^-$ 状態は、基底状態からの強いモノポール遷移が観測されている。比較的低い励起状態への強いモノポール遷移は、その励起状態がクラスター構造を有することの強い証拠であることを我々は近年示しており、この状態は発達したクラスター構造を持つことが示唆される。更に反対称化分子動力学(AMD)に基づく計算により、この状態は $\alpha+\alpha+t$ の三体クラスター構造を有し、3 α クラスター凝縮状態である、ホイル状態(^{12}C 原子核の第二 0^+ 状態)の類似状態(ホイルアナログ状態)であるとの指摘がなされた。我々は $\alpha+\alpha+t$ 三体直交条件模型に基づき、3体共鳴を扱うことのできる複素回転法を用い、束縛状態近似を超えた枠組みの中で ^{11}B 原子核のホイルアナログ状態を調べた。その結果、この3番目(3/2) $^-$ 状態は発達した $\alpha+\alpha+t$ クラスター構造を持つが、ホイル状態のような α 粒子一体場への強い凝縮構造は有していないこと、ホイルアナログ状態として、 $\alpha+\alpha+t$ 閾値近傍に2番目(1/2) $^-$ 状態が存在しかつ大きな核半径とガスの構造を持っていることを示した。この結果はPhysical Review誌に掲載された。

【3】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) 強パルス光の物質中伝播を記述するマルチスケール・シミュレータの開発

(矢花、杉山、篠原、乙部(原研)、G.F. Bertsch(Univ. Washington))

固体中の光の伝播や、表面での反射などの現象は、通常は屈折率を用いて記述される。しかし、今日の光科学のフロンティアで用いられる高強度・超短パルスレーザーでは、強い光電場に起因す

る非線形な電子応答がもたらす様々な現象が問題となっている。このような高強度パルス光と物質の相互作用を理解するためには、従来の電磁気学の枠組みを超えたアプローチが必要とされる。

原理的には、高強度パルス光のもたらす電子ダイナミクスは時間依存シュレディンガー方程式で記述され、光電磁場は、電子の密度やカレントをソースとして持つマクスウェル方程式で記述されるため、両者を結合した方程式を解けばよい。しかし、可視光領域の光の波長が μm 程度であるのに対し、光電場が誘起する電子ダイナミクスの空間スケールは、原子サイズと同程度の nm 程度であり、異なる空間スケールの問題を扱うためマルチスケール・シミュレーション法を開発することが必要とされる。

我々は、電子ダイナミクスに対して時間依存密度汎関数理論を用い、電子の運動を記述する時間依存コーン・シャム方程式と光電磁場の伝播を記述するマクスウェル方程式に対して、どのようにすればマルチスケール・シミュレーションが可能となるかを検討した。そして、得られた方程式系に対して摂動論を用いると、誘電率を介してマクスウェル方程式と時間依存コーン・シャム方程式が分離されることを確認した。さらに、マルチスケール・シミュレーション法のプログラムを作成し、予備的な計算を遂行した。

(2) 磁気円二色性の実時間計算

(李、矢花、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

静磁場中に置かれた原子や分子の右円偏光と左円偏光に対する光吸収の差は、磁気円二色性と呼ばれる。この量に対する計算は古くから行われているが、摂動論で扱う場合は光電場と静磁場に対する2次の量になることから、複雑な計算が必要とされてきた。最近では、応答関数理論を用いた枠組みなどにより、様々な量子化学手法に基づく計算が盛んに行われている。

我々はこの磁気円二色性に対し、時間依存コーン・シャム方程式の実時間解法を用いた新たなアプローチを開発した。それは、有限の強度の静磁場中で双極場による摂動を加え、非線形な時間依存コーン・シャム方程式を非線形のまま解くものである。静磁場と双極場の強度を十分弱くとることにより、2次の微小量として磁気円二色性の強度関数を得ることが可能になる。

この枠組みを、いくつかの小さな有機分子と C_{60} 分子に対して適用した。我々の枠組みではノルム保存擬ポテンシャルを用いるが、そのために和則が大きく破れることが見出された。また、実験値との比較では、計算結果は定性的には磁気円二色性の符号などを再現するものの、強度の絶対値に関しては数倍の差異が見出される場合が多いことが見出された。このことから、時間依存密度汎関数理論は、原子や分子の振動子強度に対して定量的に信頼できる結果を与えてきたが、磁気円二色性に対しては、得られた結果の信頼度に関し、慎重に判断することが必要であることが分かった。

(3) コヒーレントフォノンの生成機構に対する時間依存密度汎関数理論による研究

(篠原、矢花、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

固体中の光学フォノンの振動数に比べてパルス長の短い超短パルスレーザーを照射した際に起こる現象の一つにコヒーレントフォノンがある。これまでその生成メカニズムに関し現象論に基づいて調べられてきており、ISRS (Impulsive Stimulated Raman Scattering) と DECP (Direct Excitation of Coherent Phonon) と呼ばれる2つのメカニズムの存在が議論されてきた。

我々は、時間依存密度汎関数理論に基づき、第一原理からコヒーレントフォノンの生成起源を解明することを試みた。まず、半導体であるSiを例に、異なる振動数を持つパルス光を照射した計算結果を調べることにより、時間依存密度汎関数理論がISRS、DECPの2つのメカニズムを含むことが明らかになった。直接バンドギャップよりも小さい振動数のパルス光を照射したところ、パルスの照射中のみ起こる電子励起により力が働くISRS機構によるコヒーレントフォノンの生成が見出された。一方、直接バンドギャップを越える振動数のパルス光を照射した場合は、パルス照射後

に実励起が起り、パルス光が照射した後も継続して力が働く、DECP 機構によるコヒーレントフォノンの生成が見出された。このように、時間依存密度汎関数理論により第一原理からコヒーレントフォノンの記述が可能であることを初めて明らかにした。

コヒーレントフォノンの実験的測定は、Sb 等の半金属物質に対して数多く行われており、その場合における計算の準備を行った。

<学位>

1. 理学博士

江幡修一郎「Canonical-basis Time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov Theory and Linear-Response Calculation for Light to Heavy Nuclei」

2. 理学修士：

岡本 稔 「相対論的平均場模型による低密度核物質の非一様構造」

畑 佑樹 「時間依存密度汎関数理論を用いた分子における高次高調波発生の研究」

福岡佑太「スキルム力を用いた多スレーター行列式の重ね合わせによる軽い原子核の励起状態の研究」

三藤竜也「TDHFB法を用いた原子核の四重極型非軸対称非線形振動運動の研究」

李 晔旻「First-principles Study of Magnetic Circular Dichroism in Time-dependent Density Functional Theory」

<発表論文>

1. Magnetic Circular Dichroism in Real-time Time-Dependent Density Functional Theory
K.M. Lee, K. Yabana, G.F. Bertsch
J. Chem. Phys. 134, 144106 (2011).
2. Coherent phonon generation in time-dependent density functional theory
Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, G.F. Bertsch
Phys. Rev. B82, 155110 (2010).
3. First-principles Calculation of Coherent Phonon Generation in Diamond
Y. Shinohara, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, K. Yabana, T. Otobe, G.F. Bertsch,
J. Phys. Cond. Matter 22, 384212 (2010).
4. A Massively-Parallel Electronic-Structure Calculations Based on Real-Space Density Functional Theory
J.-I. Iwata, D. Takahashi, A. Oshiyama, T. Boku, K. Shiraishi, S. Okada, K. Yabana
J. Comp. Phys. 229, 2339-2363 (2010).
5. Canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory and linear-response calculations
S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura, K.Yoshida, Y.Hashimoto, K.Yabana

Phys. Rev. C 82 (2010), 034306

6. Canonical-basis TDHFB を用いた線形応答計算
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩
素粒子論研究 119 No. 1 (電子版) (p. 154-161), 大振幅集団運動の微視的理論
7. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB with a schematic pairing functional
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, Y. Hashimoto, K. Yabana
AIP Conf. Proc. 1269, 466
8. LINEAR RESPONSE CALCULATION USING CANONICAL-BASIS TDHFB WITH A SCHEMATIC PAIRING FUNCTIONAL
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, Y. Hashimoto, K. Yabana
Mod. Phys. Lett. A25 (2010), 2001-2002
9. Linear Response Calculation Using Canonical-basis TDHFB with a Schematic Pairing Functional
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, Y. Hashimoto, K. Yabana
RIKEN Accelerator Progress Report 43, 51(2009)
10. A description of t-band in 182Os within the fully microscopic calculation,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
INFORMATION Vol. 13, 569-575(2010).
11. Quantum mechanical effects in tilted axis rotations in 182Os,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
AIP Conference Proceedings Vol. 1235, 91-95 (2010).
12. Cluster structures in $(3/2)^-$ and $(1/2)^+$ states of ^{11}B
T. Yamada and Y. Funaki
Mod. Phys. Lett. A 25, 1943 (2010).
13. Alpha clustering and condensation in ^{16}O
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Mod. Phys. Lett. A 25, 1939 (2010).
14. Open problems in alpha particle condensation
Y. Funaki, M. Girod, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada
J. Phys. G -Nucl. and Part. Phys. 37, 064012 (2010).
15. $\alpha+\alpha+t$ cluster structure and $^{12}\text{C}(0_2^+)$ -analogue states in ^{11}B
T. Yamada and Y. Funaki
Phys. Rev. C 82, 064315 (2010).
16. Microscopic study of 4α -particle condensation with inclusion of resonances
Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck
Phys. Rev. C 82, 024312 (2010).
17. Nuclear Alpha-Particle Condensates

T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki
arXiv:1103.3940, to be published in "Cluster in Nuclei (Lecture Notes in Physics) Vol. 2,
ed. by C. Beck, (Springer-Verlag, Berlin, 2011)

<国際会議発表>

1. First-principles theoretical description for many-electron dynamics induced by ultrashort laser pulses
K. Yabana
Symposium at PACIFICHEM 2010,
Honolulu, U.S.A., Dec. 15-20, 2010.
2. Dynamical Role of Halo Nucleons in Nuclear Reactions
K. Yabana
Halo 2010 Symposium
Shonan Village Center, Japan, Dec. 6-9, 2010.
3. Ab-initio description for laser-induced electron-phonon dynamics in dielectrics
K. Yabana
7th Int. Symp. on Ultrashort Surface Dynamics
Brijuni Isrand, Croatia, Aug. 22-26, 2010.
4. Quantum Dynamics Simulation in Real-Time and Real-Space Application to Light-Matter Interaction
K. Yabana
Collaboration Meeting LBNL and CCS UT, Berkeley U.S.A., Feb. 24-25, 2011.
5. Systematic study of E1 mode using Canonical-basis TDHFB
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩
French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems
[理研 RIBF, 2011.01.05 - 01.08]
6. The research of E1 mode using Canonical-basis TDHFB
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩
JAPAN-ITALY EFES Workshop on Correlations in Reactions and Continuum
[Torino, 2010.09.06 - 09.08]
7. The research of E1 mode using the Canonical-basis TDHFB
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
The 9th CNS-EFES International Summer School
[理研 仁科ホール, 2010.08.18 - 08.24]
8. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB with a schematic pairing functional

江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Nuclei (EENEN10)
[理研 仁科ホール, 2010.06.16 - 06.18]

9. Nonlinear collective oscillations of light nuclei in TDHFB with Gogny force
Y. Hashimoto,
Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Exotic Nuclei (EENEN 10)
(RIKEN, June 16 - 18, 2010)
10. Description of t-band in 182Os with HFB+GCM,
Y. Hashimoto,
University of Aizu-JUSTIPEN-EFES symposium “Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei”
(2010年11月10-13、会津大学)
11. Alpha clustering and condensation in nuclei
Y. Funaki,
2nd Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics” (SOTANCP2), 25-28 May,
2010, Université Libre de Bruxelles, Belgium (招待講演)
12. Alpha clustering and condensation in nuclei
Y. Funaki
EFES-IN2P3 Conference, “Many-body correlations from dilute to dense nuclear systems
(MBC2011)”, 15 -18 February, 2011, Institut Henri Poincare, France
13. Alpha particle condensation in light nuclei
Y. Funaki
Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Exotic Nuclei(EENEN10), 16 - 18 June, 2010,
Nishina Hall, RIKEN
14. Theoretical investigation for generation of coherent phonon in bulk Si
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Yosuke Kawashita, Jun-ichi Iwata,
Tomohito Otobe, George F. Bertsch
7-th International Symposium on Ultrafast Surface Dynamics
USD7(Brijuni Islands, Croatia 2010.8.22-26)
15. Description of Coherent Phonon Generation in Dielectrics based on
Real-Time TDDFT calculation
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Yosuke Kawashita, Jun-ichi Iwata,
Tomohito Otobe, George, F. Bertsch
International Conference on Core Research and Engineering Science of
Advanced Materials (Osaka University, Osaka, Japan PSI-13, 2010.5.30-6.4)

<国内研究会・学会等>

1. 原子核移行反応・分解反応の視点

矢花一浩

RCNP 研究会「重イオン蓄積リングの物理」、阪大 RCNP, 2010 年 9 月 24-25 日

2. 時間依存密度汎関数理論による高強度パルス光伝播の記述

矢花一浩、篠原康、杉山健、G.F. Bertsch

日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 24 日

3. 実時間・実空間 TDDFT 法を用いた磁気円二色性の第一原理計算

李畊旻、矢花一浩、G.F. Bertsch

日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪大学中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 24 日

4. TDHF による多核子移行反応の記述に向けて

矢花一浩

核反応研究会、阪大 RCNP、2010 年 8 月 2-4 日

5. パルスレーザーが誘起する電子・フォノンダイナミクス第一原理計算

矢花一浩

平成 21 年度学際共同研究成果発表会、2010 年 5 月 7 日、計算科学研究センター

6. Canonical-basis TDHFB を用いた線形応答計算

江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩

大振幅集団運動の微視的理論

基研 湯川記念館パナソニック国際交流ホール, 2010. 10. 24 - 10. 26

7. CbTDHFB による A=50 近辺までの E1 モードの研究

江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩

日本物理学会 2010 年秋季大会 [九州工業大学, 2010. 09. 11 - 09. 14]

8. Gogny-TDHFB による原子核の非線形振動と緩和

橋本幸男,

大振幅集団運動の微視的理論

基研 湯川記念館パナソニック国際交流ホール, 2010. 10. 24 - 10. 26

9. HFB+GCM による指標分離の記述、

橋本幸男、堀端孝俊、

日本物理学会 2010 年秋季大会 (9 月 11 日~9 月 14 日)

10. 4α OCM を用いた ^{16}O の構造研究

船木靖郎

「少数粒子系物理の現状と今後の展望」研究会, 2010 年 8 月 20-21 日, 福岡国際会議場

11. 4α 直交条件モデルを用いた ^{16}O のクラスター構造研究

船木靖郎

日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日-14 日, 九州工業大学戸畑キャンパス

12. α cluster states in ^{16}O
Y. Funaki
Workshop on “Clustering and Nucleon Correlations”, Sep. 30– Oct. 1, Hokkaido University
13. 多スレーター行列式の重ね合わせによる ^{12}C 励起構造の記述
福岡 佑太, 船木 靖郎, 矢花 一浩, 中務 孝
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 – 03. 28]
14. Skyrme 力を用いた多スレーター行列式による軽い核の励起状態の記述
福岡 佑太, 船木 靖郎, 矢花 一浩, 中務 孝
日本物理学会 2010 年秋季大会 (九州工業大学, 2010. 9. 14)
15. 軸対称調和振動子基底を用いた時間依存密度汎関数による軽い核の線形応答、
三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩、
日本物理学会 2010 年秋季大会 (9 月 11 日～9 月 14 日)
16. TDHFB による非軸対称非線形振動の研究
三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩、
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 – 03. 28]
17. 高強度超短パルスレーザーに誘起される誘電体の直流電流の絶対位相依存性
篠原康、乙部智仁、矢花一浩
日本物理学会 66 回年次大会、新潟大学 2011 年 3 月 25 日-28 日
18. 高強度パルス光伝播を記述するマルチスケールシミュレータの開発
矢花一浩、杉山健、篠原康、乙部智仁、G.F. Bertsch
次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第 5 回 公開シンポジウム、甲南
大学ポートアイランドキャンパス 2011 年 2 月 22 日-23 日
19. 高強度短パルスレーザーに誘起される電子-格子ダイナミクスの第一原理計算
篠原康、乙部智仁、岩田潤一、矢花一浩、G.F. Bertsch
物性研・CMSI・次世代ナノ情報 合同研究会「計算物質科学の課題と展望」、東大物性研 2011
年 1 月 5 日-7 日
20. 時間依存密度汎関数理論による半導体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、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁
日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 2010 年 9 月 23 日-26 日
21. 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機構の解明
篠原康
原子・分子・光科学 (AMO) 討論会、つくば 2010 年 6 月 11 日-12 日
22. 高強度パルス光を伝搬を記述するマルチスケール・シミュレータの開発
矢花一浩、杉山健、篠原康、乙部智仁、G.F. Bertsch

物性研・CMSI・次世代ナノ情報合同研究会「計算物質科学の課題と展望」
[東大物性研、2011. 01. 05-01. 07]

23. 高強度パルス光伝搬を記述するマルチスケール第一原理シミュレータの開発
杉山健、篠原康、乙部智仁、矢花一浩、G. F. Bertsch
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 - 03. 28]
24. 3次元計算による低密度核物質の非一様構造
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
日本物理学会 2010 年秋季大会 (9月11日~9月14日)
25. 低密度核物質の非一様構造による3次元結晶
岡本稔、丸山敏毅、矢花一浩、巽敏隆
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 - 03. 28]
26. 固体からの高次高調波スペクトルの励起過程による変化の第一原理計算
乙部智仁、矢花一浩
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 - 03. 28]
27. TDHF 計算による核子移行反応の記述
関澤一之、矢花一浩
日本物理学会 第 66 回大会[新潟大学 2011. 03. 25 - 03. 28]

その他

<招待セミナー>

1. (TD)DFT (時間依存) 密度汎関数理論 —実時間・実空間法を中心に—
矢花一浩
新学術科研費 A04 班勉強会、2011 年 1 月 26 日、2 月 3 日、筑波大学計算科学研究センター
2. 時間依存密度汎関数理論の新展開
矢花一浩
新潟大学セミナー、2010 年 10 月 21 日
3. Real-time TDDFT description for laser-matter interaction
K. Yabana
Univ. San Sebastian, Oct. 13, 2010.
4. パルスレーザーに誘起された電子の量子ダイナミクスに対する第一原理シミュレーション
矢花一浩
関西光科学研究所セミナー、2010 年 9 月 9 日

<集中講義>

フェルミ多粒子系ダイナミクスの計算科学

矢花一浩

新潟大学、2010年10月20-22日

VI. 原子核実験グループ

教授 三明康郎
准教授 新井一郎、江角晋一、小沢 顕
講師 小松原哲郎、笹 公和、中條達也、Peter Schury
助教 鈴木 宏
準研究員 長江大輔
研究員 下村真弥、洞口拓磨
技 官 加藤純雄
大学院生 池田義雅 (D3)、山口香菜子 (D3)、渡邊健悟 (D3)、森口哲朗 (D3)、
坂田洞察 (D2)、佐野正人 (D2)、横山広樹 (D1)、轟木貴人 (D1)、
伊藤由太 (D1)、石橋陽子 (M2)、大石寛人 (M2)、横山和幸 (M2)、
竹内理将 (M2)、近藤祐樹 (M1)、仲里 仁 (M1)、新井田貴文 (M1)、
窪田晋太郎 (M1)、水野三四郎 (M1)、阿部康志 (M1)、奥村公威 (M1)、
中村聡佑 (M1)、福岡翔太 (M1)

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

(1) 稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成16年4月以来、理化学研究所のRIビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして稀少 RI リングの R&D を行っている。稀少 RI リングは、等時性蓄積リング、入射ライン、セプタム磁石、キッカー磁石などから構成される。平成22年度は、等時性蓄積リングを TARNII のセクター磁石のみで構成するとともに、入射ラインとして SHARAQ を利用し、SHARAQ から直接蓄積リングに RI ビームを入射するスキームの検討を行った。現在の配置案を図1に示す。現状では、RI ビームのエネルギーは 200 A MeV であり、入射ラインより下流では、運動量アクセプタンスが、 $\pm 0.5\%$ 、角度アクセプタンスは、x 軸方向が ± 15 mrad、y 軸方向が ± 10 mrad である。

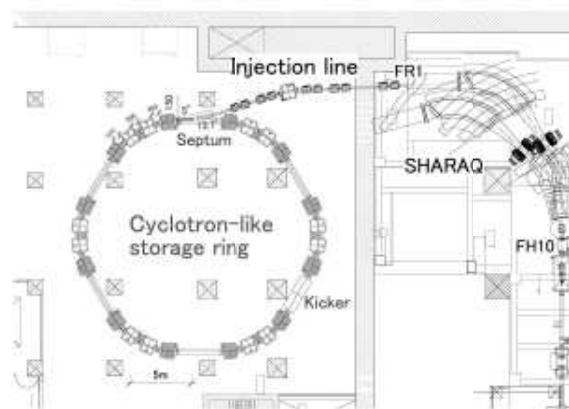


図 1: 稀少 RI リングの構成と配置図

蓄積リングは、6セクターであり、各セクターは TARNII のセクター磁石4台で構成する。等時性磁場を作るために各セクターの最初と最後の磁石には、動径方向に静磁場に傾きをつける（一次の補正）とともにトリムコイル（二次の補正）を設置する。平成22年度は、磁極を削った場合の磁極の傾きの最適化と TOSCA による磁場分布の計算などを行った。

平成22年度は、キッカー磁石の遅延時間短縮のためのトリガー回路の改造を行った。この改造したトリガー回路をモデルキッカーに組み込み、遅延時間の測定を行った。測定された遅延時間はトリガー信号入力からサイラトロン貫通まで405 nsであり、200 A MeV のビーム入射に要求される遅延時間を下回った。

平成23年度は、稀少 RI リングのデザインを完成させる。入射ラインおよび、セプタム磁石を最適化し設計を完成させる。蓄積リングのセクター磁石に対しては、磁場測定を行い、現実的な磁場分布のデータを取得する。さらに、動径方向に静磁場に傾きをつける方法を最適化し（特にコストの面で）、トリムコイルの設計を行う。キッカー磁石においては、実機製作に向けて、さらに遅延時間を短縮できるようにトリガー回路の改造を行うとともに、入射と出射を同じ電源で行うための充電器の開発も行う。

(2) 稀少 RI リングのビーム光学シミュレーション

理研 RIBF[1, 2]における稀少 RI リング [3, 4] は、1セクション当たり4台の双極電磁石 (TARN II) からなる6箇所の曲線部と、セクション間の6箇所の直線部からなる、周長60.35 mのサイクロトロン型のリングである。合計24個の双極電磁石は、ビームの偏向と収束の機能を兼ね備えている。ビームの周回数は2,000回を想定している。性能面では、ビームのエミッタンスを数十 π mm-mradとして、運動量領域 $\pm 0.5\%$ にわたって 10^{-6} の等時性が要求される。

稀少 RI リングのデザインを検討し必要なパラメータを決定するために、4次のルンゲ-クッタ法を使用した高精度のビーム光学シミュレーションを用いている。本年度は、電磁石が発生させる磁場の形として、TOSCA 計算の結果を Enge 関数でフィットしたものを導入した。磁石端のフリンジの形がより写実的になり、計算の精度が向上した。また本シミュレーションを使って、等時性磁場を作るために必要な、動径方向の磁場の傾き (n 値) の大きさを決定した。この傾きの付いた磁場は、TARN II 磁石の磁極を斜めに削り取ることで実現する。現在は、その加工の形状を検討しているところである。

さらに、磁場データを読み込み、磁場を補完するプログラムを作成している。3次元空間にメッシュ状に広がる磁場データを、スプライン補間とラグランジュ補間を使って補間することにより、任意の点での磁場強度を得ることが出来る。これは、将来、出来上がった磁石が発生させる磁場を実際に測定してシミュレーションに入れることで、より精度の高い計算が出来ることを目的としている。この補間法を用いることにより、 10^{-7} の精度でリング内の飛行時間が計算できる。

(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。その為の飛行時間検出器に求められるのは100 ps以下の時間分解能、RI ビームの電荷が検出器通過前後で変化しないこと、大きなビーム径で飛行する RI ビームを全て検出することである。その為、この検出器は可能な限り薄くかつ大面積を有しなくてはならない。そこで炭素薄膜に RI ビームを通過させ、その際に炭素薄膜から放出される電子を電磁場中で制御し、検出器に導く方式 [9] の飛行時間検出器の開発を進めている。昨年度までに稀少 RI リングのビームサイズ (100 mm \times 50 mm) に対応するため、ビームサイズと同程度の面積を持つ炭素薄膜と検出器 (95 mm \times 42 mm) を用意した。今

年度はこれらを用いて原理実証機を製作し、その時間分解能の評価を 20 MeV の陽子ビームを使った測定を筑波大学ペレトロン加速器において、200 A MeV の Kr ビームを使った測定を HIMAC において行った。HIMAC で行った実験から得られた時間分解能は約 160 ps であった。また検出効率も約 40% であった。今後は主に線源を用いて開発を進め、時間分解能向上を目指す。

(4) Na アイソトープの相互作用断面積測定

理化学研究所の RI ビームファクトリーの BigRIPS で行われた相互作用断面積測定実験で取得されたデータのうち、Na アイソトープの解析を行った。解析の結果を図 2 に示す。エネルギーは 240 A MeV である。これまでに ^{32}Na までの相互作用断面積は GSI において測定されており [5]、エネルギーの違いを考慮すると両者の結果はほぼ一致する。 $^{33,34,35}\text{Na}$ の相互作用断面積は新しいデータである。新たに測定された 3 つの不安定核のうち、 ^{34}Na は小さな中性子分離エネルギーが予想されており、ハロー構造を持つ可能性がある。相互作用断面積の理論計算は以下のようにして行った。単一粒子模型を使って、軌道角運動量を変えながらバレンス核子の波動関数を計算し、バレンス核子の密度分布を計算した。その密度分布を使ってグラウバー模型により相互作用断面積を計算した。その結果、 ^{34}Na のバレンス核子は安定核のモデルから予想される $1f_{7/2}$ 軌道に配位されているよりも、本来エネルギー的に上にあるべき $2p_{3/2}$ 軌道に配位されている可能性が高いことがわかった。これは、 ^{34}Na が p -wave ハローの構造を持つことを示唆するとともに、 ^{34}Na で軌道の逆転が起きていることも示唆する。中性子魔法数 20 の中性子過剰領域は、”island of inversion” と呼ばれ、大きな変形や軌道の逆転が起きている領域であることが知られている。 ^{34}Na はこの ”island of inversion” に位置しており、軌道の逆転が起きているとしても不思議ではない。今後、中性子分離エネルギーの測定および、バレンス核子の軌道角運動量に敏感であるコア核の運動量分布の測定などが望まれる。

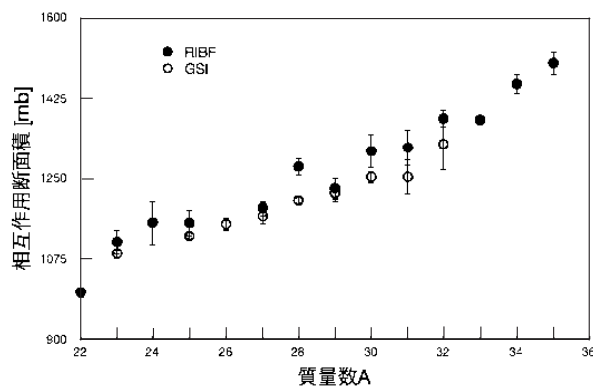


図 2: Na 同位体における相互作用断面積。黒丸は今回の結果。白丸は以前の GSI の結果 [5]。

(5) 30 MeV の α 散乱による ^9Be の散乱微分断面積測定

中性子ドリップライン近傍の不安定核では、中性子ハローのようなエキゾチックな核構造が現れることが知られている。ハロー構造は、バレンス中性子の束縛エネルギーが弱く、また s (もしくは p) 軌道に入っているために、その分布がコア周辺に大きく広がることで起こると考えられている。近年では、安定核の励起状態におけるハロー構造が見つかりつつあり、その一例が ^9Be の第一励起状態 (1.68 MeV) である。この励起状態は中性子放出閾値の約 15 keV 上にあり、基底状態に比べて約 1 fm も大きな核半径を持つ [6]。この結果は 35.5 MeV の $^9\text{Be}(\alpha, \alpha')^9\text{Be}$ 反応による散乱微分断面積測定 [7] の結

果から、基底状態及び励起状態の回折半径を求めることで導出された。本研究では、 ${}^9\text{Be}$ の上記の結果を独立に確かめ、またより高い励起状態の核半径を導出するために、 ${}^9\text{Be}$ の α 散乱実験を行った。

実験は本学 UTTAC の E コースで行った。 α 粒子のビームエネルギーは 30 MeV で、強度は約 60 nA だった。標的は 1.0 μm 厚の ${}^9\text{Be}$ 標的を使用した。散乱した α 粒子は重心系で 140 度まで測定した。

回折半径は、散乱微分断面の極小値、極大値を示す角度から導出できる。さらに、基底状態と励起状態の核半径の差は、それぞれの回折半径の差と等しい [8]。 ${}^9\text{Be}$ の各励起状態の回折半径、及び基底状態との核半径の差を表 1 にまとめた。その結果、1.68 MeV の励起状態の核半径は基底状態より 1.8 fm 程度増大、2.43 MeV の励起状態は基底状態とほぼ同じ大きさであることが分かった。他の励起状態に関しては、現在解析中である。

表 1: 基底状態及び励起状態の回折半径、及び基底状態との核半径の差

| 励起エネルギー (MeV), J^π | 回折半径 (fm) | 基底状態との半径の差 (fm) |
|------------------------|-----------------|------------------|
| 0.00, $3/2^-$ | 5.71 ± 0.04 | - |
| 1.68, $1/2^+$ | 7.55 ± 0.16 | 1.84 ± 0.17 |
| 2.43, $5/2^-$ | 5.55 ± 0.05 | -0.16 ± 0.06 |
| 3.05, $5/2^+$ (L=1) | 6.70 ± 0.60 | 0.99 ± 0.60 |
| 3.05, $5/2^+$ (L=3) | 6.24 ± 0.38 | 0.53 ± 0.39 |

(6) Measurement of Charge Changing Cross Section for B isotopes

近年、不安定核の研究が進み、陽子や中性子の分布が安定核にはみられないスキンやハローの構造を持つ原子核が発見されてきた。中性子数が過剰な B 同位体では荷電変化断面が中性子が増加しても変化しないことが報告されている。これは核内における陽子の分布半径が中性子数に依らないことを示唆し、中性子過剰な B 同位体ではスキン・ハロー構造が起きていることを示している。但し測定されている荷電変化断面の誤差が大きいため、詳細な議論ができていないのが現状である。そこで我々は ${}^{11,12,13,14,15}\text{B}$ 同位体の荷電変化断面測定を行った。さらにその後の展望として、測定した荷電変化断面から B 同位体の荷電半径（陽子分布半径）を導出し、中性子過剰核におけるスキン・ハロー構造の解明につなげる。荷電変化断面から荷電半径を求める方法は、手法としてはいまだ確立されていないものの、高い精度で荷電半径を決定できる可能性を持っている。

荷電変化断面はトランスミッション法によって測定した。荷電変換反応を起こしていない粒子の計測から荷電変化断面を求めるこの手法は精度の良い測定ができる利点を持つ。実験は大阪大学核物理研究センター、EN コースで行った。リングサイクロトロンによって核子あたり 80 MeV まで加速された ${}^{18}\text{O}$ ビームを Be 標的に照射し、その結果生じた幾種もの破砕片から双極磁石とエネルギー損失により分離・精製を行い B 同位体を得た。その後、B 同位体を C または Al 標的に照射し、標的と散乱した B 同位体を 4 枚のシリコン検出器によって測定した。4 枚のシリコン検出器での各々のエネルギー損失から入射粒子を識別し、C または Al 標的通過後も荷電変換反応を起こしていない粒子の数を特定することにより、荷電変化断面を決定する。解析を進めている段階ではあるが ${}^{11,12,13}\text{B}$ 同位体の C 標的による荷電変化断面はおよそ 900 mb であることが分かった。

(7) ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応の断面測定

超新星爆発時の種核形成に重要な役割をなす ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応の断面測定では、より低温での

反応率測定をめざして、GEM(Gas Electron Multiplier)を採用した3次元飛跡検出型ガス検出器(MSTPC)の改造を行った。 $10^5\sim 10^6$ 個/秒の重イオン打込みに対しても、所定の性能を充たすGEMホイル形状、配置、印可電圧調整等が開発の目標であったが、数度のオフライン試験および、ビームを用いた総合試験を経て、十分に満足できる性能を示すことができた。これらの成果は、昨年度までの報告に加えて、日本物理学会(2010年秋季大会、9/11-14九州工業大学開催)と、第7回Micro Pattern Gas Detector研究会(11/26-27山形大学開催)において報告した。我々の使用しているような厚さ400mmのThick GEMを用いた検出器が実際の実験に使用可能な成果を出した例は少なく、評価の高い報告を行うことができた。

2011年、7日間のビームタイムにおいて、これまで開発して来たGEM-MSTPCを用いて本実験を、原研東海研究所のタンデム加速器施設にあるTRIACで行った。この反応は、超新星爆発中で重元素を合成する鍵を握る反応として過去にも実験が行われている。検討の結果、実験では、 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応断面積を温度領域 10^9K (重心系のエネルギーで0.5-1.0 MeVの範囲)で、以前よりも統計精度およびエネルギー分解能をあげて測定し、過去に測定された励起関数中にみえる共鳴ピークの確定を行うことを目的とした。残念ながら、ビームイベント棄却に用いた検出器の効率が予想よりも低く、ビーム強度を $3\times 10^4\text{pps}$ 程度までにしか上げられなかったが、50時間の測定で、統計的には、十分なデータを蓄積することができた。

現在データ解析中である。GEM-MSTPCの座標軸に対する校正、検出部からの信号に対するエネルギー校正、GEM-MSYPCを囲むように配置した中性子飛行時間検出器の時間原点校正等を行い、反応イベントの抽出を行っている。

(8) 不安定核 ${}^{40}\text{Sc}$ の核磁気モーメントの測定

不安定核 ${}^{40}\text{Sc}$ は二重閉殻で非常に安定な ${}^{40}\text{Ca}$ の近傍に位置し、その核構造は興味深い。しかしながら ${}^{40}\text{Sc}$ の核磁気モーメント(μ)はまだ測定されていない。 μ は原子核の配置混合に敏感であるため、我々は2008年度から筑波大学応用加速器部門(UTTAC)で偏極ビームを用いて標的を偏極させる偏極移行反応と、 β ray-detected nuclear-magnetic resonance method(β -NMR法)と呼ばれる手法を組み合わせた方法に基づき、 $\mu({}^{40}\text{Sc})$ の測定を始めた。この手法では、生成した原子核が偏極していること、及びその核偏極が測定の間保持されていることが重要である。昨年度はそれまでの標的(stopper)の結晶では核偏極の保持が出来ていなかったのではないかと考え、結晶を2種類試すことで μ 測定を行ったが、 μ の中心値を得ることは出来なかった。

そこで今年度は μ が既知のプロープ核を用いて次の開発研究を行った: 1) ${}^{20}\text{F}$ を用いた測定装置・計測システムの性能評価、2) ${}^{40}\text{Sc}$ の測定でも充分長いスピン偏極緩和時間を提供できると期待されるCaO標的中での ${}^{41}\text{Sc}$ のスピン緩和時間測定、3) ${}^{24m}\text{Al}$ を用いた偏極陽子ビームによる核偏極生成、4) ${}^{29}\text{P}$ を用いた偏極移行反応における偏極生成のビームによる偏極量の違いの確認。これらの研究から偏極生成・保持に関する知見を得ることが出来、 ${}^{40}\text{Sc}$ 以外でも利用可能な汎用性の高い β -NMR実験装置の整備を進めてきた。しかし現時点で ${}^{40}\text{Sc}$ については充分な生成量、純度が得られず、 μ の中心値を得ることは出来なかった(図3)。中間エネルギー領域での核反応を用いれば、二次ビームとして生成される ${}^{40}\text{Sc}$ の生成量、純度の向上を実現できるはずであると考え、今後は中間エネルギー領域での μ 測定を理研(RIPS)で行いたい。

(9) MRTOF 開発

我々は短寿命不安定核($T_{1/2}\sim 10\text{ms}$)の精密質量測定($\delta m/m < 10^{-6}$)を目的とした多重反射飛行時間式質量分析器(MRTOF)の開発を進めている。

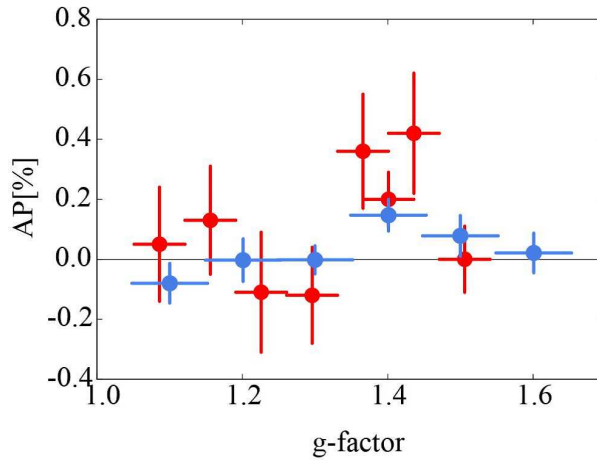


図 3: ^{40}Sc の NMR スペクトル。赤は静磁場 0.37 [T]、青は 0.3 [T] をそれぞれ印加して測定したデータ。

現在、Rbの安定同位体を用いたオフライン測定において、測定時間 8.4ms で質量分解能 $R_m \sim 141,000$ 、質量精度 $\delta m/m \sim 2.5 \times 10^{-7}$ (統計数 $N=1,000$ の場合) を達成している。(図 4) これはペニングトラップ質量分析器 (PTMS) に匹敵する性能であり、測定時間は PTMS による測定と比べはるかに短い。すなわち、これまで PTMS で測定が困難であった短寿命不安定核の精密質量測定を可能にする。

また同時にオンライン測定を行うための開発も進めている。ガスセルから MRTOF 前段トラップにイオンを効率よく輸送するために、テーパ型 RFQ クーラーのシミュレーションを行った。シミュレーション結果から、直線型に比べおよそ 2 倍の効率改善が見込まれる。以上をふまえ、今後オンラインでの質量測定を進めて行く予定である。

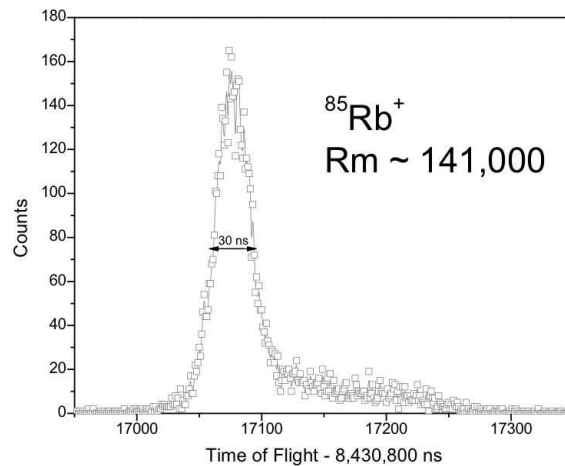


図 4: Rb 安定同位体の TOF スペクトル。

(10) ^{12}C 標的における 30 MeV の α 粒子散乱

^{12}C の励起準位である Hoyle state (7.65 MeV, 0^+) の存在は天文学の観点から予測された。この準位は 3 つの α 粒子によるクラスター構造を持つ。これは星の内部で 3 つの α 粒子から ^{12}C が生

成されることと深く関わっている。クラスター構造を持つ Hoyle state の核半径は ^{12}C の基底状態のそれよりも大きくなっていることが予測される。本研究では ^{12}C の α 散乱実験から回折半径を求めることによって、それらの核半径の差を推定した。実験は UTTAC の E コースで行った。 α 粒子のビームエネルギーは 30 MeV で、強度は約 5 nA だった。標的は $100 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ の ^{12}C 標的を使用した。散乱した粒子は実験室系で 70 度まで測定した。実験結果を図 5 に示す。回折半径は、散乱微分断面積の極小値、極大値を示す角度から導出できる。さらに、基底状態と励起状態の核半径の差は、それぞれの回折半径の差と等しい [10]。ここから、Hoyle state が基底状態よりも小さくなる結果となった。これはビームエネルギーが低かったためと考えられる。

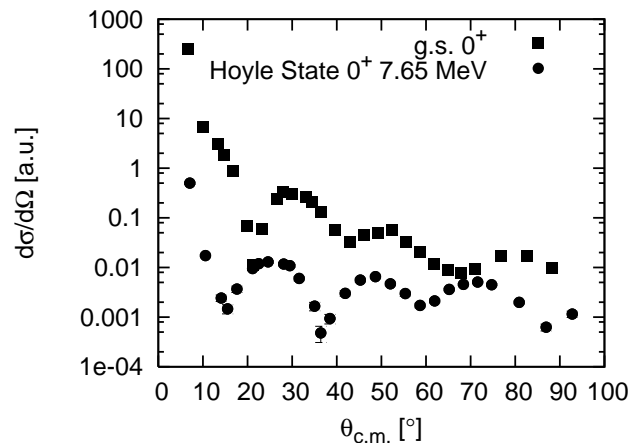


図 5: ^{12}C 標的における 30 MeV の α 線の散乱微分断面積。 $\theta_{c.m.}$ は重心系での散乱角。

(11) ^{26}Al の宇宙元素合成に関する研究

宇宙における元素合成の基礎的な研究には、原子核同士の反応断面積や励起状態の情報が非常に重要である。我々は、加速器を用いて、元素合成が進行する状態を実験室において再現し、その反応機構について研究を行っている。

ガンマ線観測衛星によって ^{26}Al からの 1.8 MeV のガンマ線が銀河中心方向から飛来する事が観測された [11]。この ^{26}Al の半減期は 72 万年であり、この事から現在でも宇宙空間で活発な元素合成が行われている事が判る。この ^{26}Al の生成量を正確に見積もる為には、この生成過程のバイパス経路に存在する ^{26}Si の原子核構造が非常に重要である。 $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ 反応は ^{26}Si の励起状態 3^+ を経由して共鳴核反応が進行すると予想されるが、この励起状態には実験的に不確定な部分がある。我々はゲルマニウム検出器 3 台によるガンマ線同時計数測定によって、これまで見出されていなかった 5886 keV の準位を観測した。また、この状態のスピンを決定する為にガンマ線角度相関測定を行った。今回は、 ^{26}Si の励起状態のスピン整列の程度を見積もる為に、 γ 線角度分布を測定した。

検出効率 70% と 50% の 2 台のゲルマニウム検出器を用いて、ガンマ線角度分布を測定した。50% のゲルマニウム検出器を 90 度に固定しモニター検出器とした。70% のゲルマニウム検出器は、角度を 90 度から 140 度まで、10 度ずつ動かしながら測定した。

測定したガンマ線の角度依存性は、モニター検出器で検出した ^{25}Mg の $1/2^+ \rightarrow 5/2^+$ 585keV のガンマ線強度を基準として解析した。角度分布を $W(\theta) = W_0(1 + A_2P_2 + A_4P_4)$ の関数でフィットして W_0 を求めた。 ^{26}Si の $2^+ \rightarrow 0^+$ 1797keV 遷移について測定された $W(\theta)/W_0$ の値を図 6 に示す。実線および破線は、スピン整列パラメータ σ/J を 0.5 と 1.0 として求めた理論値である。この

結果から、 $^{24}\text{Mg}(^3\text{He},n)^{26}\text{Si}$ 反応で生成された ^{26}Si のスピン整列は非常に小さい事が判った。生成の初期状態で整列していたスピンの、等方的になった理由として、中性子の放射、ガンマ線の放射、さらに、未知の強い摂動が考えられる。

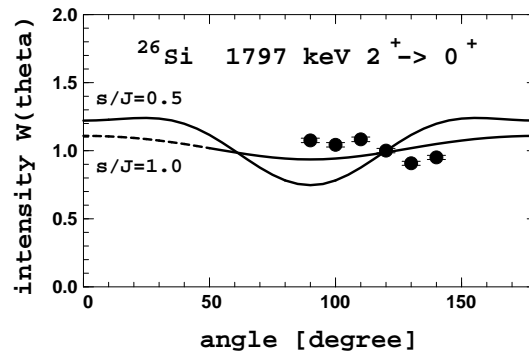


図 6: ^{26}Si の 1797keV 遷移の角分布

(12) 加速器質量分析法 (AMS) による宇宙線生成核種 ^{36}Cl の分析

筑波大学 12UD ペレトロンタンデム加速器を用いた ^{36}Cl ($T_{1/2} = 0.301$ Myr) の AMS 検出限界は、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 同位体比で 10^{-16} レベルであり、測定可能な同位体範囲は $10^{-10} \sim 10^{-15}$ となっている。また、標準試料 ($^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 10^{-12}$) の繰り返し測定精度は 3% である。筑波大学 AMS グループでは、 ^{36}Cl - AMS 測定が可能な世界の 8 研究機関による ^{36}Cl の研究室間比較検定試験に参加した。Dr. Silke Merchel により NIST SRM 4943 を希釈して作成した $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 1 \times 10^{-11}$ (SM-Cl-11)、 1×10^{-12} (SM-Cl-12)、 1×10^{-13} (SM-Cl-13) の検定試料について、8 研究機関の測定値の相互比較を行った。 ^{36}Cl - AMS の研究室間比較検定の最終報告は、参考文献 [12] で公開している。図 7 に比較検定結果のまとめを示す。

AMS を用いた応用研究では、「ドームふじアイスコア第二期プロジェクト」において、11 ka 付近の宇宙線強度変動について ^{36}Cl と ^{10}Be 変動との対比をおこなっている。また、最終退氷期における ^{36}Cl 濃度について、時間分解能 30 - 40 yr での詳細解析を継続して実施中である。2010 年度からは「北グリーンランド氷床深層掘削計画 (North Greenland Eemian Ice Drilling Project: NEEM)」において、 ^{36}Cl 測定を担当している。今後、 $^{10}\text{Be}/^{36}\text{Cl}$ による NEEM コア深部の年代推定とコア連続性の確認を実施予定である。カルスト地形の形成に関する研究では、「中国天抗の形成過程を探る国際共同研究プロジェクト」において、Dashiwei Tiankeng の ^{36}Cl による表面露出年代の試験測定を実施した。

(13) ^{41}Ca の加速器質量分析法 (AMS) の開発

^{41}Ca ($T_{1/2} = 0.104$ Myr) の AMS 開発では、ターミナル電圧 8 MV による $^{41}\text{CaF}_3$ 加速による測定を試みている。第 2 荷電変換フォイルは使用せずに、43.35 MeV の $^{41}\text{Ca}^{5+}$ をガス ΔE -E 検出器で測定する。試料は、 $\text{CaF}_2 : \text{ZnO} : \text{Ag} = 1 : 2 : 1$ とし、パイロットビームには、 $^{66}\text{ZnO}_2$ 加速による、 $^{66}\text{Zn}^{8+}$ (69.39 MeV) を使用する。図 8 に、 ^{41}Ca -AMS でのガス ΔE -E 検出器への入射粒子のエネルギー損失計算結果を示す。 ^{41}Ca は ^{41}K (自然界存在度 6.7%) が強い妨害元素となり、通常の質量分析法では検出不可能な核種であるが、地球環境分野での年代測定や医学生物分野への応用が期待されている。

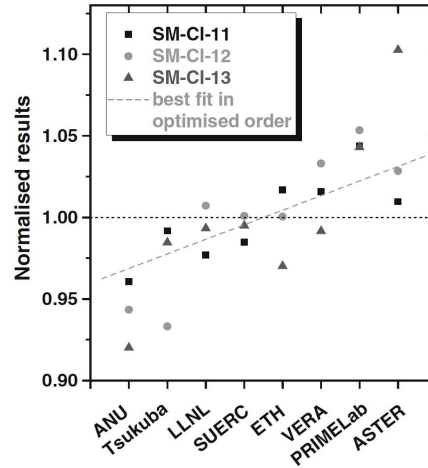


図 7: 世界の 8 研究機関で実施した ^{36}Cl 研究室間比較検定試験結果。NIST SRM4943 を希釈した $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 1 \times 10^{-11}$ (SM-CI-11)、 1×10^{-12} (SM-CI-12)、 1×10^{-13} (SM-CI-13) の検定試料を用いた。

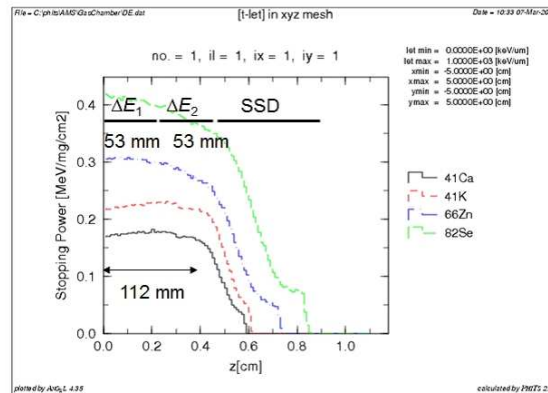


図 8: ^{41}Ca 測定でのガス ΔE -E 検出器への入射粒子のエネルギー損失計算結果

【2】高エネルギー原子核実験（三明康郎、江角晋一、中條達也、下村真弥、加藤純雄）

(1)ALICE 実験における楕円型方位角異方性 v_2 と原子核変貌係数 R_{AA} の測定

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、これまで行われて来た米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) における超相対論的重イオン加速器 (RHIC) でのエネルギー (核子対あたり 200 GeV) より、1 桁以上大きいエネルギー (核子対あたり 2.76 TeV の世界最高エネルギー) の鉛+鉛衝突実験が行われた。筑波大学高エネルギー原子核実験グループの参加する ALICE 実験は、衝突開始から数日に収集したデータを使って数編の論文を投稿した。そのうち、重要な 2 つの結果を紹介する。図 9 は、LHC-ALICE 実験で測定された楕円型方位角異方性 v_2 の横方向運動量依存性を示す。[13] 異なる色のデータ点は中心衝突度 (青丸 : 10 - 20%、赤四角 : 20 - 30%、緑三角 : 30 - 40%) を示し、1 桁低いエネルギーでの結果 (RHIC-STAR 実験の結果) が灰色の

帯領域で表示してある。この結果及び最近の RHIC での低エネルギーの実験から、 v_2 の横方向運動量依存性は RHIC の低いエネルギー領域 (核子対あたり 39 GeV) から、LHC のエネルギー (核子対あたり 2.76 TeV) まで、ほぼ変わっていない事が分かる。平均横運動量分布の変化により平均 v_2 は、衝突のエネルギーと共に増加している事は、一方で分かっているが、決まった横運動量での v_2 がほぼ一定であるこの結果は、この広い衝突エネルギー領域でのクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 流体の粘性等の性質があまり変わっていない事を示唆している。

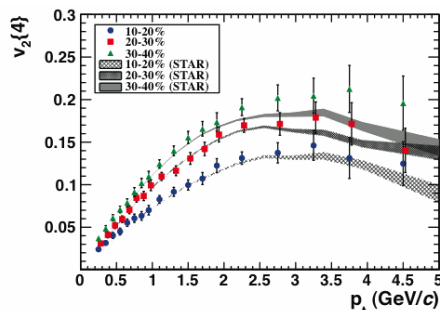


図 9: ALICE 実験における楕円型方位角異方性 v_2 及び RHIC 実験との比較 [13]

図 10 は、同じく LHC-ALICE 実験で測定された鉛+鉛中心衝突での横運動量分布の、陽子+陽子衝突の重ね合わせからのずれを示す。[14] 1 回の原子核同士の衝突内で起こり得る核子+核子衝突回数で規格化された陽子+陽子衝突での横方向運動量分布に対する比の値 (原子核変貌係数 R_{AA}) として表示してある。5~10 GeV/c 領域における 1.0 に比べて著しい減少は、これまでの RHIC エネルギーのデータ R_{AA} に比べてさらに幾分小さいが良く似た傾向を示し、さらに高い横運動量領域での増加傾向も、最近になって RHIC エネルギーでの重イオン衝突で観測された R_{AA} の横運動量依存性傾向と似ている。高横運動量を持った初期パートンの QGP 中でのエネルギー損失による減少が、5~10 GeV/c 領域で最大になり、それより大きな横運動量領域では、その減少は少なくなり、より高いエネルギーのパートンのエネルギー損失が相対的に少なくなっている事を示している。

(2) PHENIX 実験における高次方位角異方性 v_n と直接光子 v_2 測定

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行われている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー原子核衝突実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ物質相の実験的検証が進められている。初期衝突時の原子核内の核子分布の空間的な統計的揺らぎを起源とした高次の方位角異方性が、最近になって注目を集めている。この異方性は空間的な揺らぎが起源であると考えられるが、その後の QGP の流体的な膨張や発展の結果として得られるため、この実験的な観測可能量である運動量空間での方位角異方性は、粘性等の QGP の流体的性質を引き出す事に使える可能性が示唆された。図 11 は、RHIC-PHENIX 実験において核子対あたり 200 GeV の金+金衝突実験で測定された高次の方位角異方性 (赤丸: v_2 、青三角: v_3 、白抜き黒四角: v_4) の横運動量依存性を中心衝突度毎に表示した。[15] また、LHC-ALICE 実験から、核子対あたり 2.76 TeV の鉛+鉛衝突実験において、ほぼ同様の結果が同時期に報告された。[16] 原子核衝突の形状によって主に決まる 2 次 (楕円型) の異方性に比べ、特に中心衝突領域では、3 次、4 次の異方性は同程度に大きく、特に 3 次の異方性の中心衝突度に対する依存性が大変小さい事が示されている。この解析で測られた高次の異方性は、同次数

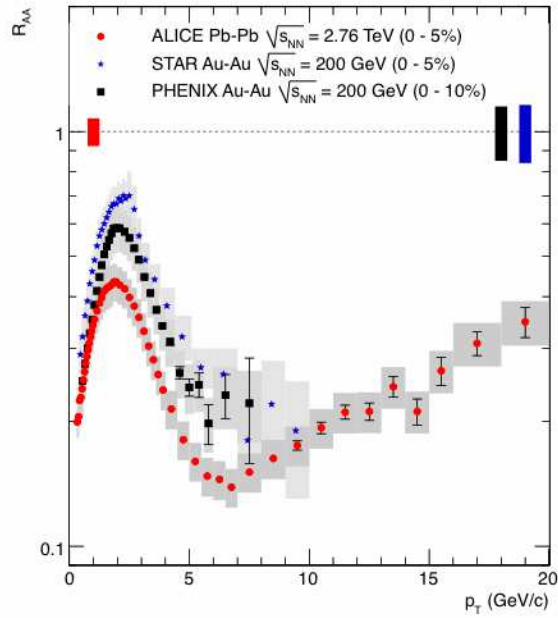


図 10: ALICE 実験における原子核変貌係数 R_{AA} 及び RHIC 実験との比較 [14]

の定義で測られた反応平面 Ψ_n に対する測定であり、特にここで示した $v_4(\Psi_4)$ は、これまで測定して来た $v_4(\Psi_2)$ に比べ 2 倍程度大きい事を示している。これらの結果は、観測した高次の方位角異方向性が、初期の幾何学的形状の揺らぎに起因している事に、矛盾していない事が示された。 v_2 のみを流体力学的計算を比較し、粘性を求める場合に比べ、 v_3 を含める事により、より良い精度で粘性を求めることが可能になった。

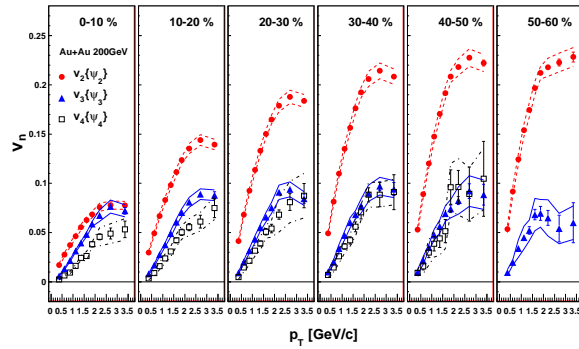


図 11: PHENIX 実験における高次の方位角異方向性 v_n [15]

図 12 は、同じく RHIC-PHENIX 実験において測定された直接光子の楕円型方位角異方向性 v_2 を示す。[17] 上の 3 パネル (左図: 中心衝突度 0-20%, 中図: 20-40%, 右図: 40-60%) では、 π^0 中間子の v_2 (赤四角: RXN 反応平面、黒丸: BBC 反応平面) を、包括光子の v_2 (白抜き緑四角: RXN 反応平面、白抜き青丸: BBC 反応平面) と比較している。低い横運動量領域 (3 GeV/c 以下) では、 π^0 中間子と

包括光子はほぼ同じ v_2 を示すが、高い横運動量領域では、包括光子の方がより小さい v_2 を示している。この結果と、これまでに測定した直接光子と包括光子の比より、下の3パネルに示すように直接光子の v_2 (赤四角：RXN 反応平面、黒丸：BBC 反応平面) が求まる。 v_2 測定を行う中心ラピディティ領域から離れた2つの領域にある異なる反応平面による結果 (RXN: $|\eta| = 1 \sim 2.8$, BBC: $|\eta| = 3.1 \sim 3.9$) を両方表示し、 $\Delta\eta$ 間隔に応じた non-flow バイアスによる効果が高横運動量領域で確認出来る。高い横運動量領域で小さい値を示す直接光子の v_2 は、初期衝突のハードな散乱により作られた光子が QGP と相互作用しない事で定性的に理解出来る。また低い横運動量領域では、直接光子は、その相互作用の小ささにより少なくとも初期の膨張以前の寄与がある事を考慮すると、他のハドロン程度に大きな v_2 を持つ事は大きな驚きであり、熱光子が流体的な膨張や発展に多大な影響を受けている事を示唆している。

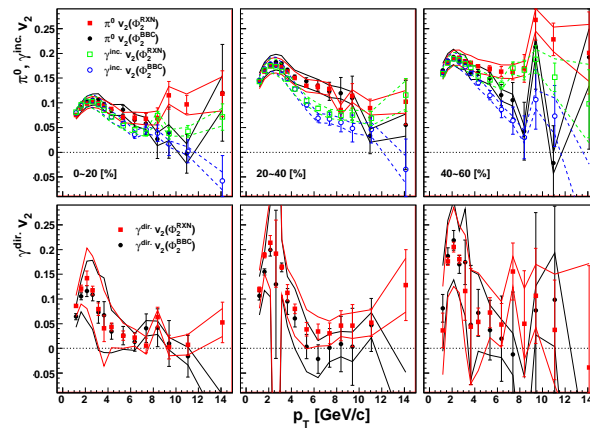


図 12: PHENIX 実験における直接光子の楕円型方位角異方性 v_2 [17]

(3)LHC-ALICE 実験・ジェット識別用電磁カロリメータ (Di-jet Calorimeter, DCal)

RHIC 実験によりクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成の確証を掴み、現在では QGP 物性の理解のフェーズに移りつつある。また QGP 物性の理解に最も直接的な測定は、原子核衝突におけるジェットの変調効果の観測であることが明らかとなってきた。我々は 2008 年度 (平成 20 年度) より、LHC-ALICE 国際共同実験でのジェット識別測定を強化するカロリメータを提案、推進している。我々が提案した新たな電磁カロリメータ (Di-jet Calorimeter, DCal) は、日本、米国、フランス、イタリア、中国の各研究機関よりなる国際協研究として進めている。この国際協力の実現によって、当初計画でカバーしうる立体角の 4 倍の検出器を建設することが可能となり、測定可能なジェットのエネルギー範囲を大きく拡大することとなった。

平成 22 年度においては、我々が製作を分担している検出器の必要部品の購入を終え、筑波大学において電磁カロリメータモジュールの組立てを開始した。筑波大学の製作分担は 288 モジュールである (プロジェクトとしてのモジュール全数は 1152 個)。平成 23 年 2 月に 288 モジュールの 1/3 にあたる、96 モジュールの組み立てを完了し、筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門のクレーンを使用し、フランス・ナントへの輸送作業を完了した (図 13)。また同時に 1/3 の部品をイタリア・カタニアに送り、筑波大から現地に 2 名 (下村真弥 博士研究員、横山広樹 氏 (D1)) を 1 ヶ月半派遣し、96 モジュールの組み立てと、シグナル読み出し素子である APD (アバランシェ・フォトダイオード) の組み立てを完了した。残り 1/3 の 96 モジュールについては、東日本

大震災の影響により製作が遅延したが、平成23年7月に完成予定である。また平成23年度では、残り96モジュールの製作を完了するとともに、フランス・ナントにモジュールを輸送し、さらにフランス・グルノーブルにて全288モジュールをインストール可能な状態にし（スーパーモジュールの組み上げ）、読み出し系のテストを行う予定である。またLHC-ALICE実験では、陽子・陽子衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 7 \text{ TeV}$, 2.76 TeV) と鉛・鉛衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$) の実データが順調に取得されている。これらのデータを使ったジェットの解析を推進しつつ、DCalによるジェット測定の準備を行う。



図 13: 筑波大からフランス・ナントに輸送した電磁カロリメータモジュールの一部（右奥）。

参考文献

- [1] Y.Yano, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B261**, 1009 (2007).
- [2] T.Kubo, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B204**, 97 (2003).
- [3] T.Yamaguchi *et al.*, Proceedings of STORF'05, 297 (2005).
- [4] Y.Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B266** 4575 (2008).
- [5] T.Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3241(1995).
- [6] A.A.Obloglin *et al.*, AIP Conf. Proc. **1224**, 100 (2010).
- [7] R.R.Peterson, Nucl. Phys. A **377**, 41 (1982).
- [8] A.N.Danilov *et al.*, Phys. Rev. C **80**, 054603 (2009).
- [9] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978)
- [10] A. N. Danilov, *et al.* Phys. Rev. Lett., C80, 054603 (2009)
- [11] R. Diehl, *et al.* Nature 439 (2006) 45
- [12] S. Merchel, *et al.*, Ultra-trace analysis of ^{36}Cl by accelerator mass spectrometry: an interlaboratory study, Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2011, doi:10.1007/s00216-011-4979-2.

- [13] Phys.Rev.Lett. 105(2010)252302, ALICE Collaboration.
- [14] Phys.Lett.B 696(2010)30-39, ALICE Collaboration.
- [15] arXiv:1105.3928, PHENIX Collaboration.
- [16] arXiv:1105.3865, ALICE Collaboration.
- [17] arXiv:1105.4126, PHENIX Collaboration.

<論文>

1. RI ビームで探る不安定核の核構造 (Studies of nuclear structure for unstable nuclei by RI beams)、原子核研究 (Genshikaku-Kenkyu)、第 5 4 巻、1 4 ~ 2 3 ページ (2 0 1 0)
2. B.Sun, R.Knöbel, H.Geissel, Yu.A.Litvinov, P.M.Walker, K.Blaum, F.Bosch, D.Boutin, C.Brandau, L.Chen, I.J.Cullen, A.Dolinskii, B.Fabian, M.Hausmann, C.Kozhuharov, J.Kurcewicz, S.A.Litvinov, Z.Liu, M.Mazzocco, J.Meng, F.Montes, G.Münzenberg, A.Musumarra, S.Nakajima, C.Nociforo, F.Nolden, T.Ohtsubo, A.Ozawa, Z.Patyk, W.R. Plaß, C. Scheidenberger, M.Steck, T.Suzuki, H.Weick, N.Winckler, M.Winkler, T. Yamaguchi, Direct measurement of the 4.6 MeV isomer in stored bare ^{133}Sb ions, Physics Letters B 688 (2010) 294-297.
3. Tetsuya Ohnishi, Toshiyuki Kubo, Kensuke Kusaka, Atsushi Yoshida, Koichi Yoshida, Masao Ohtake, Naoki Fukuda, Hiroyuki Takeda, Daisuke Kameda, Kanenobu Tanaka, Naohito Inabe, Yoshiyuki Yanagisawa, Yasuyuki Gono, Hiroshi Watanabe, Hideaki Otsu, Hidetada Baba, Takashi Ichihara, Yoshitaka Yamaguchi, Maya Takechi, Shunji Nishimura, Hideki Ueno, Akihiro Yoshimi, Hiroyoshi Sakurai, Tohru Motobayashi, Taro Nakao, Yutaka Mizoi, Masafumi Matsushita, Kazuo Ieki, Nobuyuki Kobayashi, Kana Tanaka, Yosuke Kawada, Naoki Tanaka, Shigeki Deguchi, Yoshiteru Satou, Yosuke Kondo, Takashi Nakamura, Kenta Yoshinaga, Chihiro Ishii, Hideakira Yoshii, Yuki Miyashita, Nobuya Uematsu, Yasutsugu Shiraki, Toshiyuki Sumikama, Junsei Chiba, Eiji Ideguchi, Akito Saito, Takayuki Yamaguchi, Isao Hachiuma, Takeshi Suzuki, Tetsuaki Moriguchi, Akira Ozawa, Takashi Ohtsubo, Michael A. Famiano, Hans Geissel, Anthony S. Nettleton, Oleg B. Tarasov, Daniel P. Bazin, Bradley M. Sherrill, Shashikant L. Manikonda, and Jerry A. Nolen, Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a ^{238}U Beam at 345 MeV/nucleon, J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 073201.
4. T.Moriguchi, S.Ishimoto, S.Igarashi, A.Ozawa, Y.Abe, Y.Ishibashi, Y.Ito, H.Ooishi, H.Suzuki, M.Takechi, K.Tanaka, Developments of a thick and large solid hydrogen target for radioisotope beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 624 (2010) 27.
5. T.Kuboki, T.Ohtsubo, M.Takechi, I.Hachiuma, K.Namihira, T.Suzuki, T.Yamaguchi, Y.Ohkuma, Y.Shimbara, S.Suzuki, R.Watanabe, M.Fukuda, M.Mihara, D.Nishimura, Y.Ishibashi, Y.Ito, T.Moriguchi, D.Nagae, H.Ooishi, K.Ogawa, A.Ozawa, Y.Yasuda, H.Suzuki, T.Sumikama, K.Yoshinaga, H.Geissel, M.Winkler, T.Izumikawa, S.Momota, N.Aoi, N.Fukuda, N.Inabe, D.Kameda, K.Kusaka, T.Kubo, M. Lantz, T. Ohnishi, M. Ohtake, T. Suda, H.Takeda, K.Tanaka, Y.Yanagisawa, A.Yoshida, K.Yoshida, Measurement of Interaction Cross-sections for Neutron-rich Na Isotopes, Acta Phys. Pol. B42, 765 (2011)
6. X.L.Tu, H.S.Xu M.Wang, Y.H.Zhang, Yu.A.Litvinov, Y.Sun, H.Schatz, X.H.Zhou, Y.J.Yuan, J.W.Xia, G.Audi, K.Blaum, C.M.Du, P.Geng, Z.G.Hu, W.X.Huang, S.L.Jin, L.X.Liu, Y.Liu, X.Ma, R.S.Mao, B.Mei, P.Shuai, Z.Y.Sun, H.Suzuki, S.W.Tang, J.S.Wang,

- S.T.Wang, G.Q.Xiao, X.Xu, T.Yamaguchi, Y.Yamaguchi, X.L.Yan, J.C.Yang, R.P.Ye, Y.D.Zang, H.W.Zhao, T.C.Zhao, X.Y.Zhang, W.L.Zhan Direct Mass Measurements of Short-Lived $A=2Z-1$ Nuclides ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se , and ^{71}Kr and Their Impact on Nucleosynthesis in the rp Process, *Phys.Rev.Lett.* 106, 112501-112505 (2011)
7. N.Aoi, S.Kanno, S.Takeuchi, H.Suzuki, D.Bazin, M.D.Bowen, C.M.Campbell, J.M.Cook, D.-C.Dinca, A.Gade, T.Glasmacher, H.Iwasaki, T.Kubo, K.Kurita, T.Motobayashi, W.F.Mueller, T.Nakamura, H.Sakurai, M.Takashina, J.R.Terry, K.Yoneda, H.Zwahlen, Enhanced collectivity in ^{74}Ni , *Phys.Lett. B* 692, 302-306 (2010)
 8. E.Yu.Nikolskii, A.A.Korshennikov, H.Otsu, H.Suzuki, K.Yoneda, H.Baba, K.Yamada, Y.Kondo, N.Aoi, A.S.Denikin, M.S.Golovkov, A.S.Fomichev, S.A.Krupko, M.Kurokawa, E.A.Kuzmin, I.Martel, W.Mittig, T.Motobayashi, T.Nakamura, M.Niikura, S.Nishimura, A.A.Ogloblin, P.Roussel-Chomaz, A.Sanchez-Benitez, Y.Satou, S.I.Sidorchuk, T.Suda, S.Takeuchi, K.Tanaka, G.M.Ter-Akopian, Y.Togano, M.Yamaguchi, Search for ^7H in $^2\text{H}+^8\text{He}$ collisions, *Phys.Rev. C* 81, 064606-064610 (2010)
 9. D. Nagae, T. Ishii, R. Takahashi, M. Asai, H. Makii, A. Osa, T.K. Sato, S. Ichikawa, Y.R. Shimizu, T. Shoji, Lifetime Measurements for the First 2^+ States in $^{162,164}\text{Gd}$ Populated by the Decay of $^{162,164}\text{Eu}$, *AIP Conf. Proc.*, 1224, 156-160 (2010)
 10. P.Zhou, D.Q.Fang, Y.G.Ma, X.Z.Cai, J.G.Chen, W.Guo, X.Y.Sun, W.D.Tian, H.W.Wang, G.Q.Zhang, X.G.Cao, Y.Fu, Z.G.Hu, J.S.Wang, M.Wang, Y.Togano, N.Aoi, H.Baba, T.Honda, K.Okada, Y.Hara, K.Ieki, Y.Ishibashi, Y.Itou, N.Iwasa, S.Kanno, T.Kawabata, H.Kimura, Y.Kondo, K.Kurita, M.Kurokawa, T.Moriguchi, H.Murakami, H.Oishi, S.Ota, A.Ozawa, H.Sakurai, S.Shimoura, R.Shioda, E.Takeshita, S.Takeuchi, K.Yamada, Y.Yamada, Y.Yasuda, K.Yoneda, T.Motobayashi, Measurement of two-proton correlation from the break-up of ^{23}Al , *International Journal of Modern Physics E*, 19 (2010) 957-964
 11. D. Nishimura, M. Fukuda, M. Takechi, M. Mihara, D. Ishikawa, J. Komurasaki, K. Matsuta, R. Matsumiya, T. Kuboki, M. Yoshitake, T. Suzuki, T. Yamaguchi, S. Nakajima, K. Saito, M. Miura, I. Hachiuma, K. Namihira, T. Ohtsubo, Y. Shimbara, T. Watanabe, Y. Ohkuma, T. Izumikawa, K. Tanaka, T. Suda, A. Ozawa, Y. Yasuda, T. Moriguchi, S. Momota, S. Fukuda, S. Sato, M. Kanazawa, A. Kitagawa, Distinction between Proton-Neutron Density Distribution of Halo Nuclei at the Nuclear Surface via Reaction Cross Section, *Nuclear Physics A* 834 (2010) 470c-472c
 12. Subash C.B. Gopinatha, Koichi Awazua, Makoto Fujimaki, Penmetcha K.R. Kumarb and Tetsuro Komatsubara, Optimization of silica surface with nanosize holes for immobilization of biomolecules and analysis of their interactions, *Analytica Chimica Acta*, Volume 680, Issues 1-2, 8 November 2010, Pages 72-78
 13. K. Setoodehnia, A. A. Chen, T. Komatsubara, S. Kubono, D. N. Binh, J. F. Carpino, J. Chen, T. Hashimoto, T. Hayakawa, Y. Ishibashi, Y. Ito, D. Kahl, T. Moriguchi, H. Oishi, A. Ozawa, T. Shizuma, Y. Sugiyama, and H. Yamaguchi, Spins and parities of astrophysically important ^{30}S states from $^{28}\text{Si}(^3\text{He}, n\gamma)^{30}\text{S}$, *Phys. Rev. C* 83, 018803(2011) [4 pages]

14. A. Kim, N.H. Lee, I.S. Hahn, J.S. Yoo, M.H. Han, S. Kubono, H. Yamaguchi, S. Hayakawa, Y. Wakabayashi, D. Binh, H. Hashimoto, T. Kawabata, D. Kahl, Y. Kurihara, Y.K. Kwon, T. Teranishi, S. Kato, T. Komatsubara, B. Guo, G. Bing, W. Liu, Y. Wang, Direct measurement of the $^{14}\text{O}(\alpha, \alpha)^{14}\text{O}$ cross section for astrophysically important $^{14}\text{O} + \alpha$ resonances, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 57, No. 1, July (2010), pp. 40-43
15. Yoshinori Iizuka, Hideki Miura, Shogo Iwasaki, Hideaki Maemoku, Takanobu Sawagaki, Ralf Greve, Hiroshi Satake, Kimikazu Sasa and Yuki Matsushi, Evidence of past migration of the ice divide between the Shirase and Sôya drainage basins derived from chemical characteristics of the marginal ice in the Sôya drainage basin of East Antarctica, *Journal of Glaciology*, Volume 56, Number 197 , pp. 395-404, August 2010.
16. K. Sasa, T. Takahashi, Y. Nagashima, Y. Tosaki, N. Kinoshita, K. Sueki, H. Matsumura, K. Bessho, Y. Matsushi, Accelerator mass spectrometry at the tsukuba 12 MV pelletron tandem accelerator, *Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, Joint Accelerator Conference Website (JACoW)*, 223-225 (2010).
17. Yuki Matsushi, Tsuyoshi Hattanji, Sanae Akiyama, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Keisuke Sueki, and Yukinori Matsukura, Evolution of solution dolines inferred from cosmogenic ^{36}Cl in calcite, *Geology*, Vol.38, 11 1039-1042 (2010).
18. Yuki Tosaki, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, and Yasuo Nagashima, Estimation of groundwater residence time using the ^{36}Cl bomb pulse, *Ground Water*, 2011, doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00795.x.
19. Yuki Tosaki, Norio Tase, Akihiko Kondoh, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi and Yasuo Nagashima, Distribution of ^{36}Cl in the Yoro River Basin, Central Japan, and Its Relation to the Residence Time of the Regional Groundwater Flow System, *Water*, 3, 64-78, 2011.
20. Masashi Imanaka, Shigeo Tomita, Suguru Kanda, Mitsuteru Fujieda, Kimikazu Sasa, Jens Olaf Pepke Pedersen, Hiroshi Kudo, Nanoparticle Formation in $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Ar}$ Mixtures under Irradiation by 20 MeV Protons and Positive Corona Discharge, *J. Aerosol Sci.* 41, (2010) 468-474
21. S. Tomita, M. Murakami, N. Sakamoto, S. Ishii, K. Sasa, T. Kaneko, and H. Kudo, Reduction in the energy loss of 0.5 MeV/atom carbon cluster ions in thin carbon foils, *Phys. Rev. A* 82, (2010) 044901(1-4)
22. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. *Phys. Lett. B*696:328-337,2011
23. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Strange particle production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV with ALICE at the LHC. *Eur. Phys. J. C*71:1594,2011.
24. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. *Phys. Rev. Lett.* 106:032301,2011.

25. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Suppression of Charged Particle Production at Large Transverse Momentum in Central Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Lett. B696:30-39,2011.
26. E. Richardson et al. A Reaction Plane Detector for PHENIX at RHIC. Nucl. Instrum. Meth. A636: 99-107,2011.
27. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Rev. Lett. 105: 252301,2010.
28. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Azimuthal correlations of electrons from heavy-flavor decay with hadrons in p+p and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. Phys. Rev. C83: 044912,2011.
29. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Cross section and double helicity asymmetry for η mesons and their comparison to neutral pion production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV. Phys. Rev. D83: 032001,2011.
30. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Measurement of Transverse Single-Spin Asymmetries for J/psi Production in Polarized p+p Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV. Phys. Rev. D82: 112008,2010.
31. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Cross Section and Parity Violating Spin Asymmetries of W^\pm Boson Production in Polarized $p + p$ Collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV. Phys. Rev. Lett. 106: 062001,2011.
32. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Transverse momentum spectra of charged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC., Phys. Lett. B693: 53-68,2010.
33. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Two-pion Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s}=900$ GeV. Phys. Rev. D82: 052001,2010.
34. S. Esumi, Experimental studies of quark gluon plasma at RHIC. AIP Conf. Proc. 1235: 179-185,2010.
35. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Midrapidity antiproton-to- proton ratio in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured by the ALICE experiment. Phys. Rev. Lett. 105: 072002,2010.
36. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Azimuthal anisotropy of neutral pion production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV: Path-length dependence of jet quenching and the role of initial geometry. Phys. Rev. Lett. 105: 142301, 2010.
37. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), High p_T direct photon and π^0 triggered azimuthal jet correlations and measurement of k_T for isolated direct photons in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV. Phys. Rev. D82: 072001, 2010.

38. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Transverse momentum dependence of meson suppression η suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C82: 011902, 2010.
39. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Measurement of neutral mesons in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV and scaling properties of hadron production. Phys. Rev. D83: 052004, 2011.
40. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Nuclear modification factors of phi mesons in d+Au, Cu+Cu and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C83: 024909, 2011.
41. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ALICE at LHC., Eur. Phys. J. C68: 345-354, 2010.
42. K. Aamodt et al. (Alice collaboration), Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV with ALICE at LHC., Eur. Phys. J. C68: 89-108, 2010.
43. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Elliptic and hexadecapole flow of charged hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. Lett. 105: 062301, 2010.
44. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Trends in Yield and Azimuthal Shape Modification in Dihadron Correlations in Relativistic Heavy Ion Collisions., Phys. Rev. Lett. 104: 252301, 2010.
45. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Transverse momentum dependence of J/psi polarization at midrapidity in p+p collisions at $s^{*}(1/2) = 200$ -GeV. Phys. Rev. D82: 012001, 2010.
46. A. Adare et al. (Phenix Collaboration), Detailed measurement of the e^+e^- pair continuum in $p+p$ and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and implications for direct photon production. Phys. Rev. C81: 034911, 2010.

<学位論文 (修士論文) >

1. 修士 (理学)、石橋陽子 (Ishibashi, Yoko)、核偏極移行反応による不安定核の核偏極生成 (Production of nuclear polarization of unstable nuclei by polarization transfer reactions)
2. 修士 (理学)、大石寛人 (Ooishi, Hiroto)、RIBF における Na 同位体の相互作用断面積測定 (Measurements of interaction cross sections of Na isotopes in RIBF)
3. 修士 (理学)、竹内理将 RHC-PHENIX $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金+金衝突における多粒子相関法を用いた高温高密度 QCD 物質と高横運動量粒子間の相互作用についての研究 (Research on the interaction of high pt particles with QGP using 2+1 correlation in 200GeV Au+Au collisions at RHC-PHENIX)

<学士論文>

1. 学士、物理学類、伊藤慧 (Ito, Satoshi)、不安定核 ^{24}Al のアイソマー状態の核磁気モーメント測定 (Measurement of magnetic moment of isomer state of ^{24}Al)
2. 学士、物理学類、錦織良 (Nishikiori, Ryo)、 ^{12}C 標的における 30MeV の α 粒子散乱 (alpha-particle scattering from ^{12}C in 30 MeV)
3. 学士、物理学類、丹羽崇博 (Niwa Takahiro)、RI ビーム検出のための固体ネオン検出器の開発 (Developments of solid Ne detectors for detection of RI beams)
4. 学士、物理学類、湯浅暁玲 (Yuasa Toshiyuki)、宇宙物理学的に重要な原子核 ^{26}Si における γ 線角分布の測定、(Angular distribution of γ rays on ^{26}Si for astrophysical implication)
5. 学士、物理学類、郡司薫、CERN-PS/SPS のテストビームを用いた LHC-ALICE 実験用電磁カロリメータの性能評価
6. 学士、物理学類、中島朋、波高分析システムを搭載した小型ラドン検出器の開発
7. 学士、物理学類、堀内聖志、RHIC-PHENIX 実験におけるエアロジェル・チェレンコフ検出器と飛行時間測定器を用いた粒子識別能力の評価
8. 学士、物理学類、田中直斗、3次元飛跡検出器のための Flash ADC・FPGA を搭載した高速信号読み出しシステムの試作と評価

<招待講演 (国際会議)>

1. Kimikazu Sasa (Invited talk), Industrial use of accelerator facilities operated by research institutes in Japan, Joint Asian Accelerator Workshop 2010, Pohang, Korea, 29-30 Nov. 2010.

<国際会議発表>

1. K. Sasa, T. Takahashi, Y. Nagashima, Y. Tosaki, N. Kinoshita, K. Sueki, H. Matsumura, K. Bessho, Y. Matsushi, Accelerator mass spectrometry at the tsukuba 12 mv pelletron tandem accelerator, The first International Particle Accelerator Conference (IPAC10) , 23rd to 28th, May, 2010, Kyoto International Conference Center (ICC Kyoto).
2. K. Sasa, Y. Matsushi, Y. Tosaki, T. Takahashi, K. Sueki, N. Kinoshita, K. Kurosumi, T. Amano, J. Kitagawa, K. Horiuchi, H. Matsuzaki and H. Motoyama, ^{36}Cl profiles in the Dome Fuji ice core during the last deglaciation, The Twelfth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-12), Wellington, New Zealand at the Museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa, (Te Papa) on 20 - 25 March 2011.

3. K. Sasa, T. Takahashi, K. Sueki, N. Kinoshita, Y. Tosaki, Y. Matsushi, T. Amano, J. Kitagawa, K. Kurosumi, M. Matsumura, S. Abe, Y. Nagashima, H. Matsumura, Progress on ^{36}Cl AMS with the 12UD Pelletron tandem accelerator at the University of Tsukuba, The Twelfth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-12), Wellington, New Zealand at the Museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa, (Te Papa) on 20 - 25 March 2011.
4. K. Sueki, M. Tamari, T. Amano, J. Kitagawa, K. Sasa, T. Takahashi, Y. Matsushi, Y. Tosaki, K. Kurosumi, Y. Nagashima, N. Kinoshita and H. Matsumura, Isotope ratios of $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ in surface soils at the equal-latitude in Japan, The Twelfth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-12), Wellington, New Zealand at the Museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa, (Te Papa) on 20 - 25 March 2011.
5. J. Kitagawa, T. Amano, K. Sueki, K. Sasa, T. Takahashi, N. Kinoshita, Y. Matsushi, H. Matsuzaki, Intercomparison study with radionuclides ^{129}I , ^{36}Cl , and ^{137}Cs in soils, The Twelfth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-12), Wellington, New Zealand at the Museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa, (Te Papa) on 20 - 25 March 2011.
6. Kazuna Kurosumi, Kimikazu Sasa, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi, Norikazu Kinoshita, Takahiro Amano, Junichi Kitagawa, Masumi Matsumura, Yuki Matsushi, Yuki Tosaki, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Hideaki Motoyama, A fluctuation of ^{36}Cl depositional flux recorded in an Antarctic ice core: implication to the enhanced cosmic-ray intensity around 11 ka, The Twelfth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-12), Wellington, New Zealand at the Museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa, (Te Papa) on 20 - 25 March 2011.
7. H. Tsuchida, S. Tomita, K. Nishimura, R. Murakoshi, M. Naitoh, K. Sasa, S. Ishii, and A. Itoh, Energy distribution of MeV-energy atomic and diatomic carbon ions transmitted through a tapered glass capillary, 24th International Conference on Atomic Collisions in Solids (ICACS- 24), Kraków, Poland, July 18-23, 2010.
8. K. Setoodehnia, A.A. Chen, T. Komatsubara, S. Kubono, D.N. Binh, T. Hahshimoto, T. Hayakawa, Y. Ishibashi. Y. Ito, D. Kahl, T. Moriguchi, H. Ooishi, A. Ozawa, T. Shizuma, Y. Sugiyama, H. Yamaguchi, Study of astrophysically important resonant states in ^{30}S using the $^{28}\text{Si}(^3\text{He}, n\gamma)^{30}\text{S}$ reaction, The 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, July 2010, Heidelberg,
9. Y. Miake, "Exploitation of hard EM probes and Jets to study the QGP with LHC-ALICE", Workshop of France Japan Particle Physics laboratory (FJPPL), 2010/6/15-17, LAPP, Annecy, France
10. M. Shimomura, "Systematic study of v_2 at 62.4 and 200 GeV in Cu+Cu and Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX" Hot Quarks 2010, June 21-26, 2010, La Londe Les Maures, French Riviera,
11. Y. Miake, "Nuclear Physics at Univ. of Tsukuba", International Symposium on Nuclear Physics in Asia, 14-15 October 2010, Beihang University, Beijing, China.

12. S. Esumi, "v3 measurement at RHIC-PHENIX", 27th Winter Workshop on Nuclear Dynamics (WWND2011) Feb. 6-13, 2011, Winter Park Colorad, USA,
13. Yasuo Miake "ALICE activities at Tsukuba", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries (2011), March 7-8, 2011, Yonsei University, Seoul, Korea
14. ShinIchi Esumi "Elliptic and triangular flow measurements", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries (2011), March 7-8, 2011, Yonsei University, Seoul, Korea
15. Maya Shimomura "ALICE v2 and RHIC v2 results", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries (2011), March 7-8, 2011, Yonsei University, Seoul, Korea

<日本物理学会発表>

1. 鈴木宏, 新井一郎, 藤縄雅, 福西暢尚, 後藤彰, 菊池崇志, 久保野茂, 森口哲朗, 長江大輔, 大坪隆, 小沢頭, 櫻井博儀, 鈴木健, 若杉昌徳, 安田裕介, 山口貴之, 山口由高, 矢野安重, 理研 稀少 RI リングの粒子軌道計算, 日本物理学会 2010年 秋季大会
2. 石橋陽子, Production of nuclear polarization for unstable nuclei via polarization transfer reaction, 日本物理学会 2010年 秋季大会
3. 中條達也 「ALICE 実験測定器の現状」, シンポジウム「LHC 加速器 ALICE 実験によるハドロン物理の幕開け」 日本物理学会 2010年秋季大会 (2010年9月11日-9月14日) (九州工業大学戸畑キャンパス)
4. 中條達也 "Study of di-jet properties in p+p collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV by the LHC-ALICE experiment" 日本物理学会 2010年秋季大会 (2010年9月11日-9月14日) (九州工業大学戸畑キャンパス)
5. 佐野正人 "Measurement of jet property via di-hadron correlation in p+p collisions at LHC-ALICE" 日本物理学会 2010年秋季大会 (2010年9月11日-9月14日) (九州工業大学戸畑キャンパス)

<国内学会発表>

1. 森口哲朗, Measurement of the reaction cross section for ^{11}Li using Solid Hydrogen Target, CNS EFES 10
2. 森口哲朗, RI ビーム粒子識別検出器の開発, 平成 21 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会
3. 笹公和, 高橋努, 戸崎裕貴, 末木啓介, 木下哲一, 天野孝洋, 北川潤一, 黒住和奈, 松村万寿美, 安部聡美, 長島泰夫, 松四雄騎, 別所光太郎, 松村宏, 筑波大学 AMS における CI-36 を用いた地球環境科学研究, 第 12 回 AMS シンポジウムプログラム, 2010 年 5 月 23 -24 日, 桐生市民文化会館.
4. 笹公和, 田岸義宏, 檜本洋, 工藤博, 喜多英治, 先端研究施設共用促進事業における筑波大学マルチタンデム加速器施設の学術・産業共用への取り組み, 第 12 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, 2010 年 6 月 16 - 17 日, 東京工業大学.

5. 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, 工藤 博, 喜多 英治, 筑波大学タンデム加速器施設の現状, 第 23 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 2010 年 7 月 2 日 (金) ~ 7 月 3 日 (土), 東京大学 武田ホール.
6. 笹 公和, 石井 聡, 工藤 博, 富田成夫, 1 MV タンデトロン加速器による MeV エネルギー原子クラスター加速、第 7 回日本加速器学会年会, 2010 年 8 月 4 日 (水)~6 日 (金), 姫路市文化センター.
7. 笹 公和、筑波大学マルチタンデム加速器施設 (UTTAC) の現状報告、第 7 回日本加速器学会年会, 2010 年 8 月 4 日 (水)~6 日 (金), 姫路市文化センター.
8. 笹 公和, 木下 哲一, 松村 万寿美, 高橋 努, 末木 啓介, 長島 泰夫, 大浦 泰嗣、極微量放射性核種 ^{41}Ca の加速器質量分析法の開発、日本原子力学会「2010 年秋の大会」, 2010 年 9 月 15-17 日, 北海道大学
9. 笹公和、高橋努、末木啓介、木下哲一、天野孝洋、北川潤一、黒住和奈、黄穎斯、西村朋紘、沈洪涛、松村万寿美、安部聡美 (筑波大学)、戸崎裕貴 (産業技術総合研究所)、松四雄騎 (京都大学)、大浦泰嗣 (首都大学東京)、松村宏 (高エネルギー加速器研究機構)、筑波大学 AMS システムの現状 (2010), 第 13 回 AMS シンポジウム (JAMS-13) , 2011 年 1 月 28 日 (金) -29 日 (土) , ホテルキャッスル (山形大学)
10. 笹公和、高橋努、末木啓介、木下哲一、天野孝洋、北川潤一、黒住和奈、松村万寿美 (筑波大学)、松崎浩之 (東京大学) , 浜中芳文、山崎俊輔、大浦泰嗣、海老原充 (首都大学東京)、石質隕石中の ^{36}Cl 生成率、第 13 回 AMS シンポジウム (JAMS-13) , 2011 年 1 月 28 日 (金) -29 日 (土) , ホテルキャッスル (山形大学)
11. K. Sasa (University of Tsukuba), J. Shan (China Institute of Atomic Energy), Development of a New AMS Method for ^{126}Sn , H. Shen (Guangxi normal univ., China), M. He (China Institute of Atomic Energy), 第 13 回 AMS シンポジウム (JAMS-13) , 2011 年 1 月 28 日 (金) -29 日 (土) , ホテルキャッスル (山形大学)
12. 三明康郎 「原子核実験から (コメント)」、KEK 測定器開発室プログラム検討会、2010 年 4 月 20 日、KEK
13. M. Shimomura, "KT and quark number scaling of v_2 " Exotics from Heavy Ion Collisions, May 17-30, 2010, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan
14. 三明康郎 「筑波大-KEK 連携による加速器開発」、KEK 筑波連携事業キックオフ・シンポジウム、2010 年 5 月 26 日、筑波大学
15. 三明康郎 「RHIC 実験のこれまでの成果と今後の展望」、新学術領域研究 (研究領域提案型)「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」計画研究 A01 班「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」第 3 回研究会、筑波大学計算科学研究センター、2010 年 7 月 7 日
16. 三明康郎 「宇宙の歴史を探る」ビッグバンからブラックホールまで (原子核パート)、平成 22 年度筑波大学教員免許状更新講習、選択講習 C「教養の新たな世界を体験する」、筑波大学、2010 年 8 月 5 日

17. 江角晋一, "Recent jet correlation analysis at RHIC and LHC", 第10回 Heavy Ion Cafe, 2010年10月30日 東京大学理学部(本郷)
18. 中條達也, 「高エネルギー重イオン衝突で探るビックバン直後の宇宙」 筑波大学大学院物理学セミナー, 2010年11月10日 筑波大学
19. T. Todoroki, "Long range rapidity correlations in high energy nucleus collision at RHIC and LHC", 11st Heavy Ion Pub Feb. 18, 2011, Osaka University

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究(B)(2009~2012)「加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確立」
研究代表者: 笹公和、研究分担者: 末木啓介、戸崎裕貴、別所光太郎、松村宏
2010年度: 2,100千円(間接経費 630千円)
2. 基盤研究(B)(2008~2011)「花崗岩深部地下水に対する流体包有物組成の影響に関する研究」
研究代表者 黒澤正紀、研究分担者 笹公和、小松原哲郎、安間了、辻村真貴
2010年度: 1,200千円(間接経費: 360千円)
3. 基盤研究(A)(2010-2012)「アイスコアに刻まれた十~千年スケールの宇宙線強度変動と地球環境変動」
研究代表者 松崎浩之、研究分担者 笹公和、堀内一穂、横山祐典、柴田康行、村松康行、本山秀明、川村賢二
交付金(直接経費) 15,800千円(間接経費) 4,740千円
研究者分担金 笹公和、2010年度: 2,400千円(間接経費: 720千円)
4. 基盤研究(C)(2009-2011)「銀河系ガンマ線源A1-26の天体起源の解明」
研究代表者 小松原哲郎、連携研究者 早川岳人、静間俊行
2010年度 600,000円
5. 基盤研究S(平成20-23年)「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」
研究代表者 三明康郎
6. 文部科学省の特別教育研究経費(平成19年度開始、23年度からは一般経費に切り替え)「宇宙史一貫教育プログラム」
研究代表者 三明康郎

<外部資金取得状況>

1. 平成 22 年度公益財団法人クリタ水・環境科学振興財団国内研究助成事業 「長半減期核種 Cl-36 を用いた地下水滞留時間評価法の研究」
研究代表者 笹 公和
研究期間：2010 年 10 月 - 2011 年 9 月、研究経費：650 千円

2. 筑波大学・KEK 連携事業「物質—量子ビーム融合領域」素粒子原子核分野 (加速器科学) 「キッカー電磁石システム等の開発」
笹 公和、小沢顕
2,000 千円

3. 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) 7,500 千円 (2010 年度)

4. マスタープラン対応設備整備経費、「ヘリウム負イオン源」
小松原 哲郎、笹 公和
平成 22 年度 14,000,000 円

5. 三明康郎 日米科学技術協力事業 「ブルックヘブン国立研究所における重イオン加速器を用いた実験」

VII – 1 . 非平衡統計物理

教授 有光 敏彦
助教 吉田 恭
博士後期課程大学院生 小松崎 慎人, 武智 公平,
大日向 正志 (Salerno 大 (伊) 留学, 2010.10.1~2011.9.30)
博士前期課程大学院生 阿部 朝彦, 程 コウ

【1】 間欠性を呈する流動系の非平衡統計物理

(1) 充分発達した乱流のマルチフラクタル確率密度関数理論による解析

(武智 (院生), 有光直子 (横浜国大), 有光) 論文 [1, 2, 4], 解説・紀要 [1], 講演 [2, 5, 8, 12]

充分発達した乱流では, エネルギー散逸率や速度差などの PDF に裾を引くことが知られている。その裾野部分には, 乱流の間欠性に起因する「乱流のコヒーレントな運動」が反映する。中心部分には, このコヒーレントな運動に纏わり付く「乱流に特有な揺らぎ」の情報が含まれている。マルチフラクタル密度関数理論 (MPDFT) では, 裾引き PDF を解析する理論表式が導出され, これにより, 上記の情報を高精度で抽出することが可能となった。MPDFT (Multifractal Probability Density Function Theory) 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, 古典乱流および量子乱流などで得られる裾の広い各種確率密度関数 (PDF) の高精度解析を可能にした理論体系である。

充分発達した乱流の間欠性は, Navier-Stokes 方程式が有するスケール不変性に基づく自己相似性の顕れでもある。乱流のアンサンブル理論の基礎となるカスケード・モデルにおいては, 大きなスケールで注入されたエネルギーによってサイズ l_{in} の渦が生み出され, この渦は流れに沿って移動する過程でサイズ $l_{in} \delta^{-1}$ の渦に分裂し, 次々に小さな渦 (サイズ $l_n = l_{in} \delta^{-n}$, $n = 1, 2, 3, \dots$) が生み出されると考える。ただし, $\delta (> 1)$ はズーム率を表す。大小様々なスケールの渦の存在は, Navier-Stokes 方程式の持つスケール不変性により, 速度場などの物理量に特異性をもたらす。MPDFT では, その特異性が, 乱流における間欠現象を司るとするのである。

そ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 l_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, エントロピー指数 q と間欠性を呈する物理量に付随した特異性指数 α を関連付けるスケーリング関係式は

$$\frac{1}{1-q} = \frac{\ln \delta}{\ln 2} \left(\frac{1}{\alpha_-} - \frac{1}{\alpha_+} \right) \quad (1)$$

の形に拡張すべきであることが明らかになった。ただし, α_- と α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は, 注目している物理量のマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ のゼロ点である。この新しいスケーリング関係式により, 乱流の新しい解釈への可能性が見えてきた (それについては, 以下の項目 (2), (3) を参照のこと)。なお, ズーム率が $\delta = 2$ の場合には, (1) は従来採用していた Lyra-Tsallis 型スケーリング関係式に還元する。

現時点で世界一のサイズ 4096^3 大規模乱流 DNS データを有する名古屋大学の金田・石原グループから DNS スナップショット速度場生データの提供を受け, それよりエネルギー散逸率 PDF とエネルギー輸送率 PDF を抽出した。それらの PDF を MPDFT で得られた理論的 PDF により解析し, 新

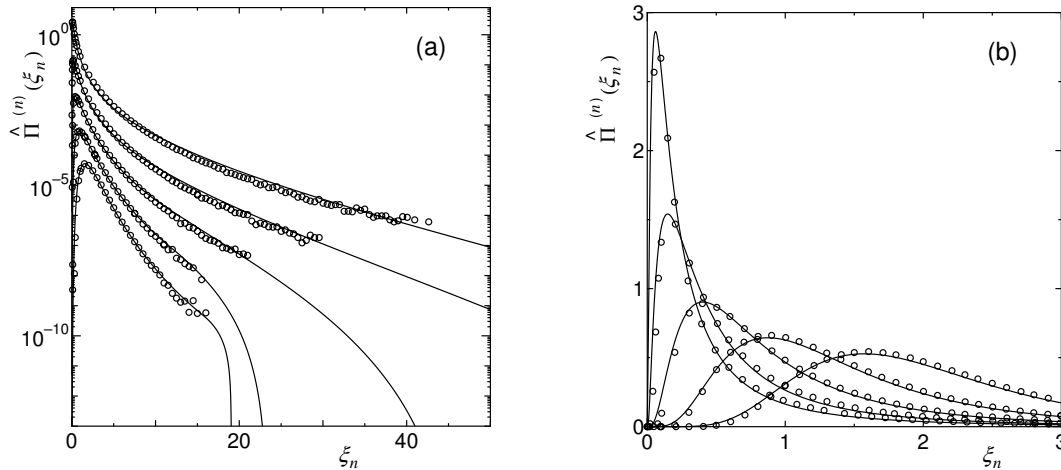


図 1: The PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 3$ on (a) log and (b) linear scale in the vertical axes. For better visibility, each PDF in (a) is shifted by -1 unit along the vertical axis. Open circles are the experimental PDFs for $r/\eta = 6.57, 21.9, 65.7, 197, 591$ from the smallest value (top) to the largest value (bottom) where r corresponds to ℓ_n . Solid lines represent the curves given by the present theory with the intermittency exponent $\mu = 0.260$.

しいスケール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った [1, 2]。

気象研の毛利等による乱流風洞実験で測定された風速時系列生データの提供を受け、それから速度揺らぎ PDF とエネルギー散逸率 PDF を算出した。これらの PDF を利用して、物理量を抽出する際の距離の δ^{-n} 倍 (δ は、正の実数) における一連の PDF が、如何なる δ に対しても無矛盾かつ系統的に解析できることを示した [4]。また、PDF の裾部分と中心部分の有する情報を抽出し、 4096^3 大規模乱流 DNS で得られた情報との比較検討を進めた。図 1 に、 $\delta = 3$ の場合に得られた一連のエネルギー散逸率 PDF (黒点) と、それらを MPDFT で解析した PDF (実線) を載せた。 η は、Kolmogorov 長である。図 (a) は縦軸を対数目盛でとっており、PDF の裾野を見やすくしてある。この部分は、間欠性の起源である特異性のマルチフラクタル分布を反映している。図 (b) は縦軸を線型目盛でとり、PDF の中心部分を見易くした。この部分は、スケール不変性を破る散逸項の寄与を反映する。この乱流 DNS 系の間欠性指数が $\mu = 0.260$ であることが、何れの δ での解析からも得られ、実際の風洞乱流実験データにおいても、新しいスケール関係式の検証に成功した。さらに、慣性領域より遥かに広い範囲のスケールまで、特異性がスケール則を満たしていることを見出した。例えば、 $\tilde{n} = -\ln(\ell_n/\eta) + \ln(\ell_{in}/\eta)$ はエネルギー・カスケードモデルにおけるステップ数に対応し、それが δ に依存せず、また完成領域より広い領域でスケール則を満たしていることが分かった (図 2)。

以上の解析を進めるとともに、その解析結果を踏まえて、MPDFT による乱流可視化に関する情報収集を行い、可視化画像解析への準備も行った。

(2) δ^∞ 超安定周期軌道のベキ的不安定性と特異性スペクトルの解析

(本池巧 (湘北短大), 有光) 解説・紀要 [2], 講演 [3, 6, 9, 13]

Logistic 写像等の 1 次元離散力学系では、カオス状態となる制御パラメータ領域には、 δ 安定周期軌道が存在する δ 周期の窓がある。 δ 周期の窓の中には、 δ^k 周期の窓が無限に入れ子になっている。我々は、 δ 周期の窓の中に存在する超安定周期軌道 (SSPO) を高精度で同定する数値計算プログラムの開発により、 $K \gg 1$ に対する δ^K SSPO を正確に求めることに成功した。その結果、 δ^K SSPO

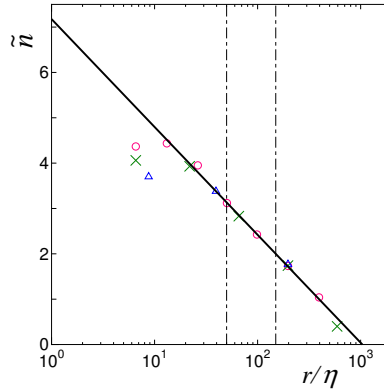


図 2: The relation between \tilde{n} and r/η which is extracted from the PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 2$ (open circles), for $\delta = 3$ (crosses) and for $\delta = 5$ (open triangles). The line is $\tilde{n} = -2.37 \log_{10}(r/\eta) + 7.18$. Here, r corresponds to ℓ_n . Note that the inertial range is the region between the vertical dash-dotted lines.

は、その軌道点を適切に分類することで、 δ スケール・コントロール集合と同等な階層構造を持ち、時刻 $i = \delta^k$ に於ける累積軌道拡大率 ε_i が、 $\varepsilon_i \sim i^{1/(1-q)}$ と冪的に増大することが明らかとなっている。

今年度は、 δ^K SSPO の軌道点 z_i に於ける写像関数の傾き $|L'(z_i, \mu)|$ の構造および軌道点の時刻と δ スケール・コントロール集合の階層構造の関係の詳細解析を行った。その結果、 δ^K SSPO の各軌道点での写像関数の傾きは、ほぼ同じ値を持つ点列が $(\delta - 1)$ 本ずつグループを成し、各グループが (対数スケールで) 等間隔に並ぶ構造を持つことが明らかとなった (図 3(a))。更に、 δ スケール・コントロール集合の階層構造より間欠性が顕著となる軌道点を抽出した結果、この領域は冪指数 $1/(1 - q)$ がスケーリング関係式

$$\frac{1}{1 - q} = \frac{\ln \delta}{\ln(2 - 1/\delta)} \left(\frac{1}{\alpha_-} - \frac{1}{\alpha_+} \right) \quad (2)$$

に従うことが明らかとなった (図 3(b))。ただし、 α_{\pm} ($\alpha_- < \alpha_+$) は δ^K SSPO のマルチフラクタルスペクトル $f(\alpha)$ の零点。

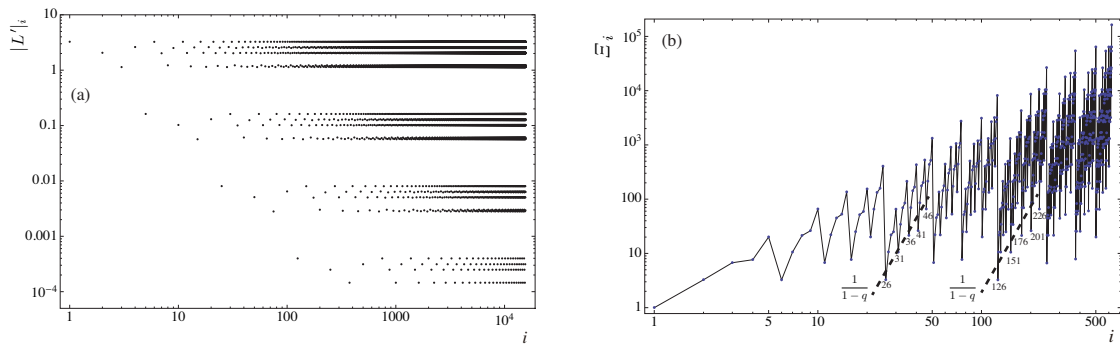


図 3: $\mu = 1.6319266540998245643564591350247554367783851436151$ における 5^4 SSPO の各時刻の軌道点に於ける写像関数の傾きの絶対値 $|L'|_i$ 。四本の点列が等間隔に並ぶ。(b) 軌道間隔変化率 ε_i に於ける間欠性が顕著に現れる軌道点が時刻で示されている。この領域の軌道点が冪的に増大することが点線で示されている。

(3) δ^∞ 不安定周期軌道のベキ的不安定性と Ljapunov 指数

(小松崎 (院生), 本池巧 (湘北短大), 有光) 解説・紀要 [3], 講演 [4, 7, 10, 14]

新しいスケーリング関係式 (1) は、『十分発達した乱流は, δ^∞ 不安定周期軌道に基づく δ スケール・カントール集合の集合体である』という新しい解釈が可能であることを示唆している。そこで, ロジスティック写像 (パラメータ μ) における, δ^∞ 不安定周期軌道 (USPO) の振る舞いを解析した。その結果, 充分発達したカオス状態での USPO は, 「吹き寄せ」のため, 超安定周期軌道 (SSPO) が持つ δ スケール Cantor 集合とは見た目が異なるが, そのトポロジカルな構造は同一の階層構造を有することが分かった。Cantor 集合第 k 階層の最小島の長さ $I_1^{(k)}$ は, 吹き寄せにより, 充分発達したカオス状態から SSPO の近傍までの広い範囲で激しい k 依存性を呈する。 $I_1^{(k)}$ の詳しい解析の結果, δ^∞ USPO の Ljapunov 指数 λ の μ 依存性に対するコンパクトな表式を見出した。さらに, 超安定周期軌道から充分発達したカオス状態に到るパラメータ μ の領域で, Ljapunov 指数 λ が,

$$\lambda(\delta, \bar{\mu}) = \ln(1 + \bar{\mu}^{1/\delta}), \quad \bar{\mu} = \frac{\mu - \hat{\mu}_K^{(\delta)}}{\tilde{\mu}_K^{(\delta)} - \hat{\mu}_K^{(\delta)}} \quad (3)$$

で与えられることを見出した。ただし, $\hat{\mu}_K^{(\delta)}$ は δ^K 超安定周期軌道を与えるパラメータであり, $\tilde{\mu}_K^{(\delta)}$ は充分発達したカオス状態を与えるパラメータである (ロジスティック写像では, $\tilde{\mu}_K^{(\delta)} = 2$ である)。なお, この解析を可能にしたのは, 記号力学を駆使して, δ^K USPO ($K \gg 1$) の軌道の高精度同定の実現に成功したからである。

(4) 極性流体としての粉粒体流の構成方程式

(武智 (院生), 吉田, 有光) 論文 [3] 講演 [15]

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回転速度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, 一様せん断率の速度場, 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。粉粒体の体積分率 ν が小さい場合 ($\nu = 0.1$), シミュレーション結果は Lun による運動論的理論と整合することが示された。また $\nu = 0.7$ の高密度で応力への衝突による寄与が運動論的寄与を凌駕するようになってもなお, 運動論的理論による構成方程式の見積もりが有効であることが示された。更に密度を上げてジャミング転移点に近い密度 $\nu = 0.8$ になると, シミュレーションと運動論的理論の結果に乖離が生じることが明らかになった。比較的密な粉粒体流においては, 金谷理論が有効であることが期待されたが, (i) 散逸関数の動摩擦係数依存性, (ii) 散逸関数から構成関係式への分解方法, の 2 点において, $\nu = 0.8$ の本シミュレーション結果と金谷理論は整合しないことが示された。従って, 粉体流でジャミング転移に近い体積分率の場合には, 運動論における互いに独立な短時間衝突過程とも, 金谷理論における接触点での 2 粒子の表面速度差が維持される長時間接触過程とも異なる粒子間相互作用の描像が必要であることが, 示唆された。

(5) 量子流体乱流の統計解析

(吉田) 講演 [11]

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

我々の研究で、GP 方程式の数値シミュレーションを行い、相互作用エネルギースペクトルについて $k^{-3/2}$ (k は波数) の巾則が観測されている。

本年度の研究では、GP 方程式に完結近似の解析手法を適用した。完結近似の手法、特に Lagrange 変数に基づくその方法は、古典流体において実験とも整合する Kolmogorov のエネルギースペクトルを導くことが知られており、我々の研究でも、既に一様剪断平均流を持つ乱流、電磁流体乱流などに完結近似を適用しスペクトルを求めてきた。GP 方程式は NS 方程式と基本的な場の変数や非線形相互作用の形が異なり、完結近似の手法は自明ではないが、本研究ではオーダーパラメタ場の 2 点相関関数、2 点応答関数で閉じた式が導けた。この式が数値シミュレーションでの $k^{-3/2}$ の巾則と整合するかどうかの精査は今後の課題である。

【2】散逸場の量子論，量子情報物理

(1) NETFD における Bloch 表現と量子ゲート

(有光直子 (横浜国大), 有光) 講演 [1]

Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics (NETFD) の体系 (1984) では非平衡量子散逸系が正準演算子形式 (量子力学や場の量子論と同じ形式) で扱え、散逸過程にある物理量を真空期待値として求められる。この体系は、量子系確率微分方程式 (量子確率 Liouville 方程式, 量子 Langevin 方程式) も取り入れる形で、一貫した正準演算子形式の体系として拡張定式化された (1990)。

NETFD の体系を駆使して、量子情報物理に関わる問題 (主に、量子コヒーレンスと散逸の関わるダイナミカルな問題) への応用を進めている。量子通信や量子計算を実現するためには量子もつれ状態 (量子エンタングル状態) を駆使するが、それが散逸の影響で時間と共に如何に壊されるかを考慮に入れて、これまで量子力学のレベルで開発された手法や概念を検討し直す必要がある。

その一環として、NETFD における NETFD の Bloch 表現を導入し、その Bloch ベクトルとの関連を明らかにすると共に、各種量子ゲートに対応するユニタリー演算子を書き下した。

(2) 連続量量子テレポーテーション

(大日向 (院生), 北島佐知子 (お茶大), 有光, 吉田) 論文 [5]

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、得られて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、フィデリティーにより評価される。

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 r が有限), Alice と Bob が共有するエンタングル状態は不完全である。Alice が実施するホモダイン測定状態も、スクイーズド状態を利用して作られたものと仮定すると、やはりスクイーズド状態が不完全であるため (スクイージング・パラメータ r' が有限), 測定量演算子 (位置の差および運動量の和) の固有状態にならない。従って、Alice の得る測定値に量子的不確定さが入り込む。これらの不完全性 (スクイージング・パラメータ r と r' の値が有限であること) が Bob が手にする出力状態に与える影響を、NETFD の演算子代数計算を駆使して調べた。その結果、「Alice と Bob 間のエンタングル状態の不完全さの程度 r とホモダイン測定の不完全さの程度 r' の値の間に $r' > r$ が成立するとき、フィデリティー $F(r, r'; \kappa = 0, \kappa' = 0)$ が最も良い値を与える」ことが分かった。さらに、エンタングル状態や測定状態に外界の影響 (それぞれ、散逸による緩和率

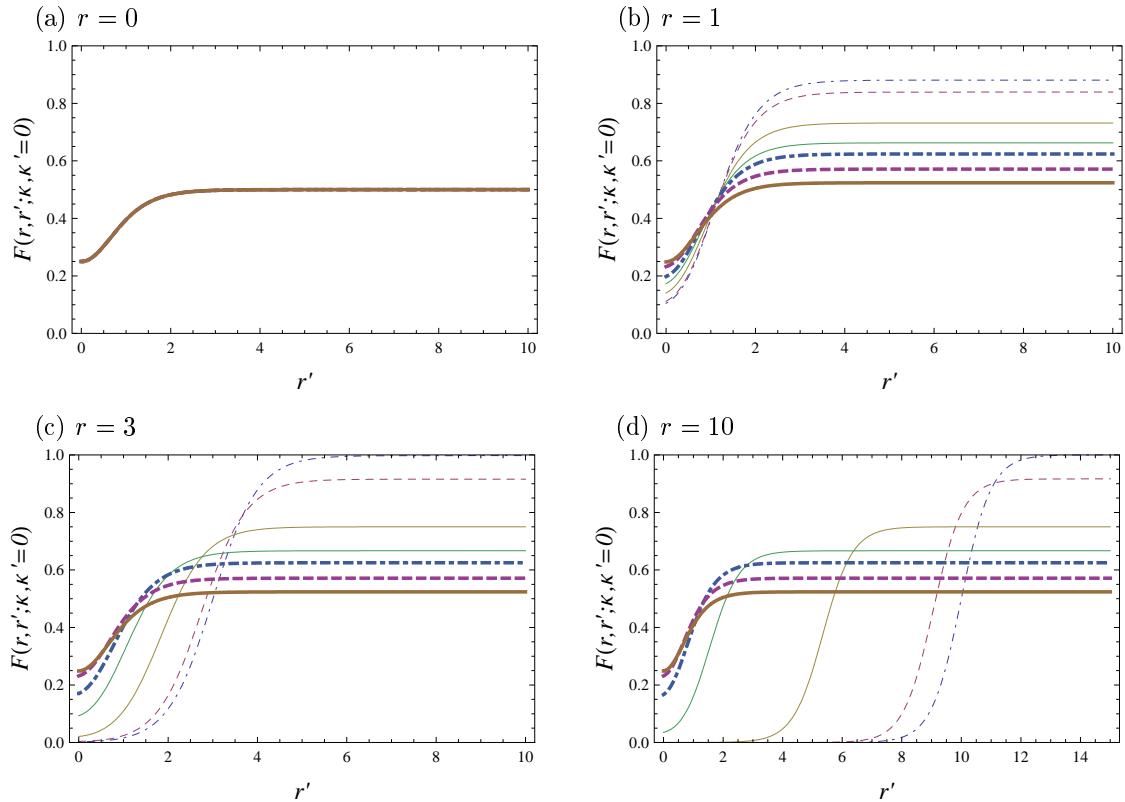


図 4: The r' -dependence of the fidelity $F(r, r'; \kappa, \kappa' = 0)$ for the cases (a) $r = 0$, (b) $r = 1$, (c) $r = 3$ and (d) $r = 10$. In each figure, the lines are for $\kappa/\chi = 0$ (a dashed-dotted line), $\kappa/\chi = 0.1$ (a dashed line), $\kappa/\chi = 0.5$ (a thin solid line), $\kappa/\chi = 1$ (a solid line), $\kappa/\chi = 1.5$ (a thick dashed-dotted line), $\kappa/\chi = 3$ (a thick dashed line) and $\kappa/\chi = 10$ (a thick solid line). Here, $r = \chi t_0$, $r' = \chi' t_0$. χ (χ') and κ (κ') are, respectively, the squeezing parameter and the dissipation rate related to the entangled state (the observing state).

κ や 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 $F(r, r'; \kappa, \kappa')$ の振る舞いを詳細に調べた。例として, $F(r, r'; \kappa, \kappa' = 0)$ の r' 依存性が図 4 に掲げている。

【3】 研究・教育成果の社会への還元・奉仕活動

(1) 雑誌編集委員 (有光) 社会還元等 [1, 2]

1. 日本応用物理学会欧文誌 (JJAP) の編集委員 (Ei) を務めた。
2. ウクライナ国科学アカデミー凝縮系物理学研究所出版の学術雑誌「Condensed Matter Physics」の編集委員を務めた。

(2) 研究集会代表者 (吉田) 社会還元等 [3]

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象および非平衡系の多様性と普遍性」研究代表者を務めた。

(3) 原発事故をうけて乱流拡散についての解説 (吉田) 解説・紀要 [4]

3月の福島第一原子力発電所事故に関連して、汚染物質の乱流拡散についての解説をウェブページに公開した。

< 論文 >

- [1] T. Arimitsu and N. Arimitsu: “Analysis of PDFs for energy transfer rates from 4096³ DNS — Verification of the scaling relation within MPDFT —”, J. of Turbulence **12** (2011) 1–25.
- [2] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Verification of the scaling relation within MPDFT by analyzing PDFs for energy dissipation rates of 4096³ DNS”, Physica A **390** (2011) 161–176.
- [3] K. Takechi, K. Yoshida and T. Arimitsu: “Constitutive equations for granular with uniform mean shear and spin fields”, Cond. Mat. Phys. **14** (2011) 13401:1–22.
- [4] N. Arimitsu, T. Arimitsu and H. Mouri: “Experimental test of multifractal PDF theory with the help of turbulence in a wind tunnel”, (2011) in preparation to submit.
- [5] S. Kitajima, M. Obinata, T. Arimitsu and K. Yoshida: “Quantum teleportation for continuous variables via an imperfect entangled state and an imperfect measurement with environment effects”, (2011) in preparation to submit.

< 解説・紀要 >

- [1] 有光直子, 有光敏彦: 「マルチフラクタル確率密度関数 (PDF) 理論による乱流 PDF の解析」, 数理解析研究所講究録 (2011) submitted.
- [2] 本池巧, 有光敏彦: 「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」, 数理解析研究所講究録 (2011) submitted.
- [3] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦: 「 n^∞ 不安定周期軌道の階層構造の解析」, 数理解析研究所講究録 (2011) submitted.
- [4] 吉田 恭: 「汚染物質の乱流拡散について」, http://www.px.tsukuba.ac.jp/home/tcm/kyoshida/turb_diff_110330.pdf (2011).

< 講演 >

- [1] T. Arimitsu and N. Arimitsu: “Non-equilibrium Thermo Field Dynamics and its Application to Quantum Information”, Workshop on Quantum Algorithms, Computational Models and Foundations of Quantum Mechanics, 2010年7月23日–25日, University of British Columbia, Vancouver, Canada
- [2] 有光直子, 有光敏彦: 「風洞乱流のマルチフラクタルPDF理論による解析 II」, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月, 大阪府立大学, 大阪
- [3] 本池巧, 有光敏彦: 「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造 III」, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月, 大阪府立大学, 大阪
- [4] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦: 「十分発達したカオス領域に於ける不安定周期軌道の階層構造と不安定性の解析」, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月, 大阪府立大学, 大阪
- [5] 有光直子, 有光敏彦, 毛利英明: 「MPDFTによる風洞乱流PDFの解析」, 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2010年11月11日–13日, 九州大学応用力学研究所, 福岡

- [6] 本池巧, 有光敏彦:「力学系における n^∞ 周期軌道のマルチフラクタル構造と間欠性」, 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2010年11月11日-13日, 九州大学応用力学研究所, 福岡
- [7] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦:「十分発達したカオス領域における不安定周期軌道の階層構造と不安定性の解析」, 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2010年11月11日-13日, 九州大学応用力学研究所, 福岡
- [8] 有光直子, 有光敏彦:「マルチフラクタル確率密度関数(PDF)理論による乱流PDFの解析」, 共同研究集会「乱流研究 次の10年:乱流の動的構造の理解へ向けて」, 2011年1月12日-14日, 京都大学 数理解析研究所, 京都
- [9] 本池巧, 有光敏彦:「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」, 共同研究集会「乱流研究 次の10年:乱流の動的構造の理解へ向けて」, 2011年1月12日-14日, 京都大学 数理解析研究所, 京都
- [10] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦:「 n^∞ 不安定周期軌道の階層構造の解析」, 共同研究集会「乱流研究 次の10年:乱流の動的構造の理解へ向けて」, 2011年1月12日-14日, 京都大学 数理解析研究所, 京都
- [11] (招待講演) Kyo Yoshida: 「Anisotropic spectrum of homogeneous turbulent shear flow」, State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics Seminar, 2011年3月, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, China.
- [12] 有光直子, 武智公平, 有光敏彦, 金田行雄, 石原卓:「 4096^3 乱流のマルチフラクタル密度関数理論による解析」, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011年3月25日-28日, 新潟大学, 新潟(東関東大震災のため中止となったが, 概要集原稿を投稿しているものについて, 公式に講演発表した扱いとなった。)
- [13] 本池巧, 小松崎慎人, 有光敏彦:「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造IV」, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011年3月25日-28日, 新潟大学, 新潟(東関東大震災のため中止となったが, 概要集原稿を投稿しているものについて, 公式に講演発表した扱いとなった。)
- [14] 小松崎慎人, 本池巧, 有光敏彦:「十分発達したカオス領域における不安定周期軌道の階層構造と不安定性の解析II」, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011年3月25日-28日, 新潟大学, 新潟(東関東大震災のため中止となったが, 概要集原稿を投稿しているものについて, 公式に講演発表した扱いとなった。)
- [15] 武智公平, 吉田恭, 有光敏彦:「一様平均シア・スピン場の下での粉粒体の構成方程式」, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011年3月25日-28日, 新潟大学, 新潟(東関東大震災のため中止となったが, 概要集原稿を投稿しているものについて, 公式に講演発表した扱いとなった。)

< 社会還元等 >

- [1] 有光敏彦: Japanese Journal of Applied Physics, 編集委員
- [2] 有光敏彦: Condensed Matter Physics (The Institute for Condensed Matter Physics on the National Academy of Science of Ukraine), 編集委員
- [3] 吉田恭: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象および非平衡系の多様性と普遍性」研究代表者, 2009年1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】物質中のディラックフェルミオンとしてのグラフェンの研究：論文 [1–8]，講演 [3–5, 7, 10, 12–15, 17, 18, 20, 21, 23–27]

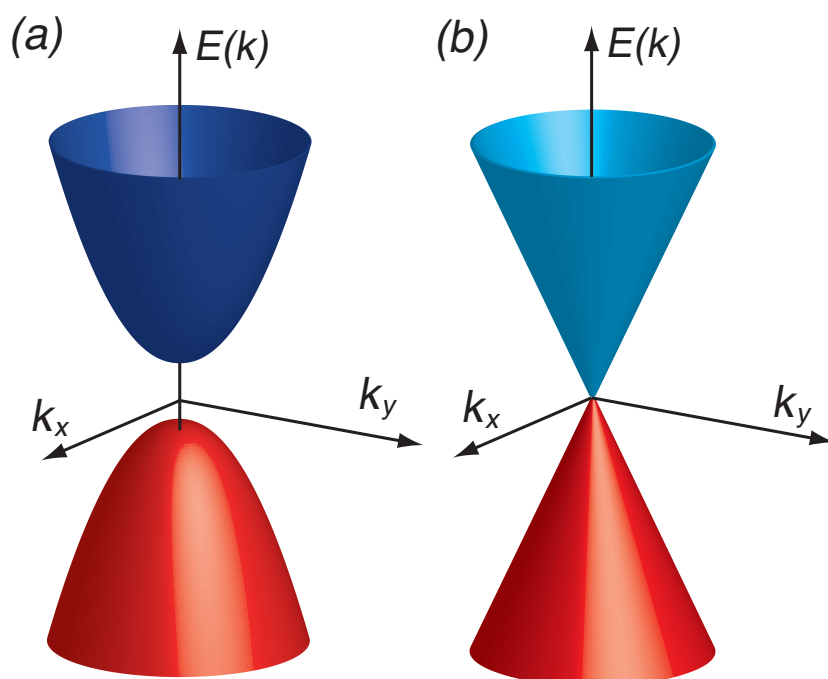


図 1: エネルギー分散.(a) 通常の半導体 (b) グラフェン

グラフェンは、半導体であるがそのエネルギーギャップがナローギャップ半導体の極限ともいえるべき、ちょうどゼロであり、ゼロギャップ半導体である。通常の半導体では、エネルギーバンドの極小、極大値のまわりでは分散が放物線で近似でき、ホール、電子それぞれに関して有効質量を用いた Schrödinger 方程式による量子効果の記述が有効となる。しかし、ゼロギャップ半導体においては、ギャップ近傍でエネルギー分散が一般には線形のいわゆる Dirac コーン構造をとり (図 1)、有効質量が定義できない。これに対応して有効理論も Massless-Dirac 方程式と呼ばれる 2×2 行列により記述されるものとなる。ギャップがゼロであるから、低エネルギーの有効理論とはいえず、必ず伝導帯と価電子帯との両方をともに取り扱わなければならないことを考えるとこの行列による記述は当然のものといえよう。なお Massless とはゼロギャップであることを意味する。この Dirac 方程式とは Dirac が電子のスピンを理論的に記述するために相対論的な量子力学を構築する際用いた方程式と類似のものであり、相対論的な方程式であると言われる。これはエネルギー分散が線形になることによる。ただし元々の Dirac の理論で光速であったものは、ここでは単にゼロギャップ半導体のエネルギー分散の傾きであり、グラフェンの場合光速の 300 分の 1 程度である。グラフェンの特異なエネルギー分散は 2 次元電子の磁場下の典型的な量子効果としてよく知られた量子ホール効果

にも特徴的な振る舞いをもたらす。本年度はこれらのグラフェンの奇妙な半奇数の量子化則に着目した種々の研究をおこなった。

【2】フラストレートした磁性体におけるベリー位相の研究：論文 [1, 9, 10]，講演 [6, 9, 16, 22]

フラストレートしたスピン液体相の対称性の破れによらない分類、特徴付けをめざし、トポロジカル秩序、より広くは量子秩序の概念を用いた研究を行った。本研究においては幾何学的位相に基づくある種の秩序変数の類似物としての量子化ベリー位相を主に用いた研究を行う。そこでは系の励起に有限のエネルギーギャップが存在すること、並びに時間反転対称性が重要である。局所的スピンひねりによるベリー位相をもって量子的局所秩序変数とすると、系に時間反転対称性があるとベリー位相は0または π に量子化する。このベリー位相の量子化値をもって局所的に特徴付けるわけである。これは量子系固有の量であり、古典的対応物を持たない。そのため、通常の相の理論としては明確な区別が困難な相に対しても有効な相分類が行えることとなる。本年度は、上記の各概念の一層の発展を図るとともに、これらをより広範囲なフラストレートしたスピン系における「スピン液体相」に対して適用し、各スピン液体相のより深い理解とフラストレーション起源の量子相転移の記述を目指す研究を行った。特に2次元直交ダイマー系、2次元パイロクロア格子(図2)におけるギャップを持つ量子液体相に対してこの方法を適用し新しい知見を得るとともに、ベリー位相の方法を時間反転対称な系に適用するための理論的枠組みの構築を行った。またより一般にベリー位相のZQ量子化の理論に関しても新しい理論を作った。これは一般のフラストレート系において極めて有用な量子的物理量と考えられる。

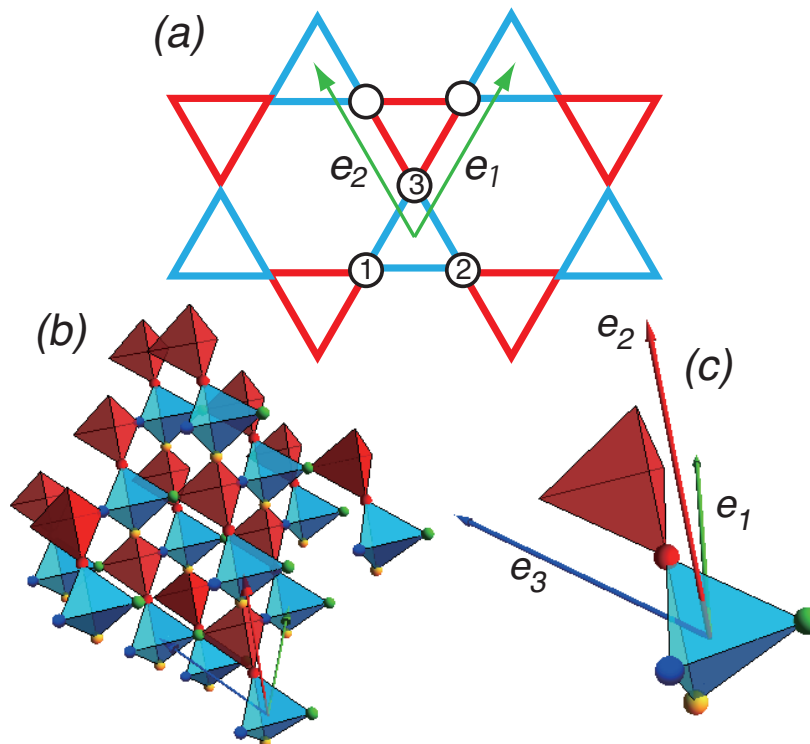


図 2: カゴメ格子とパイロクロア格子の単位胞

【3】量子物質相における対称性の破れを伴わない量子液体相と幾何学的位相の研究：論文 [1,2,9,10], 講演 [2,4,8,10,11,14,15,17,19,20,26,27]

「量子液体相」は、古典的物理量で表現できる特徴的な秩序変数をもたないことを最大の特徴とする量子相である。この観点に立ち、「対称性の破れ」の概念を使わず、量子論固有の幾何学的位相を用いる相分類の理論的枠組みを構築し、具体的な量子系の分類、特徴付けを行った。また Dirac フェルミオンとしての特異なエネルギー分散に起因する特異な幾何学的位相を示すグラフェンも本研究の重要な一部であり集中的な研究を行った。本年度は具体的に以下のような研究を行った。(1) グラフェンに関して、幾何学的位相が寄与する典型的な物理量としてのホール伝導度の計算を行った。特に乱れのあるグラフェンに対してカイラル対称性と $n=0$ ランダウ準位のトポロジカル安定性に着目し、一般の Dirac Fermion の電子構造に関する研究をおこなった。これは一般のゼロギャップ半導体の理論に対応する。(2) 量子化ベリー位相ならびにその拡張に関する研究を行い、 Z_2 ベリー位相によるスピン液体相の分類をリング交換模型、直交ダイマー模型、BEC-BCS クロスオーバーの現象等に関して行い、有意義な成果を得た。(3) 超伝導相におけるトポロジカルな効果に関して詳細な理論的研究を行った。(4) 対称性により守られた一般の位相不変量を構築する一般論をつくり、その具体的な例として一般次元のフラストレートした電子系に対する Z_Q ベリー位相を具体的に計算しその有効性を確立した。また、研究プロジェクトの最終年度であることに鑑み研究全体のまとめと今後の展開に留意した研究を行い、またその成果を広く公開することにつとめた。

【4】トポロジカル絶縁体におけるクラマース縮退とベリー位相の研究：論文 [1,10], 講演 [9,16,22]

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、今年度は、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 (ベリー位相の拡張) と、その非可換ゲージ構造においても四元数表示が極めて有効かつ本質的な役割を果たすことを明確化し幾何学的位相の Z_2 -量子化に対する一般理論を公表した。この新規かつ独創的な芽生え期の発想を理論的に深く追求し、その基礎を確立することを目指す研究を行った。この手法はクラマース縮退をとまなう量子液体相 (トポロジカル秩序相) において広く適用可能であり、量子スピホール相など時間反転とクラマース縮退が本質的な量子液体相の問題における大きなブレイクスルーに至ることを最終的な目標とする研究である。

また、第一原理計算と融合した位相不変量によるホール伝導度の計算手法とその応用に関する基礎的論文を完成させ、その応用に関する研究も行った。

<論文>

1. "Topological aspect of graphene physics", Y. Hatsugai, J. Phys. Conf. Series, to appear, arXiv:1008.4563.
2. "Manipulation of the Dirac cones and the anomaly in the graphene related quantum Hall effect", H Watanabe, Y Hatsugai, H Aoki, J. Phys. Conf. Series, to appear, arXiv:1009.1959.
3. "Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder", M. Arikawa, H. Aoki, Y Hatsugai, J. Phys. Conf. Series, to appear.
4. 「トピックス グラフェンの魅力：新素材の可能性を越えて」, 初貝安弘, 日本分光学会学会誌分光研究, 60, 1, 22-23, (2011).

5. "Anomalous criticality in the quantum Hall transition at $n = 0$ Landau level of graphene : The role of disorder preserving chiral symmetry", T. Kawarabayashi, T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B **82**, 195426 (2010).
6. "Half-integer contributions to the quantum Hall conductivity from single Dirac cones", H. Watanabe, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B **82**, 241403(R) (2010).
7. 「グラフェンの物理」, 初貝安弘、青木秀夫, 固体物理, 45, 9, 457-476, (2010).
8. "Scattering of Dirac Fermions with Doubling", Y. Hatsugai, JPSJ Online—News and Comments, September 10, (2010), http://jpsj.ipap.jp/news/jpsj-nc_74.html
9. "Topological quantum phase transition in the BEC-BCS crossover", M. Arikawa, I. Maruyama and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B **82**, 073105 (2010)
10. "Symmetry protected Z_2 quantization and quaternionic Berry connection with Kramers degeneracy", Y. Hatsugai, New J. Phys. (Invited article : Focus on topological insulators), 12, 065004,(2010)

<著書>

1. 初貝安弘, 「書評：問題例で深める物理 (香取眞理・中野徹共著)」, 数理科学, 59, 2月号 (2011)

<講演>

1. 「断熱不変量としての ZQ ベリー位相の応用」, 初貝安弘, 丸山勲, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
2. 「波束ダイナミクスにおけるスピントランスファートルク」 有川晃弘, 岩田潤, 初貝安弘, 白石賢二, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
3. 「磁場中グラフェンにおける多体問題の厳密対角化」 濱本雄治, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
4. 「傾いたディラックコーンの $n=0$ ランダウ準位における異常性とカイラル対称性」 河原林透, 初貝安弘, 森本高裕, 青木秀夫, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
5. (Invited) "Dirac Fermions with electron-electron interaction in Graphene", Y. Hatsugai, ISIMS-2011 The Third International Symposium on Interdisciplinary Materials Science, (2011), March 10, Epochal Tsukuba
6. " Z_2 topological number of local quantum clusters in the orthogonal dimer model", I. Maruyama, S. Tanaya, M. Arikawa, Y. Hatsugai, International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM), (2011) Jan. 11, Sendai International Center, Sendai, Japan.
7. (Invited) "More than new material", Y. Hatsugai, Speaker in the session "Advances in Graphene-Based Science and Application", 12th Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS) Symposium (2010) Dec. 4, Kazusa Arc, Chiba, Japan
8. "Wave packet dynamics in the spin torque transfer", 有川晃弘, 初貝安弘, 白石賢二, 第 15 回 半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-15, (2010) Dec. 21, 筑波大学計算科学センター

9. 「二次元パイロクロア格子上の $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型に対する Z_2 ベリー位相を用いた相同定」 棚谷翔、有川 晃弘、丸山勲、初貝安弘、第 4 回 物性科学領域横断研究会 (2010) Nov. 13, 東京大学武田先端知ビル 5F 武田ホール
10. (Invited) 「グラフェンにおけるトポロジカルな効果とバルクエッジ対応」 初貝安弘、名古屋大学大学院理学研究科物理学教室談話会, (2010) Dec. 9, 名古屋大学大学院理学研究科 物理学教室
11. 「ベリー位相の ZQ 量子化」 初貝安弘、丸山勲、日本物理学会 2010 年秋季大会 (23pTE-6) 2010 年 9 月 23 日, 研究発表 大阪府立大学
12. 「グラフェン関連模型における半整数量子ホール効果への分解」 渡辺悠樹, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (23aXA-10) 2010 年 9 月 23 日 研究発表, 大阪府立大学
13. 「グラフェン端状態のカイラル対称性の破れに対する安定性」日本物理学会 2010 年秋季大会 (23aXA-7) , 2010 年 9 月 23 日, 研究発表 有川晃弘, 青木秀夫, 初貝安弘 大阪府立大学
14. 不規則 2 層グラフェンのランダウ準位におけるカイラル対称性の効果 日本物理学会 2010 年秋季大会 (24pRA-6) , 2010 年 9 月 24 日, 研究発表 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫 大阪府立大学
15. 開いた軌道の磁氣的破壊と量子ホール効果 日本物理学会 2010 年秋季大会 (24aTE-6) , 2010 年 9 月 24 日, 研究発表, 新井正男, 初貝安弘 大阪府立大学
16. $S=1/2$ 2 次元パイロクロア格子における Z_2 ベリー位相 日本物理学会 2010 年秋季大会 (25aTE-12) , 2010 年 9 月 25 日, 研究発表, 棚谷翔, 有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘 大阪府立大学
17. (Invited) “Topological aspects of graphene physics”, Y. Hatsugai, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), (2010) 8 月 6 日, Fukuoka International Congress Center.
18. “Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder”, M. Arikawa, H. Aoki, Y. Hatsugai, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), (2010) 8 月 3 日, Fukuoka International Congress Center.
19. “Topological characterization of 2D orthogonal dimer model”, S.Tanaya, I. Maruyama, M. Arikawa, Y. Hatsugai, The international conference Highly Frustrated Magnetism 2010 (HFM 2010), (2010) 8 月 3 日, The Homewood campus, Johns Hopkins University, USA.
20. “Entanglement entropy of the bond order phase in graphene in magnetic fields”, Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), (2010) July 29, COEX, Seoul, Korea
21. “Robustness of the edge states in graphene quantum Hall system: does the chiral symmetry degraded by t' matter?”, Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), (2010) July 27, COEX, Seoul, Korea
22. “ Z_2 Berry phase in 2D orthogonal dimer model”, Sho Tanaya, Isao Maruyama, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, XXIV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys24), (2010) July 20, Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia
23. “Edge States of Graphene in Magnetic Fields: Effects of Second-Neighbor Hopping”, M. Arikawa, Y.Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010) (2010) July 7, 京都国際会議会館

24. “Edge States of Graphene in Magnetic Fields: Effects of Second-Neighbor Hopping”, M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010):7D-04 (2010) July 7, Kyoto International Conference Center, Kyoto, JAPAN
25. “Anomalous Criticality at the $n = 0$ Landau Level of Graphene: Manifestation of the Chiral Symmetry”, T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010):7D-11 (2010) July 11, Kyoto International Conference Center, Kyoto, JAPAN
26. (Invited) “Dirac fermions, Chern numbers and bulk-edge correspondence in graphene with randomness”, Y. Hatsugai, Localization Phenomena in Novel Phases of Condensed Matter, Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy from 17 - 23 May (2010) Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy
27. “Chiral Symmetry in Graphene”, Graphene Week 2010 (2010) April 21, Y. Hatsugai, T. Kawarabayashi, T. Morimoto, H. Aoki (presented by Kawarabayashi), College Park, Maryland, USA
28. “Anomalous Quantum Hall effect in graphene and organic-conductors: topological number and semi-classical quantization”, Graphene Week 2010 (2010) April 21, M. Arai, Y. Hatsugai, College Park, Maryland, USA

<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. 東北大学学際科学国際高等研究センター 客員教授 2010 年 11 月～2011 年 3 月
3. 名古屋大学大学院理学研究科, 特別講義, 物性論におけるトポロジカルな概念とその応用 (幾何学的位相とバルクエッジ対応) 2010 年 11 月
4. 東京大学物性研究所共同利用施設専門委員会委員
5. 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

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 B 課題番号: 20340098 「対称性の破れを伴わない量子液体相:幾何学的位相による理論とその応用」(研究代表者: 初貝安弘)(平成 22 年度直接経費 4,900 千円)
2. 科学研究費 特定領域研究 (A) 課題番号: 22014002 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相とその展開」(公募研究) (研究代表者: 初貝安弘)(平成 22 年度直接経費 1,100 千円)

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)

半導体ナノ構造系に現れる様々な量子現象の理論的研究を行っている。現在、特に力を入れているのは、半導体量子ドット系 (GaAs/AlGaAs 系) における非平衡・非線形領域に現れる、量子物性と電子相関効果の解明である。本年度の成果は以下の通り。

【1】量子ドット系の磁場効果：磁気コンダクタンスの符号反転 (論文 [1])

不純物による弱局在効果は時間反転対称性の破れ (磁場) により抑制されることで、正の磁気コンダクタンスを与えることが知られている。一方、微小量子ドットに対する Gorkov-Eliashberg 理論によれば、動的コンダクタンスは状態密度相関に比例する。その結果、動的コンダクタンスは直交/ユニタリ類の Wigner-Dyson 相関に比例し、負の磁気コンダクタンスを持つ。実際の半導体量子ドット系でいずれの効果が支配的となるかは系のサイズと観測する周波数による。ドットの平均準位間隔を跨ぐような周波数で磁気コンダクタンス測定を行えば、磁気コンダクタンスの符号反転が生ずるであろうことを示した。

【2】カーボンナノチューブ量子ドット・縦型量子ドット

カーボンナノチューブ量子ドットおよび縦型量子ドットは、外殻軌道はほぼ二重に軌道縮退する「縮退軌道を持つ量子ドット」とみなすことが可能である。我々はとくに、電子相関の強結合領域現象である近藤効果が支配的となる極低温領域での非平衡量子輸送現象に興味をもち、研究を進めている。

(1) 非線形コンダクタンスの挙動 (論文 [2])

通常の使われる相互作用 $U = \infty$ スレーブボゾン近似では実験で観測するようなゲート電圧依存性を解析することはできない。我々は、有限相互作用スレーブボゾン平均場近似を用いることで、ドットの平均量子数 $0 \sim 4$ に対応するゲート電圧の全領域において、非線形コンダクタンスを評価し、その温度依存性/有限バイアス依存性を調べた。

$SU(4)$ アンダーソン模型を実験結果に適応させる際の妥当性の証左とされる各 $N_d =$

1, 2, 3 でのコンダクタンス増大は、わずかな軌道内 / 軌道間クーロン相互作用の違いと有限バイアス電圧の大きさにより大きく影響される。特に $N_d = 2$ での二粒子近藤効果は、 $N_d = 1, 3$ での一粒子近藤効果に比べ、はるかに抑圧されやすい。従来、様々な実験で観測 / 非観測と相反する結果であった二粒子近藤効果が、実験で使われたバイアス電圧値に依るものとして系統的に解釈可能であることが明らかになった。

(2) 非平衡揺らぎと電子相関 (論文 [3])

量子ドット系の非平衡状態を記述する現象として非線形コンダクタンスとともに良く用いられているものが、電流の非平衡揺らぎ (ショットノイズ) 測定である。電流揺らぎには、コンダクタンスに比べ電子相関がより重要な影響を及ぼす。以下のことが明らかになった。(1) ショットノイズに対する電子相関は、自己エネルギーとしてだけでなく、2 体結節部からも寄与がある。(3) 通常、使われている透過率によるノイズの表式は、前者の寄与のみに相当する。(4) ゲート電圧の大きさにより、2 体結節部の寄与の重要度は変わる。 $N_d \approx 2$ の近藤領域では 2 体結節部が本質的に重要となるが、 $N_d \approx 1$ の領域では、この寄与を考慮しなくとも、観測されている実験結果を説明することが可能である。

【 3 】 スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子

スピン・電荷の自由度を制御可能な「量子論理ゲート」の実現を目指し、現在、様々な系が提案されている。その中で、GaAs/AlGaAs 系を使い、Aharonov-Bohm 型位相干渉系に量子ドットを埋め込んだ系 (AB リング・ドット系) は、制御性も高く量子素子として大きな可能性を持つ。この系に垂直方向に電場をかけることで誘起させたラシュバ型スピン軌道相互作用を有効的磁束として使うことで、電場によりスピン流の生成やスピン制御を行う可能性が模索されている。

(1) 非平衡近藤効果を利用した電場によるスピン流生成 (論文 [4], 講演 [1,2])

ラシュバ型スピン軌道相互作用のみの存在でスピン流が生成されるわけではなく、実際、線形応答領域や相互作用のない系でスピン流が生成されることは無い。そこで、リング+ドット系 (ラシュバリング・ドット系) において、どのような条件下でスピン流が生成されるかを考察した。その結果、(1) 電子相互作用が存在しかつ有限バイアス下という「電子相関非平衡」条件でのみ、スピン流が生成されること、(2) 最初は印加するバイアス電圧に従いスピン流が現れるが、バイアスが大きすぎると抑制してしまうこと、(3) 温度効果は常にコンダクタンスのスピン依存性を壊す方向に働くこと、がわかった。

(2) 有効準位とスピンコンダクタンス (講演 [1])

スピン流が生成されるためには、ドット上で有限のスピン分極を持つことは必要であるが、それで十分であるとは限らない。例えば、相互作用のないドット系では有限バイアスによりスピン分極を作ることにはできるがスピン流は現れない。相互作用ドット系でのスピン分極とスピン流関係を明らかにするため、ドット内の準位をスピン分裂させスピン分極を人為的に作り、有限バイアス下でスピン分極とスピン流の相関を調べた。その結果、相互作用ドット系においてはスピン分極はスピン流の生成を常に伴っている、つまり図 1 に示すように、スピン流とスピン分極の消失はほぼ一致していることが明らかになった。

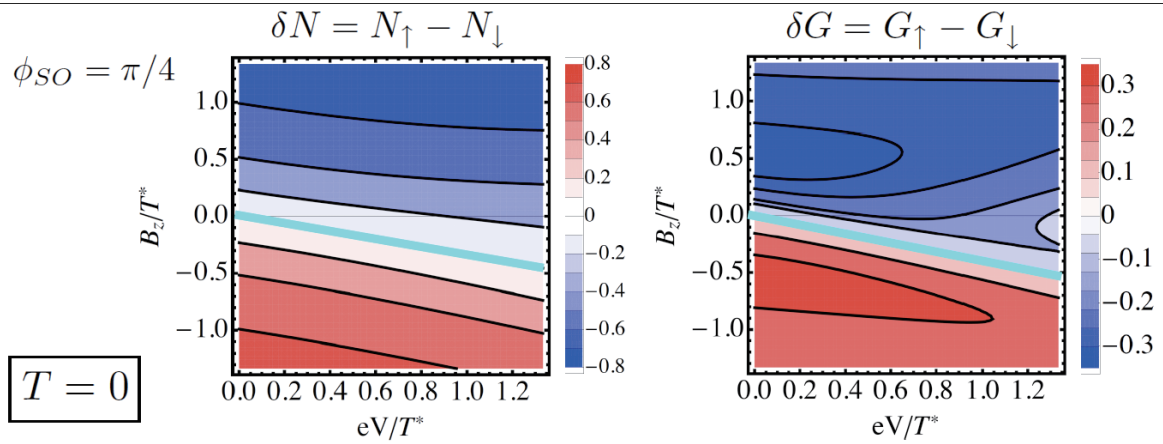


図 1: スピン分極 (左図) とスピンコンダクタンス (右図) のバイアス電圧と準位分裂依存性の比較。パラメータは $\xi = 0.3U$ 、 $\Gamma = 0.5U$ 、 $eV = 0.15U$ 。

(3) 斜行磁場の影響: スピン回転対称不変スレーブボゾン平均場近似 (講演 [3])

ラシュバ型スピン軌道相互作用に付随する位相干渉効果を調べるため、近年、半導体ドット面内方向に成分を持つ磁場 (斜行磁場) を導入する量子輸送実験 (現時点では電流測定) が行われ始めた。量子ドット内での斜行磁場はスピン・フリップ過程をもたらすことで近藤一重項状態を壊す一方で、スピン分極を作ることによってスピン流の生成源ともなり得る。非平衡近藤効果により生成されるスピン流が斜行磁場にどのような影響を受けるかは興味深い問題である。

これまで理論計算を行ってきた有限相互作用スレーブボゾン (KR スレーブボゾン) 平均場近似は、スピン軸を z 軸 (半導体面に垂直) 方向に選択的に固定していたため、スピン回転対称性を完全には満たしていない。斜交磁場によるスピントリプル過程を取り込むためには、近似を完全にスピン回転対称な取り扱いに拡張する必要がある。

このような拡張を KR スレーブボゾン近似に施したのがスピン回転対称不変 (SRI) ス

レーブボゾン法である。以下図 2 に予備的結果として、磁場の大きさを固定し、 $x-z$ 平面内でその方向 θ を回転させた時の、スピンコンダクタンス ΔG の挙動を示す。スピン流の大きく変化する領域 ($0 \rightarrow \pi$) とあまり変化しない領域 ($\pi \rightarrow 2\pi$) があることがわかる。これは斜行磁場により安定的にスピン制御が可能となることを示唆している。

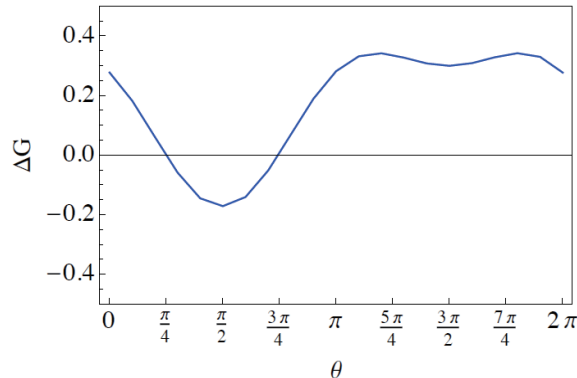


図 2: zx 平面内で磁場を回転させる時のスピンコンダクタンス。パラメータは $T = 0$ 、 $Vb = 0.1U \cos \theta$ 、 $B_z = 0.1U \sin \theta$ 、 $\xi = 0.3U$ 、 $\Gamma = 0.5U$ 、 $eV = 0.15U$ 、 $\phi_{SO} = \pi/4$ 。

【4】開いた量子ドット系の有効場理論の研究 (講演 [4])

ラシュバ型量子ドット系のハミルトニアンは時間反転対称性を保持する。そのため、線形応答領域では相互作用系であってもスピン流が生成されることはない。有限バイアス電圧がドット系に与える影響を調べることで、有限バイアス下でどのようにスピン流が生成されるかを有効場理論の立場から議論した。Keldysh 非平衡理論を汎関数積分により定式化すると、有限バイアス下であっても熱欲=導線の自由度を完全に積分消去することが可能であり、「開いた量子ドット」の有効作用を求めることができる。左右の導線の影響は、導線自由度の積分の結果現れるドットの自己エネルギー部分 $\Sigma_{\text{lead}}^{R,A,K}$ として反映される。ラシュバ型スピン軌道相互作用のある系を考えると、リング形状の時のみ、 Σ_{lead}^K がスピン依存性を持つことがわかった ($\Sigma_{\text{lead}}^{R,A}$ は常にスピンによらない)。つまり、 Σ_{lead}^K の効果により定常分布が変形することでスピン分極を生み出し、そのスピン分極が相互作用によりスピン流へと変換される、機構が明らかになった。

研究業績

< 論文 >

1. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Universal conductance enhancement and reduc-

- tion of the two-orbital Kondo effect”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** 054709 (2010).
2. N. Taniguchi, “Universal and Nonuniversal Dynamical Conductivity in Small Metallic Grains: an Ambivalent Role of T-invariance at Finite Frequency”, J. Prob. Statistics, **2010**, 751395 (2010).
 3. H. Oguchi and N. Taniguchi (投稿準備中).
 4. K. Isozaki and N. Taniguchi (投稿準備中).

< 講演 >

1. N. Taniguchi and K. Isozaki, “Electrical spin filter through a Rashba dot by the Kondo effect”, The 6th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Tokyo, August, 2010.
2. 谷口伸彦, 根元太郎「量子ドット系のファノ近藤効果とスピン操作 II」
日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月, 大阪府立大学).
3. 根元太郎, 谷口伸彦「斜行磁場下における AB 干渉計のファノ近藤効果とスピン制御」日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月, 新潟大学).
4. 谷口伸彦「非平衡ラッシュバ量子ドットの有効場理論とファノ近藤効果」日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月 28 日, 新潟大学).

< 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 (下)」(2010 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

博士研究員：池田昌司

大学院生：黒岩健, 岡崎祥太, 尾澤岬

【1】ガラス転移の平均場描像

(1) モード結合理論とレプリカ理論の整合性 (池田, 宮崎) 論文 [2, 5]、講演 [1, 4, 6, 13, 14, 24]

ガラス転移の理論研究の歴史は長く、実験結果を説明するために多くの理論やシナリオが提案されてきた。しかし、未だにガラス転移の背後に「理想ガラス転移」とも言うべき熱力学的な相転移が存在するのかすら分かっていない。それどころか、理論モデルの出発点となるべき、平均場理論すら完全に確立していないのが現状である。現在のところ、液体のガラス転移の「平均場理論」に最も近いと信じられている理論が、液体レプリカ理論とモード結合理論である。前者はガラスの熱力学理論、後者はそれを動力学の立場で説明するものと解釈されている。両者は互いに独立に発展してきた理論であるが、スピングラスの平均場模型との似ていることから、暗黙のうちに、ガラス転移の平均場理論と言えば両者を指すようになった。ところが、この二つの理論が整合していることを正面から調べた研究はなかった。液体の多体問題に特有の近似のために、比較が困難となることが理由である。我々は、レプリカ理論とモード結合理論に、できるだけ等価な近似を行うことにより、両理論の整合性を検討した。また、近似そのものを考慮の対象から外すために、空間次元を高くした極限も解析した。空間次元を上げると、液体の熱力学的構造は理想気体に近づくために、近似が系統的に向上するからである。

両理論に、HNCと呼ばれる液体論の近似を用いて、3次元剛体球ガラスの2時間密度相関関数のプラトーの高さ(非エルゴードパラメータ)の波数依存性を調べた結果を図に示す。両理論の結果が、全く異なることは明らかである。モード結合理論がシミュレーション結果と良く一致することから、この図の結果はレプリカ理論の定量的な破綻を表している。一方、ガラス転移点の空間次元(d)依存性は、やはり両理論の結果が全く異なることが分かった。レプリカ理論が、ガラス転移点 ϕ_d が $d/2^d$ に比例することを予想するのに対して、モード結合理論は、 $\phi_d \sim d^2/2^d$ を予言する。驚くべきことに、この違いはモード結合理論が高次元で破綻していることが原因であることがわかった。以上の結果は、2つの平均場理論描像の間に整合性が無いことを、初めて示したものであり、ガラス転移研究の方向性に重要な問題を提起したものである。

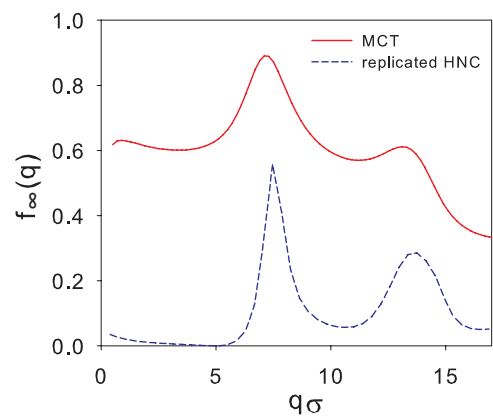


図 1: 3次元剛体球ガラスにおける、非エルゴードパラメータ。モード結合理論(実線)とレプリカ理論(破線)の結果は大きく異なる。

(2) 4次元剛体球系のガラス転移 (池田, 宮崎) 論文 [6]、講演 [1, 4, 6, 13, 14, 24]

前節で述べたとおり、ガラス転移においては平均場描像すら確立していない。かといって、有限次元系の正確な転移の情報を、シミュレーションから取り出せるほど、計算機の性能は高くない。平均場理論のシナリオを検証する方法として、高次元系を調べることが考えられる。そこで、我々は剛体球のシミュレーションを4次元で行い、理論との比較を行った。その結果、2つの大きな成果が得られた。1つは、4次元系では、1成分系であってもガラス転移が観測されたことである。2-3次元系でガラス転移を観測するため

には、核生成による結晶化を避けるために多成分系にするなどの工夫が必要である。系が複雑になってしまふことが、解析や理論との比較を困難にしてきた。4次元系は、核生成速度が劇的に遅くなるため、ガラス的な振舞いを観測できるのである。その意味で、我々の系は最もクリーンなガラス模型と言える。2つ目は、観測されたダイナミクスが、低次元系に比べより「平均場」的であることが分かった点である。前節で述べたとおり、モード結合理論がガラス転移における平均場理論と信じられている。動的スケールリングなどを詳細に調べた結果、その予想とシミュレーション結果の一致は極めて良い。また、ガラス転移における臨界揺らぎとも言うべき、「不均一動的揺らぎ」が4次元系では、2-3次元系のそれに比べて、大きく抑えられていることが分かった。モード結合理論は平均場理論として問題を抱えていることは前節で述べたとおりであるが、臨界的な動的スケールリングに関しては、頑強であると考えられているので、我々の結果は4次元系が、確かにより平均場的であることを示していると考えられる。

理論的な考察によると上部臨界次元はガラス転移の動的転移点付近では、8次元であり、4次元はそれに遠く及ばないが、それでも系統的な理論の一致や揺らぎの低減が観測されたことは極めて興味深い。

(3) ランダム系のガラス転移 (宮崎) 論文 [4]、講演 [2, 5, 9]

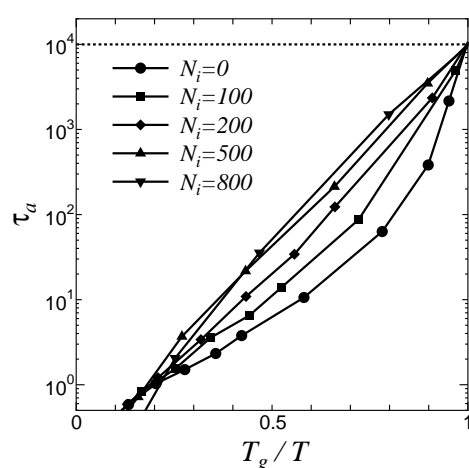


図 2: 様々な不純物密度に対する、緩和時間 τ_α の温度依存性。不純物が増えるとアレニウス則に近づく (直線になる) ことがわかる。

この結果、(i) 不純物の増大と共に動的不均一性が強く抑えられる。局在転移領域では、臨界的な動的不均一性の増大は観測されない。(ii) 緩和時間や粘性係数の非アレニウス性の度合いを示すフラジリティは、不純物濃度を上げると小さくなる (図参照)。この結果は、多孔質系の実験事実と整合している。(iii) ダイナミクスは、不純物の作成プロトコルに敏感である。不純物を作る自由体積の分布は、不純物だけを平衡化させた場合と、液体粒子と共に平衡化させた場合とでは、後者の方が長いテールを持つ。つまり、液体粒子は動きやすくなる。一般に粒子の分布は、単純なポワソン分布より、熱平衡化させたほうが粒子の動きやすい分布になるはずであるから、この結果は自然である。しかし、それを具体的な物理系で指摘した例はおそらく本研究が初めてである。

【2】超ソフトなコロイド分散系の奇妙なダイナミクス

(1) ガウスコア液体の核生成とガラス転移 (池田, 宮崎) 論文 [3]、講演 [3, 5, 8, 9, 12, 21]

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

長距離相互作用としての性質を示す筈である。言い換えれば、柔らかい高密度液体は、平均場的な系でもある。我々はその最も単純なモデルである、ガウスコア相互作用系のガラス転移をシミュレーションにより調べた。その結果、密度を大きくしていくと、核生成が阻害され、ガラス転移に特有のスローダイナミクスが観測されることがわかった。また、その動的性質は、今までのモデルガラス系と比べて、モード結合理論の予想との一致が向上する。さらに、非ガウス因子やストークスアインシュタイン則の破れが弱く、動的不均一性が抑えられていることも示された。強調すべきことは、これが単成分系で観測されたことである。これらの結果は、ガウスコア模型は、現存のガラスモデル中、最もクリーンな系であると同時に、平均場的な振舞いを最もよく再現する系であることを示唆している。

(2) k-Core overlap 相互作用系のスローダイナミクス (岡崎, 池田, 宮崎) 講演 [7, 22]

柔らかい相互作用系のもう一つの例として、k-space overlap ポテンシャルという相互作用を持つ液体の熱力学とダイナミクスに関する研究を行った。k-space overlap ポテンシャルとは、波数空間で、柔らかい相互作用をする系であり、液体系であるにもかかわらず、基底エネルギーや相図の見積もりが簡単である系として、最近、Stllinger らにより考案されたモデル液体である。この相互作用は実空間では、振動的な長距離力の形をしているため、一種の Kac 模型的な振舞いをすることが予想される。その熱力学を数値計算により調べたところ、通常柔らかい相互作用系の相図における密度軸を左右反転させたような形状になることを見出した。また、ダイナミクスも同様な反転が見られた。即ち、(i) 高密度極限では任意の温度で流動相となる、(ii) 高温極限では、任意の密度に対して流動相である。低温側では一種のリエントラント的な相図の振舞いが見られる、(iii) 中間密度・低温で現れる結晶相においてすら、Bragg ピークははっきりと見えるにも関わらず、協同的な一種のソフトモードが現れ、「流れる」ような振舞いを示す、(iv) 低密度側で、一種のガラス的な遅いダイナミクスの兆候が見られる、などを発見した。これらのうち熱力学的な性質の一部は、波数空間で相互作用が柔らかいことを反映して、双対性に基づく議論からある程度理解できることである。しかし、ダイナミクスについては、そのような素朴な直感は成立せず、極めて非自明な結果である。

(3) サイズ比が大きく異なるコロイドのガラス転移 (黒岩, 宮崎) 講演 [8, 11, 16, 17]

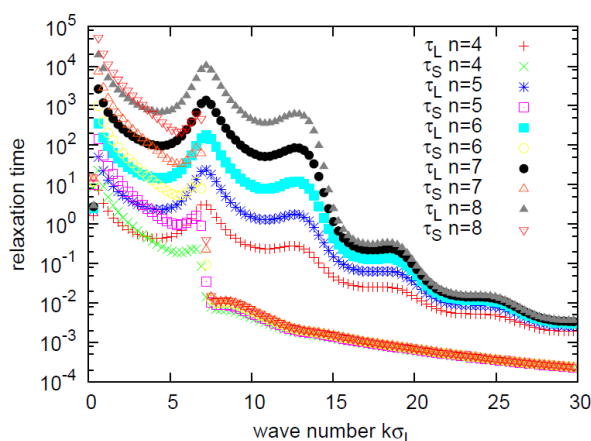


図 3: ガラス転移点近傍における、大小成分の緩和時間の波数依存性。サイズ比は 3。大粒子は典型的なガラスの振舞いを示すが、小粒子は短波長側ほとんどゼロ、つまり液体的な振舞いを示す。

2成分液体は、ガラス研究の格好のモデル系である。シミュレーションによるガラス転移の研究においては、粒子のサイズがわずかに異なる 2成分系を扱うことが多い。これは結晶化を防ぐためである。このサイズ比を大きくすると何が起こるだろうか。サイズ比が大きい極限であれば、小さい粒子は大きい粒子に対する単なる溶媒(分散媒)としての役割しか果たさず、その自由度は断熱的に消去できるであろう。しかし、サイズ比が 10 程度以下になってくると、状況は一変する。小さい粒子は溶媒であると同時に、枯渇相互作用(エントロピー相互作用)を媒介する役割を果たすようになる。枯渇相互作用は超近距離相互作用でしかも強い引力相互作用であるから、大きい粒子は自己凝集、即ちゲル化を起こすこともある。しかも、この程度の比では、時間スケールの分離が完全でなく、断熱近似は破綻し、双方の非平衡課程を同時に扱う必要が出てくる

筈である。我々は、以上のような振舞いの定性的な違いが、どのサイズ比においてどのように現れるのかを理解することを目的に、サイズ比の大きな剛体球 2成分系に対してガラス転移の研究を行った。具体的に

は、モード結合理論 (MCT) を 2 成分剛体球液体に適用し、そのスローダイナミクスを詳細に調べた。その結果、サイズ比が 1 に近い領域では、大小両成分とも標準的なガラス転移的な振舞いが見られるが、サイズ比を大きくしていくと、小さい粒子のダイナミクスが短い波長から次第に分離していくことを突き止めた。

<論文>

1. Thomas E. Markland, Joseph A. Morrone, Bruce J. Berne, Kunimasa Miyazaki, Eran Rabani, David R. Reichman, “Quantum fluctuations can promote or inhibit glass formation”, *Nature Physics* **7**, 134-137 (2011).
2. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, “Reply to Comment on “Mode coupling Theory as a Mean-Field Description of the Glass Transition” by Rolf Schilling and Bernhard Schmid”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 049602 (2011).
3. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, “Glass Transition of the Monodisperse Gaussian Core Model”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 015701 (2011).
4. K. Kim, K. Miyazaki, and S. Saito, “Molecular dynamics studies of slow dynamics in random media: Type A-B and reentrant transitions”, *European Physical Journal Special Topics* **189**, 135-139 (2010).
5. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, “Mode-Coupling Theory as a Mean-Field Description of the Glass Transition”, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 255704 (2010).
6. P. Charbonneau, A. Ikeda, J. A. van Meel, and K. Miyazaki, “Numerical and Theoretical Study of a Monodisperse Hard-Sphere Glass Former”, *Phys. Rev. E* **81**, 040501(R) (2010).

<日本語の解説>

1. 宮崎州正, “分子の世界の渋滞学：ガラス転移の物理 (第 54 回物性若手夏の学校 (2009 年度), 講義ノート)” 「物性研究」 93, 956-972 (2010 年 6 月号).

<講演>

1. 宮崎州正 ”モード結合理論はガラス転移の平均場理論か?” (お茶の水女子大学物理学科セミナー, 2010 年 12 月 6 日, 東京).
2. 宮崎州正 ”ランダム媒質中のガラス転移” (岡山大学化学科セミナー, 2010 年 11 月 11 日, 岡山).
3. A. Ikeda, ”Glass Transition of Ultra-Soft Particles: Novel Dynamics in High Density Gaussian Core Model”, (Workshop on the Dynamics of the Glass/Jamming Transition in celebration of the 80th birthday of Prof. Kyozi Kawasaki, 2010 年 9 月 8 日-9 月 11 日, Busan, Korea, invited).
4. K. Miyazaki, ”Is Mode-Coupling Theory a Mean Field Theory of the Glass Transition?”, (Workshop on the Dynamics of the Glass/Jamming Transition in celebration of the 80th birthday of Prof. Kyozi Kawasaki, 2010 年 9 月 8 日-9 月 11 日, Busan, Korea, invited).
5. K. Miyazaki, ”Slow dynamics in random media: From glass to localization transition” (CECAM workshop ”Complex dynamics of fluids in disordered and crowded environments”, 2010 年 6 月 28 日-7 月 1 日, Lyon, France, invited).

6. K. Miyazaki, "Is Mode-Coupling Theory a Mean Field Theory of the Glass Transition?" ("Particulate Matter: Dimension Matters", 2010年5月31日-6月4日, Dresden, Germany, invited).
7. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正 "k-space overlap ポテンシャル液体のダイナミクス" (日本物理学会 2011年春季大会, 25pGV-7, 2011年3月25日-3月28日, 新潟, スライドのみ).
8. 黒岩健, 宮崎州正 "サイズ比の大きい2成分系における時間スケールの分離とモード結合理論" (日本物理学会 2011年春季大会, 25pGV-8, 2011年3月25日-3月28日, 新潟, スライドのみ).
9. 池田昌司, 宮崎州正 "高密度ガウスコア液体における平均場的挙動の解析" (日本物理学会 2011年春季大会, 25pGV-9, 2011年3月25日-3月28日, 新潟, スライドのみ).
10. 池田昌司, 「重なり合う粒子系のガラス転移」(つくばソフトマター研究会 2011, 2011年3月7日-3月8日, 東大物性研, 柏).
11. T. Kuroiwa, "Mode-Coupling Theory and Time Scale Separation in Binary Mixture with a Large Size Ratio" (The 4th Discussion Meeting on Glass Transition, 2011年2月28日-3月2日, 仙台, ポスター).
12. A. Ikeda, "Glass Transition of Monodisperse Gaussian Core Model" (The 4th Discussion Meeting on Glass Transition, 2011年2月28日-3月2日, 仙台, ポスター).
13. 宮崎州正, 池田昌司 "ガラス転移の平均場理論についての考察" (第5回領域研究会「非平衡ソフトマター物理学の創成-メソスコピック系の構造とダイナミクス」, 2011年1月8日, 東京大学)
14. 宮崎州正, 池田昌司 "ガラス転移の平均場理論としてのモード結合理論" (東京大学物性研究所短期研究会「ガラス物理の諸問題. 実験と理論の接点」, 2010年11月29-12月1日, 千葉)
15. 池田昌司, 宮崎州正 "高密度ガウスコア液体のガラス転移" (東京大学物性研究所短期研究会「ガラス物理の諸問題. 実験と理論の接点」, 2010年11月29-12月1日, 千葉)
16. 黒岩健, 宮崎州正 "サイズ比の大きい2成分系における異常な緩和-モード結合理論による解析-" (東京大学物性研究所短期研究会「ガラス物理の諸問題. 実験と理論の接点」, 2010年11月29-12月1日, 千葉, ポスター)
17. 黒岩健, 宮崎州正 "サイズ比の大きい2成分系のガラス転移とモード結合理論" (日本物理学会 2010年秋季大会, 26aTD-3, 2010年9月23-26日, 大阪)
18. 池田昌司, 宮崎州正 "高密度ガウスコア液体のガラス転移" (日本物理学会 2010年秋季大会, 26aTD-7, 2010年9月23-26日, 大阪)
19. 金鋼, 宮崎州正, 斎藤真司, "ランダム媒体拘束系のガラス転移とフラジリティ" (日本物理学会 2010年秋季大会, 26aTD-8, 2010年9月23-26日, 大阪)
20. 宮崎州正 金鋼, 斎藤真司, "不純物中のガラス転移", (第59回高分子討論会, 2010年9月15日, 札幌, 依頼発表).
21. A. Ikeda and K. Miyazaki, "A Novel and Simple Monodisperse Glassformer", (International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, 2010年8月17日-8月20日, 奈良, ポスター).
22. S. Okazaki, A. Ikeda, and K. Miyazaki, "Simulation and MCT Analysis of Soft Colloids", (International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, 2010年8月17日-8月20日, 奈良, ポスター).

23. K Kim, S. Saito, and K. Miyazaki, "Molecular dynamics studies of slow dynamics in random media: Type A-B dynamics and reentrant transition" (CECAM workshop "Complex dynamics of fluids in disordered and crowded environments", 2010年6月28日-7月1日, Lyon, France, ポスター).
24. A. Ikeda and K. Miyazaki, "Glass transition and dimensionality" ("Particulate Matter: Dimension Matters", 2010年5月31日-6月4日, Dresden, Germany, ポスター).

<社会還元等>

1. 宮崎州正, 日本物理学会・学会誌編集委員

<学位論文(修士)>

1. 岡崎祥太, 「k-space overlap 液体の特異なダイナミクス」

<外部資金>

1. 科学研究費 特定領域研究「非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコピック系の構造とダイナミクス」(公募研究)(平成21年度~平成22年度、研究代表者:宮崎州正) 課題番号: 21015001 「コロイド系のガラス転移と非線形レオロジー」(研究代表者:宮崎州正)(平成22年度 1,900千円)
2. 科学研究費 基盤研究(C)(平成21年度~平成23年度、研究代表者:宮崎州正) 課題番号: 21540416 「過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性」(研究代表者:宮崎州正)(平成22年度 900千円)

<集中講義>

1. 宮崎州正, 「分子化学特別講義」岡山大学大学院集中講義, 2010年11月10-12日
2. 宮崎州正, 「物理学特別講義(物性)」お茶の水女子大学大学院集中講義, 2010年12月6-8日

<その他>

1. 宮崎州正, Workshop on the Dynamics of the Glass/Jamming Transition in celebration of the 80th birthday of Prof. Kyozi Kawasaki (2010年9月8日-9月11日, Busan, Korea) 組織委員.

VII-5 半導体ナノ物性グループ

メンバ

教授 白石賢二

助教 岩田潤一、神谷克政

研究員 有川晃弘

大学院生 5名

1. 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の研究を行った。

2. 研究成果

【1】書き込み／消去耐性が強いMONOS型メモリの設計指針の提案

MONOS型メモリでは、原子レベルの空間である窒化シリコン膜中の欠陥に電荷を注入することによってメモリ機能を発現させているため、その小型化・高速化が可能となることから、次世代メモリの候補として期待されている。しかし、原子レベルの欠陥に電荷(データ)を充電(放電)してデータの書込(消去)を行う際に窒化シリコン膜中の欠陥がどのような振る舞いをするかは全く不明であった。上述の問題を解決するために、第一原理計算を用いて原子レベルでMONOS型メモリにおける窒化シリコン中の欠陥がデータの書込・消去(電荷の充電と放電)に対してどのように振る舞うかを原子レベルで詳細に明らかにした(K. Yamaguchi 他 IEDM 2010)。得られた結果は以下の通りである。①窒化シリコン中に酸素が混入することによって生じた欠陥はデータの書込・消去によって構造が元に戻らなくなる傾向があること(不可逆的構造変化を起こす傾向があること)を示す(図1)。②一方、窒化シリコン中の窒素空孔を起因とする欠陥はデータの書込・消去を行っても構造が元に戻る。これは、①酸素混入欠陥はメモリ機能の劣化を引き起こすのに対し、②窒素空孔欠陥はメモリ機能の劣化を引き起こさないことを意味する。さらに、窒素空孔欠陥がデータの書込・消去によって引き起こす構造変化はヤン・テラー効果に伴う自発的対称性の破れであるため、原理的に可逆的であることも示した。

さらに、書き込み／消去に強いMONOS型メモリの実現にはSiN膜中への酸素混入を抑制することがキーポイントであることを明らかにし、その具体的な処方箋としてSiN直下に極薄シリコン膜を挿入することによって酸素の化学ポテンシャルを大きく下げること、SiN中への酸素混入を防げることを示した。当該手法は、東芝から報告されている、SiN膜直下にナノドット列を配置するプロセスでMONOSの特性が向上することと合致している。

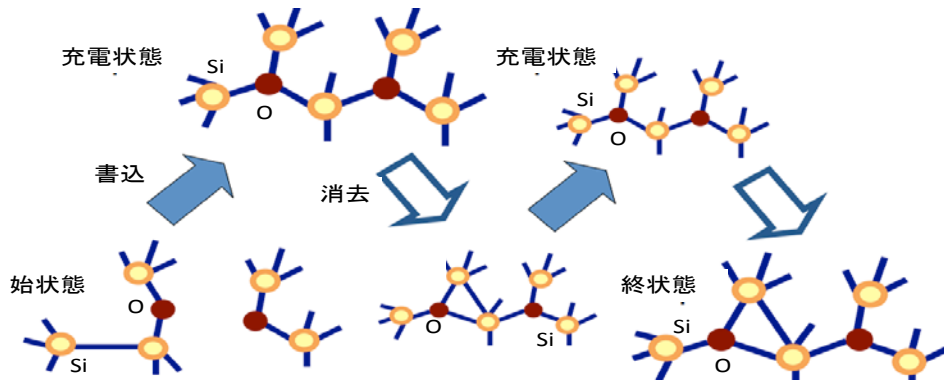


図 1: SiN 中欠陥の書込／消去による大きな構造変化。

【2】窒化物半導体における擬立方晶近似の妥当性の理論的研究

窒化物半導体をベースにした光デバイスは擬立方結晶近似を用いて設計されることが多い。本研究では第一原理量子論によって擬立方晶近似の妥当性について議論した。その結果、ウルツ鉱構造の窒化物半導体においては擬立方晶近似が大きく破綻することが示された。これは歪み印加の際に生じる内部パラメータの大きな変化、第三近接相互作用の物理的起源があることを明らかにした。さらに内部パラメータが大きく変位するAlNでは、特に擬立方晶近似の破綻が顕著となることも明らかにした。

【3】オーミック接触の新しい物理モデルの提案

金属と半導体のオーミック接触作製は、様々なデバイスや量子ホール効果等の物性実験において欠かせない技術である。特に、将来の LSI に導入が期待されている金属ソース/ドレインの作製のためには金属とシリコンの界面にナノスケールのオーミック接触を作る必要があり、このとき仕事関数の制御が次の技術的な難題である。これまでオーミック接触は、ショットキー障壁高さを制御することによって達成されていると考えられてきた。しかしながら、これまでの界面物理の知見は、金属と半導体の界面でフェルミレベルピンギング現象が起こるため、ショットキー障壁高さを制御が困難であること

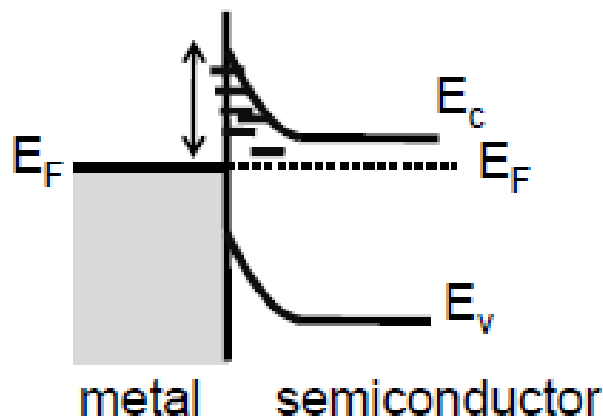


図 2: 本研究で提案した新たなオーミック接触のモデル

を示している。そのため、従来のオーミック接触のバンドダイアグラムはフェルミレベルピニング現象との矛盾を含んでいると考えられる。このような観点から、本研究では実験で得られるオーミック接触と第一原理計算で考察した金属／半導体界面のフェルミレベルピニング現象の双方に矛盾のない、新たなオーミック接触のモデル(図 2)を提案した。このモデルでは、ショットキー障壁の広い範囲のエネルギー領域に多数の欠陥レベルが存在しており、電子はこの欠陥レベルを介した共鳴トンネルによる伝導によってオーミック接触が達成されていると考えている。

今年度はさらに欠陥密度分布数が不十分であったり、欠陥密度分布が非一様である場合には、オーミック接触の様相を示さなくなることも明らかにし、実験でオーミック接触形成に失敗したサンプル特性も再現できることを明らかにした。後は本モデルをさらに高精度化してゆく予定である。

〈発表論文〉

1. Iwai H, Natori K, Shiraishi K, Iwata J, Oshiyama A, Yamada K, Ohmori K, Kakushima K, Ahmet P, “Si nanowire FET and its modeling”, SCIENCE CHINA-INFORMATION SCIENCES, 54, 1004-1011 (2011)
2. Muraguchi M, Sakurai Y, Takada Y, Shigeta Y, Ikeda M, Makihara K, Miyazaki S, Nomura S, Shiraishi K, Endoh T, “Collective Tunneling Model in Charge-Trap-Type Nonvolatile Memory Cell”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 04DD04 (2011)
3. Yamguchi K, Otake A, Kamiya K, Shigeta Y, Shiraishi K, “Atomistic Design of Guiding Principles for High Quality Metal-Oxide-Nitride-Oxide-Semiconductor Memories: First Principles Study of H and O Incorporation Effects for N Vacancies in SiN Charge Trap Layers”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 04DD05 (2011)
4. Yamaguchi K, Otake A, Kamiya K, Shigeta Y, Shiraishi K, “Universal Guiding Principle for the Fabrication of Highly Scalable MONOS-Type Memory -Atomistic Recipes Based on Designing Interface Oxygen Chemical Potential-“, TECHNICAL DIGEST OF 2010 INTERNATIONAL ELECTRON DEVICES MEETING p.122-p.125 (2010)
5. Nakayama T, Kakushima K, Nakatsuka O, Machida Y, Sotome S, Matsuki T, Ohmori K, Iwai H, Zaima S, Chikyow T, Shiraishi K, Yamada K, “Theory of Workfunction Control of Silicides by Doping for Future Si-Nano-Devices based on Fundamental Physics of Why Silicides Exist in Nature”, TECHNICAL DIGEST OF 2010 INTERNATIONAL ELECTRON DEVICES MEETING p.375-p.378 (2010)
6. Hosoi T, Saeki M, Oku Y, Arimura H, Kitano N, Shiraishi K, Yamada K, Shimura T, Watanabe H, “Comprehensive Study and Control of Oxygen Vacancy Induced Effective Work Function Modulation in Gate-First High-k/Metal Inserted Poly-Si Stacks”, TECHNICAL DIGEST OF 2010 SYMPOSIUM ON VLSI TECHNOLOGY, p.179-p.180 (2010)

7. Morooka T, Sato M, Matsuki T, Suzuki T, Shiraishi K, Uedono A, Miyazaki S, Ohmori K, Yamada K, Nabatame T, Chikyow T, Yugami J, Ikeda K, Ohji Y, “Suppression of Anomalous Threshold Voltage Increase with Area Scaling for Mg- or La-incorporated High-k/Metal Gate nMISFETs in Deeply Scaled Region”, TECHNICAL DIGEST OF 2010 SYMPOSIUM ON VLSI TECHNOLOGY, p.33-p.34 (2010)
8. Umezawa N, Shiraishi K, “Origin of high solubility of silicon in La₂O₃: A first-principles study”, APPLIED PHYSICS LETTERS, 97, 202906 (2010).
9. Muraguchi M, Endoh T, Takada Y, Sakurai Y, Nomura S, Shiraishi K, Ikeda M, Makihara K, Miyazaki S, Shigeta, “Importance of electronic state of two-dimensional electron gas for electron injection process in nano-electronic devices”, PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES, 42, 2602-2605 (2010).
10. Takada Y, Muraguchi M, Endoh T, Nomura S, Shiraishi K, “Proposal of a new physical model for Ohmic contacts”, PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES, 42, 2837-2840 (2010)
11. Iwai H, Natori K, Kakushima K, Ahmet P, Shiraishi K, Iwata J, Oshiyama A, Yamada K, Ohmori K, “Si Nanowire Device and its Modeling”, PROCEEDING OF 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION OF SEMICONDUCTOR PROCESSES AND DEVICES, p.63-p.66 (2010)
12. Muraguchi M, Takada Y, Nomura S, Endoh T, Shiraishi K, “Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot”, IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS, E93C, 563-568 (2010)
13. Lee Y, Kakushima K, Shiraishi K, Natori K, Iwai H, “Trade-off between density of states and gate capacitance in size-dependent injection velocity of ballistic n-channel silicon nanowire transistors”, APPLIED PHYSICS LETTERS, 97, 032101 (2010)
14. Lee Y, Kakushima K, Shiraishi K, Natori K, Iwai H, “Size-dependent properties of ballistic silicon nanowire field effect transistors”, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 107, 113705 (2010)
15. Kamiya K, Boero M, Shiraishi K, Oshiyama A, Shigeta Y, “Energy Compensation Mechanism for Charge-Separated Protonation States in Aspartate-Histidine Amino Acid Residue Pairs”, JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY B, 114, 6567-6578 (2010)
16. Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kwashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, G. F. Bertsch, "Coherent phonon generation in time-dependent density functional theory", Phys. Rev. B 82, 155110 (2010)
17. Takahiro Yamamoto, Kenji Sasaoka, and Satoshi Watanabe, “Universal Transition between Inductive and Capacitive Admittance of Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes”, Phys. Rev. B 82, 205404 (2010).
18. Kenji Sasaoka, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe, “A Numerical Approach to Transient

- Currents in a Quantum Dot Connected to a Single Electrode”, ECS Trans. 33, 85 (2010).
19. Isao Maruyama, Sho Tanaya, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, “Z₂ topological number of local quantum clusters in the orthogonal dimer model”, Proceedings of the International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM) 2011:J. Phys.: Conf. Ser. 200 (2010) 022075
 20. “Guiding principles for charge trap memories -A theoretical approach-”, Kenji Shiraishi, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Proceeding of Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT) 2010 - Shanghai, China, p1096 (2010).
 21. Kenji Shiraishi, Takuji Hosoi, Heiji Watanabe, and Keisaku Yamada, “Control of Gate Metal Effective Work Functions and Interface Layer Thickness by Designing Interface Thermodynamics Based on Heteroatom Incorporation into High-k HfO₂ Gate Dielectrics”, ECS Trans. **33** (6), 479-486 (2010)
 22. Keita Yamaguchi, Akira Otake, and Kenji Shiraishi, “Effect of Heteroatom for Nitrogen Vacancy in SiN/SiO₂ Interface Layer in MONOS-Type Memories”, ECS Trans. **33** (6), 243-251 (2010)
 23. Keita Yamaguchi, Kenji Shiraishi, Akira Otake, and Kenji Kobayashi, “Atomistic Guideline for MONOS-Type Memories with High Program/Erase Cycle Endurance”, ECS Trans. **28** (2), 403-410 (2010)
 24. R. Hasunuma, C. Tamura, T. Nomura, Y. Kikuchi, K. Ohmori, M. Sato, A. Uedono, T. Chikyow, K. Shiraishi, K. Yamada and K. Yamabe, “Degradation in HfSiON film induced by electrical stress application”, ECS Trans. **28** (2), 263-272 (2010)
 25. Yukihiro Takada, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Shintaro Nomura, and Kenji Shiraishi, “Investigation of the New Physical Model of Ohmic Contact for Future Nanoscale Contacts”, ECS Trans. **28** (1), 73-79 (2010)
 26. Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara and S. Miyazaki, “Electron Tunneling Between Si Quantum Dots and Two Dimensional Electron Gas under Optical Excitation at Low Temperatures”, ECS Trans. **28** (1), 369-374 (2010)
 27. Akira Otake, Keita Yamaguchi, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, “An atomistic study on hydrogenation effects toward quality improvement of program/erase cycle of MONOS- type memory”, IEICE Transactions, Vol.E94-C,No.5, (2011). in press.
 28. Y. Ebihara, K. Kamioya, A.A. Ymaguchi, and K. Shiraishi, “Intrinsic origin of the breakdown of quasi-cubic approximation in nitride semiconductors”, Phys. Status Solidi C, 1–3 (2011) / DOI 10.1002/pssc.201001085,
 29. “酸素の化学ポテンシャルデザインに基づく MONOS 型メモリーの原子レベルの設計指針”, 山口慶太、大竹朗、神谷克政、重田育照、白石賢二, IEDM 特集(先端 CMOS デバイス・プロセス技術) 予稿集 - 東京, p25 (2011).
 30. “第一原理計算に基づいた MONOS 型メモリ動作機構の理解”, 白石賢二, 山口慶太, 応用物理 79 巻 p1098 (2010).

<学術講演>

<国際会議招待講演>

1. K. Ohmori, T. Matsuki, Y. Ohkura, J. Yugami, K. Ikeda, Y. Ohji, Y. Yasuda, T. Endoh, K. Shiraishi, K. Yamada, "Effect of carrier scattering phenomena on drain current variability in Si MOSFET" 217th Electrochemical Society Meeting, Vancouver, Canada, Apr. 25-30th, 2010.
2. Ryu Hasunuma, Chihiro Tamura, Tsuyoshi Nomura, Yuuki Kikuchi, Kenji Ohmori, Motoyuki Sato, Akira Uedono, Toyohiro Chikyow, Kenji Shiraishi, Keisaku Yamada, Kikuo Yamabe, "Degradation in HfSiON film induced by electrical stress application", 217th Electrochemical Society Meeting, Vancouver, Canada, Apr. 25-30, 2010.
3. K. Ohmori, T. Matsuki, Y. Ohkura, J. Yugami, K. Ikeda, Y. Ohji, Y. Yasuda, T. Endoh, K. Shiraishi, K. Yamada, "Influence of carrier transport phenomena on drain-current variability of MOSFETs" International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), Shanghai, China, Nov. 1-4, 2010.
4. K. Shiraishi, K. Yamaguchi, A. Otake and K. Kobayashi, "Atomistic Guideline for MONOS-Type Memories with High Program/Erase Cycle Endurance", 217th Meeting of Electrochemical Society, April 25-30, Vancouver, BC, Canada
5. K. Shiraishi, K. Yamaguchi, A. Otake, K. Kamiya, and Y. Shigeta, "Guiding Principles for Charge Trap Memories -A Theoretical Approach-", International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, November 1-4, 2010, Shanghai, China
6. Kenji Shiraishi, "Crucial Contribution of First Principles Calculations for Modern Nano-Scale Semiconductor Devices", The 13th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, November 1-3, 2010, POSTECH, Pohang, Korea
7. H. Iwai, K. Natori, K. Kakushima, P. Ahmet, K. Shiraishi, J. Iwata, A. Oshiyama, K. Yamada, K. Ohmori, "Si Nanowire Device and its Modeling", The International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices 2010 (SISPAD), Sep.6-8, Bologna, Italy

<国内学会招待講演>

1. 中山隆史、角嶋邦之、中塚理、町田義明、五月女真一、松木武雄、大毛利健治、岩井洋、財満鎮明、知京豊裕、白石賢二、山田啓作、「ドーピングによるシリサイドの仕事関数の変調:シリサイドの物理に基づく理論」、SDM研究会「IEDM特集(先端CMOSデバイス・プロセス技術)」(2011年1月31日、東京)
2. 白石賢二、「CMOSの限界と将来のBeyond CMOSへの課題」、2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会シンポジウム「シリコンテクノロジーの未来像を徹底的に考える-Never Ending Silicon Technology-」、2010年9月14日-17日、長崎大学、長崎

3. 山口慶太、大竹朗、神谷克政、重田育照、白石賢二、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 IEDM 特集(先端 CMOS デバイス・プロセス技術)、“酸素の化学ポテンシャルデザインに基づく MONOS 型メモリーの原子レベルの設計指針”, 2011 年 1 月 31 日、機械振興会館、東京

<一般講演>

1. "Large-scale first-principles electronic structure calculations for silicon nanostructures", J.-I. Iwata, A. Oshiyama, K. Shiraishi, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS30), July 25-30, 2010, Seoul, Korea
2. 「時間依存密度汎関数理論による半導体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、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁、G.F. Bertsch, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日-26 日、大阪府立大学
3. 「独立並列計算による行列固有値分布の確率的推定法」、二村保徳, 多田野寛人, 櫻井鉄也, 岩田潤一(筑波大学)、金沢市文化ホール、2010 年 8 月 3 日-8 月 5 日
4. CMSI・次世代ナノ情報合同研究会、「高強度短パルスレーザーに誘起される電子-格子ダイナミクスの第一原理計算」、篠原康、乙部智仁、岩田潤一、矢花一浩、G.F. Bertsch、東京大学物性研究所, 2011 年 1 月 5 日~1 月 7 日
5. 「実空間密度汎関数理論に基づく Car-Parrinello 分子動力学法の実装」、重田育照、小泉健一、神谷克政、岩田潤一、押山淳、大阪大学豊中キャンパス, 2010 年 9 月 14 日-17 日
6. "Structural stability and energy bands of Si nanowires along [110] direction", Dongchul Sung, J.-I. Iwata, A. Oshiyama, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS30), July 25-30, 2010, Seoul, Korea
7. "Breakdown of the quasicubic approximation in GaN and InN -A Theoretical Approach-", Y.Ebihara, K. Shiraishi and A.A. Yamaguchi 第 29 回電子材料シンポジウム, Izu, July, 14-16 (2010), Th2-2
8. "Theoretical Studies on Deformation Potentials of Strained Nitride Semiconductor Films", Y.Ebihara, K. Shiraishi and A.A. Yamaguchi, 4th AEARU Workshop, Tsukuba, August.29-September.3 (2010), P-42.
9. 「擬立方晶近似の妥当性についての理論的考察」、海老原康裕、白石賢二、山口敦史、第 71 回応用物理学会学術講演会, Nagasaki, September.14-17 (2010), 15p-B-3
10. "Intrinsic Origin of the Breakdown of Quasi-Cubic Approximation in Nitride Semiconductors", Y.Ebihara, K. Shiraishi and A. A. Yamaguchi, IWN2010, Tampa, September.19-24 (2010), F2.6,
11. 「第一原理計算を用いた窒化物半導体の変形ポテンシャルの算出」、海老原康裕、神谷克政、白石賢二、山口敦史、第 58 回応用物理学関係連合会, Atsugi, March.24-27 (2011), 26p-BY - 8
12. 「量子ポイントコンタクトにおける交流応答の形状効果」、笹岡健二〇, 山本貴博, 渡邊聡, 白石賢二、日本物理学会, 第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月、震災により Web 公開
13. "Transient and AC Electric Transport in Mesoscopic Devices", Kenji Sasaoka, Takahiro Yamamoto,

Satoshi Watanabe, and Kenji Shiraishi, Workshop in Simulation and Modeling of Emerging Electronics (SMEE), Hong Kong , Dec.6-10,2010

14. "A Numerical Approach to Transient Currents in a Quantum Dot Connected to a Single Electrode", Kenji Sasaoka, Takahiro Yamamoto, Satoshi Watanabe, and Kenji Shiraishi, 218th ECS Meeting - Las Vegas, USA.,Oct.10-15,2010
15. "Analysis of Single Electron Emission from a Quantum Dot by Non-Equilibrium Green's Function Method in Time Domian", Kenji Sasaoka, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe 30th International Conference of the Physics of Semiconductors (ICPS) 2010, Seoul.,July 25-30,2010
16. "Real time analysis of single electron emission from a quantum dot into an electrode by non-equilibrium Green's function technique", Kenji Sasaoka, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (ISTESNE) 2010, Tokyo (Poster),June 3-5,2010
17. "Edge States of Graphene in Magnetic Fields: Effects of Second-Neighbor Hopping", M. Arikawa, Y.Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010, 2010/07/07 京都国際会議会館
18. " Z_2 Berry phase in 2D orthogonal dimer mode", Sho Tanaya, Isao Maruyama, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, XXIV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys24), 2010/07/20, Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia
19. "Equivalence of different expressions on the density matrix of Gutzwiller wave function", Mitsuhiro Arikawa, XXIV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys24), 2010/07/20, Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia
20. "Dynamics of the $S = 1/2$ spin chains with Ising anisotropy", XXIV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys24), Jun Sato, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Saiga , 2010/07/23, Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia
21. "Robustness of the edge states in graphene quantum Hall system: does the chiral symmetry degraded by t' matter?", Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), 2010/07/27, COEX,Seoul, Korea
22. "Entanglement entropy of the bond order phase in graphene in magnetic fields", Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), 2010/07/29, COEX,Seoul, Korea
23. "Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder", Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), 2010/08/03, Fukuoka International Congress Center
24. "Topological characterization of 2D orthogonal dimer model", Sho Tanaya, Isao Maruyama, Mitsuhiro

- Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, The international conference Highly Frustrated Magnetism 2010 (HFM 2010), 2010/08/03, The Homewood campus of the Johns Hopkins University, USA
25. 「 $S=1/2$ 2次元パイロクロア格子における Z2 ベリー位相」、棚谷翔, 有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘、日本物理学会 2010 年秋季大会 (25aTE-12) 2010/09/25、大阪府立大学
 26. 「グラフェン端状態のカイラル対称性の破れに対する安定性」、有川晃弘, 青木秀夫, 初貝安弘、日本物理学会 2010 年秋季大会 (23aXA-7), 2010/09/23、大阪府立大学
 27. 「二次元パイロクロア格子上の $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型に対する Z2 ベリー位相を用いた相同定」、棚谷翔, 有川 晃弘, 丸山勲、初貝安弘、第 4 回 物性科学領域横断研究会、2010/11/13、東京大学武田先端知ビル 5F 武田ホール
 28. 「Calogero-Sutherland 模型の動力学」、有川晃弘、第 6 回 数理物理・物性基礎論セミナー、2010/12/04、お茶の水女子大学 理学部
 29. “Wave packet dynamics in the spin torque transfer”, 有川晃弘, 初貝安弘, 白石賢二、第 15 回 半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-15、2010/12/21、筑波大学計算科学センター
 30. “Z2 topological number of local quantum clusters in the orthogonal dimer model”, Isao Maruyama, Sho Tanaya, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM), 2011/01/11, Sendai International Center, Sendai, Japan
 31. “Electron wave packet dynamics in the spin torque transfer”, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi, The 1st CSIS International Symposium on Spintronics-based VLSIs and The 7th RIEC International Workshop on Spintronics, 2011/02/03, Laboratory for Nanoelectronics and Spintronics, Tohoku University
 32. 「波束ダイナミクスにおけるスピントランスファートルク」、有川晃弘, 岩田潤一, 初貝安弘, 白石賢二、日本物理学会第66回年会、2011/03/26、震災により Web 公開
 33. “Theoretical Study of the Hydrogen Effect on the Program/Erase Cycle of MONOS-Type Memories”, Akira Otake, Keita Yamaguchi, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 2010 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, 東京工業大学, 2010 年 6 月. 口頭発表
 34. “Atomistic Design of Guiding Principles for High Quality MONOS Memories-First Principles Study of H and O Incorporation Effects for N Vacancies in SiN Charge Trap Layers”, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, 東京大学, 2010 年 9 月. 口頭発表
 35. “Effect of Heteroatom to a Nitrogen Vacancy in a SiN/SiO₂ Interface Region in MONOS-Type Memories”, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 218th ECS Meeting, Las Vegas, NV, 2010 年 10 月. ポスター発表
 36. “Atomistic Design of Interface Layer for MONOS-Type Memories with High Program/Erase Cycle Endurance”, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 41st

IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference, San Diego, CA, 2010 年 12 月. 口頭発表

37. “Universal Guiding Principle for the Fabrication of Highly Scalable MONOS-Type Memory -Atomistic Recipes Based on Designing Interface Oxygen Chemical Potential-“, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 2010 International Electron Devices Meeting, San Francisco, 2010 年 12 月. 口頭発表
38. “界面酸素の化学ポテンシャルデザインに基づく極微細 MONOS 型メモリーの原子レベルの設計指針”, Keita Yamaguchi, Akira Otake, Katsumasa Kamiya, Yasuteru Shigeta, Kenji Shiraishi, 春期第 58 回応用物理学会, 神奈川工科大学, 2011 年 3 月. 口頭発表
39. 「EMC-MDシミュレーションによる電流揺らぎのチャネル幅依存性評価」、神岡武文、大毛利健治、白石賢二、鎌倉良成、渡邊孝信、2010年 秋季 第71回応用物理学会学術講演会(2010年9月14-17日)
40. 「微細MOSFETドレイン電流ばらつきゲート/ドレイン電圧依存性」、大毛利健治、白石賢二、山田啓作、2010年 秋季 第71回応用物理学会学術講演会(2010年9月14-17日)
41. 「Poly-Si/TiN/HfO₂/SiO₂ ゲートスタック MOSFET の低周波ノイズ特性に対するゲートファーストプロセスの影響」、松木武雄、ランガ ヘッティアラッチ、フェン ウェイ、白石賢二、山田啓作、大毛利健治、ゲートスタック研究会 ー材料・プロセス・評価の物理ー(第16回研究会)(2011 年 1 月 21 日~23 日、東京工業大学)
42. 「低温における Si ナノワイヤーの発光特性」、櫻井蓉子、大毛利健治、山田啓作、角嶋邦之、岩井洋、白石賢二、野村晋太郎、日本物理学会 第 66 回年次大会(2011 年 3 月 25-28 日)
43. 「デバイス評価に向けた Si ナノワイヤーの発光測定」、櫻井蓉子、大毛利健治、山田啓作、角嶋邦之、岩井洋、白石賢二、野村晋太郎、2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会(2011 年 3 月 24-27 日、神奈川工科大学)
44. 「EMC-MD シミュレーションによる電流揺らぎのチャネル幅依存性評価」、神岡武文、大毛利健治、白石賢二、鎌倉良成、渡邊孝信、第 71 回応用物理学会学術講演会、14a-ZE-6、長崎大学、2010 年 9 月 14 日.
45. 「EMC-MD シミュレーションによる電流揺らぎのチャネル幅依存性評価(II)」、神岡武文、大毛利健治、白石賢二、鎌倉良成、渡邊孝信、2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会(2011 年 3 月 24-27 日、神奈川工科大学)
46. “Proposal of a new electronic structure model of Ohmic contacts for the future metallic source and drain”, Yukihiro Takada, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Shintaro Nomura, Kenji Shiraishi, 10th International Workshop on Junction Technology, May 10 - 11, 2010 Shanghai, China

<受賞>

1. 白石賢二、表面科学会フェロー 2010 年 5 月
2. 山口慶太、IEEE Japan Chapter Student Award 2011 年 1 月

VII-6 ナノ構造物性グループ

メンバー：岡田 晋(准教授)
高木祥光(研究員)
小鍋 哲(研究員)

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

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

研究成果

複合構造構築による六方晶窒化ホウ素の電子状態制御[論文3,15,18]

六方晶窒化ホウ素(h-BN)は、ホウ素と窒素からなる蜂の巣格子状ネットワークを有する層状物質であり、数eVのバンドギャップを有する絶縁体である。すなわち、グラファイト/グラフェンの絶縁体版である。ここでは、このh-BNの層間へのアルカリ原子導入、h-BNスラブへの外部電界印加により、h-BNが容易に金属化することを示した。また、その電子状態の詳細な解析から、伝導に寄与する電子系は、h-BNの層間に分布を有する自由電子的状態であることがあきらかになり、そのフェルミ面の形状はグラファイト層間化合物のそれと定性的に一致することを示した。この結果から、h-BN/アルカリ金属複合体、h-BN/電界複合体が、全く新たな超伝導材料の候補になり得ることを予言した。他方、電子の有効質量の解析から、キャリアの移動度は高々自由電子程度であり、高速動作を要求される半導体材料の伝導チャンネルとなり得ないことが明らかになった。

菱面体相グラファイト薄膜の磁性状態の電界制御[論文4]

菱面体相グラファイト(ABCABC..積層グラファイト)薄膜はその(0001)表面において、フェリ磁性的な磁気秩序を有することが我々の計算から明らかになっている[図 (a)]。その磁性状態の起源はフェルミレベル近傍かつ波数空間端に発現する平坦バンドによるものである。ここでは、その磁性状態を面鉛直方向の電場により制御し、新たな磁性状態への相転移が起こりえることを理論的に予言した。すなわち、電界下において菱面体相グラファイト薄膜はその負電極に面した表面において、強磁性的な次期秩序を有する[図(b)]。この結果は、グラファイト薄膜の磁性材料応用の可能性を提案したものである。

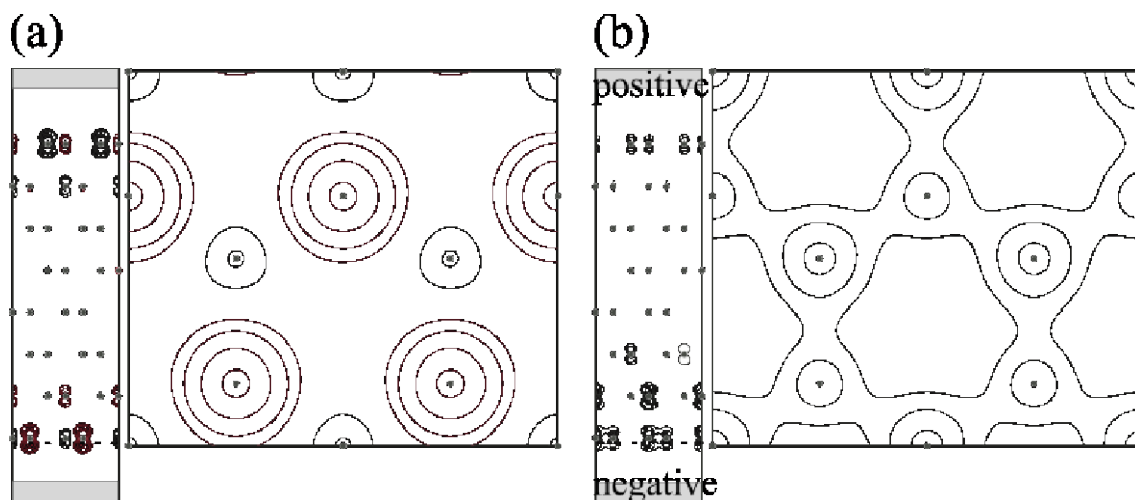
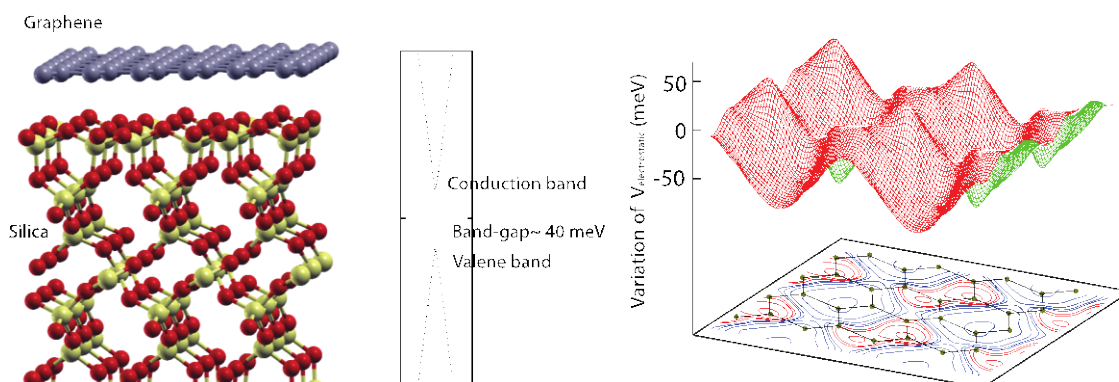


図:(a)電界非印加時の菱面体グラファイト薄膜のスピンドensity分布。(b) 電界印加時(2.6V/nm)の菱面体グラファイト薄膜のスピンドensity分布。

絶縁体基板によるグラフェン電子構造変調[文献 15]

今日の半導体工学において広く用いられている、酸化シリコン基板上に吸着された、グラフェンの基礎物性の解明を行った。本研究では、酸化シリコン基板の構造モデルとして、 α クオーツの(0001)面を考え、その上にグラフェンシート、2層グラフェンが吸着された、構造のエネルギー論と電子状態の探索を行った。その結果、グラフェン吸着によるエネルギー利得は炭素原子一原子あたり凡そ数十 meV と、典型的な物理吸着系であることが明らかになった。一方、電子状態は相互作用が非常に弱い吸着系であるにも関わらず、顕著な変調を受けることが明らかになった。すなわち、基板上においては、本来金属であるグラフェンは、基板の作り出す静電的なポテンシャル変調の影響を受けて、数十 meV のバンドギャップを有する半導体となる。



図：酸化シリコン上のグラフェンの構造、バンドギャップ、静電ポテンシャルの空間変調。

吸着原子がグラファイト電子状態に及ぼす影響[文献 13]

次に、原子吸着によるグラファイト表面電子物性変調を明らかにするため、Pt を真空蒸着した高配向性熱分解グラファイト(HOPG)表面の電子状態を、極低温走査トンネル顕微鏡(STM)を用いた走査トンネル分光(STS)計測により詳細に調べた。この結果、白金微粒子は2~4nm 程度の幅を持つ1~2原子層程度の高さのクラスターとしてグラファイト表面上に堆積しており、白金微粒子の極近傍の炭素上において、通常のグラファイト表面では現れない鋭い電子状態密度ピークがフェルミエネルギー近傍に観測された。非弾性トンネル分光による局所フォノン構造計測や第一原理計算結果より、この電子状態密度ピークは Pt が炭素と混成軌道を形成したことで現れた炭素の非結合 π 電子準位であると帰属した。即ち、Pt が炭素と結合したことでグラファイトの π 共役系が崩れ炭素の非結合 π 電子準位がフェルミエネルギー近傍に現れたものと考えられる。この結果は、ある種の金属原子、クラスター吸着によりグラフェンのフェルミレベル近傍の電子状態の制御が可能であることを示したものである。

金属表面上のカーボンナノチューブ[文献 16]

金表面とパラジウム表面に吸着した半導体型単層カーボンナノチューブの電子状態を第一原理計算によって調べた。これらの計算により、金属の上に吸着した単層カーボンナノチューブの電子状態は金属種に依存した変更を受けることが明らかになった。金表面上の単層カーボンナノチューブの電子状態は、孤立した単層カーボンナノチューブの電子状態とあまり変わらないが、金属表面に面した炭素原子上には、カーボンナノチューブのバンドギャップ内に有限の状態密度が存在する。一方、パラジウム表面上の単層カーボンナノチューブの電子状態は、パラジウム表面の d 軌道とカーボンナノチューブの π 軌道の強い混成により、孤立した単層カーボンナノチューブの電子状態とは大きく異なる。パラジウム表面上の単層カーボンナノチューブにおいては金属表面に面する側、その反対側ともバンドギャップは存在しない。また、電子の分布からも、金表面上の単層カーボ

ンナノチューブは金表面とはあまり結合を起こさないが、パラジウム表面とは強く混成していることがわかる。これらの計算結果は単層カーボンナノチューブを用いた電子デバイスの作製には電極に用いる金属の影響を考慮しなければならないことを示唆している。

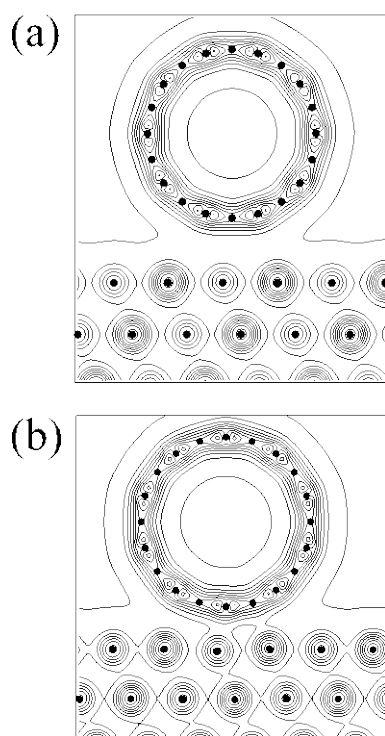


図: 金属上に吸着された CNT の電荷密度(a)金表面と(b)パラジウム表面

原子吸着によるカーボンナノチューブ光学特性の変調[文献 1,21]

水素原子が吸着したカーボンナノチューブの光吸収を調べた。水素原子吸着によりスピン軌道相互作用が有効的に増大することに注目し、その効果をベーテ・サルピータ方程式に取り入れ励起子状態を計算した。さらに、得られた励起子状態を用いて光吸収スペクトルを計算した。その結果、吸着水素原子数の増加に伴い一重項励起子と三重項励起子の混成がおき、本来光学禁制である三重項励起子による光吸収がおきることを示した。さらに、実験グループとの共同研究により、水素原子吸着カーボンナノチューブの光学特性を調べ、蛍光スペクトルに現れる三重項励起子による発光ピークの微視的機構を明らかにした。特に、水素原子吸着による一重項励起子と三重項励起子の項間交差効率を計算し、その吸着水素原子密度依存性を明らかにした。

磁性原子内包ナノチューブに於ける光学特性の変調[文献 17]

磁性物質を内包したカーボンナノチューブの光学特性を調べた。カーボンナノチューブの光励起状態である励起子はベーテ・サルピータ方程式を強束縛近似のもとで解くことで求まる。本論文では、電子・正孔のスピンの内包磁性物質の局在スピンの交換相互作用をベーテ・サルピータ方程式に加えて解くことにより、内包磁性物質の状態を反映した光学スペクトルを求めた。その結果、吸収スペクトル

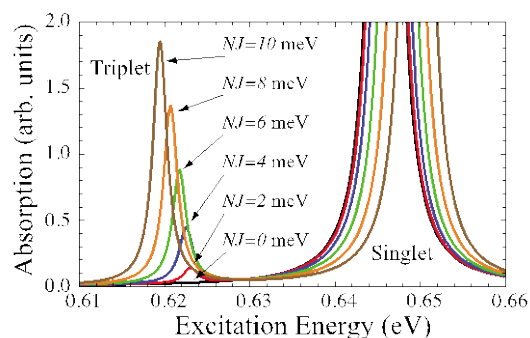


図1 吸収スペクトル

に本来光学禁制であるスピン三重項励起子による吸収ピークが現れることがわかった(図)。この結果は内包磁性物質の磁性状態を調べる手段として光学的手法が有効であることを示している。

まとめ

我々は量子論に立脚した計算科学の手法を基に、種々のナノカーボン物質、さらに、それらから構築される複合構造体の物性の解明を行った。特に、グラフェン、カーボンナノチューブにおいては、欠陥、原子吸着等も含んだ広義複合構造形成により、その基礎物性が劇的に変調されることを見いだした。この結果は、これらナノカーボン物質を用いた、ナノスケールデバイス実現、設計においては、ナノカーボン物質自身の物性のみならず、複合構造を考慮にいたった統合的な物質設計が必須であることを意味している。また、同時に、複合構造に依る物性変調を積極的に取り込んだ、新奇機能性材料実現の可能性も提示したものである。

発表論文

1. K. Nagatsu, S. Chiashi, S. Konabe, and Y. Homma, "Brightening of Triplet Dark Exciton by Atomic Hydrogen Adsorption in Single-Walled Carbon Nanotubes Observed by Photoluminescence Spectroscopy", *Physical Review Letters* **105**, 157403 (2010).
2. Satoru Konabe, Nobuhito Onoda, and Kazuyuki Watanabe, "Auger Ionization in Armchair-Edged Graphene Nanoribbons", *Physical Review B* **82**, 073402 (2010).
3. Susumu Okada and Minoru Otani, "Stability and electronic structure of potassium-intercalated hexagonal boron nitride from density functional calculations", *Physical Review B* **81**, 233401 (2010).
4. Minoru Otani, Yoshiteru Takagi, Mikito Koshino, and Susumu Okada, "Phase Control on Magnetic State of Graphite Thin Films by Electric Field", *Applied Physics Letters*, **96**, 242504

- (2010).
5. Susumu Okada, "Energetics of ultimate silicon nanowire confined in nanospace", Japanese Journal of Applied Physics, **49**, 065001 (2010).
 6. Satoru Konabe, Takahiro Yamamoto, and Kazuyuki Watanabe, "Photocurrents in Carbon Nanotubes with Various Diameters under High-Intensity Laser Irradiation", Japanese Journal of Applied Physics **49**, 02BD06 (2010)
 7. Minoru Otani and Susumu Okada, "Field-Induced Free Electron Carriers on Graphite", Journal of Physical Society of Japan, **79**, 073701 (2010).
 8. Soon-Kil Joung, Toshiya Okazaki, Susumu Okada, and Sumio Iijima, "Intermolecular Interaction between Single-Wall Carbon Nanotubes and Encapsulated C₆₀ Probed by Resonance Raman Spectroscopy", Physical Chemistry Chemical Physics, **12**, 8118 - 8122 (2010).
 9. Tasuku Chiba and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of Na-Doped C₆₀ Polymers", Journal of Physical Society of Japan. **79**, 084702 (2010).
 10. Yoshifumi Izu, Junichiro Shiomi, Yoshiteru Takagi, Susumu Okada, and Shigeo Maruyama, "Growth mechanism of single-walled carbon nanotube from catalytic reaction inside carbon nanotube template", ACS NANO, **4**, 4769 - 4775 (2010).
 11. Shingo Okubo, Toshiya Okazaki, Kaori Hirose, Kazu Suenaga, Susumu Okada, Shunji Bandow, and Sumio Iijima, "Electronic Structures of Single-Wall Carbon Nanotubes Encapsulating Ellipsoidal C₇₀", Journal of American Chemical Society, **132**, 15252-15258 (2010).
 12. Hisao Miyazaki, Kazuhito Tsukagoshi, Akinobu Kanda, Minoru Otani, Susumu Okada, "Influence of Disorder on Conductance in Bilayer Graphene under Perpendicular Electric Field", Nano Letters, **10**, 3888-3892 (2010).
 13. Soon-Kil Joung, Toshiya Okazaki, Susumu Okada, and Sumio Iijima, "Host-guest interaction between single-wall carbon nanotubes and encapsulated C₆₀ probed by resonance Raman spectroscopy", physica status solidi (B), **247**, 2700-2702 (2010).
 14. Susumu Okada, Takazumi Kawai, and Kyoko Nakada, "Electronic Structure of Graphene with Topological Line Defect", Journal of the Physical Society of Japan, **80**, 013709 (2011)
 15. Susumu Okada and Minoru Otani, "Electron-state Control of Hexagonal Boron Nitride: Carrier Injection into Inter-layer Band", physica status solidi (C), **8**, 500-502 (2011).
 16. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Electronic-state Modulation on Single-Walled Carbon Nanotube Adsorbed on Metal Surfaces", physica status solidi (C), **8**, 564-566 (2011).

17. Satoru Konabe and Susumu Okada, "Method for probing the magnetic state of nanomaterials encapsulated in carbon nanotubes" Applied Physics Letters, **98**, 073109 (2011).
18. Minoru Otani and Susumu Okada, "Gate-Controlled Carrier Injection into Hexagonal Boron Nitride", Physical Review B **83**, 073405 (2011).
19. Nguyen Thanh Cuong, Minoru Otani, and Susumu Okada, "Semiconducting Electronic Property of Graphene Adsorbed on (0001) Surfaces of SiO₂", Physical Review Letters, **106**, 106801 (2011).
20. Nobuhito Onoda, Satoru Konabe, Takahiro Yamamoto, and Kazuyuki Watanabe, "Auger ionization in carbon nanotubes and graphene nanoribbons under laser irradiation", physical status solidi (c) **8**, 570 (2011)
21. Satoru Konabe and Kazuyuki Watanabe, "Mechanism for the optical activation of dark spin-triplet excitons in hydrogenated single-walled carbon nanotubes", Physical Review B **83**, 045407 (2011)

新聞発表

日刊工業新聞 2011年3月4日：グラフェンが半導体に~絶縁体基板使い”変身”

VIII 生命物理グループ

准教授 舘野賢

助教 庄司光男

大学院生 (8名)

【1】 RNA・タンパク質複合体系 (アミノアシル tRNA 合成酵素、DNA メチル化酵素)

アミノアシル tRNA 合成酵素 (aaRS) は実際の生命の持つ酵素であり、タンパク質合成の過程で重要な役割を果たす。しかしながらその完全な立体構造は未だ解かれておらず、酵素反応機構も未だ明らかにされていない。われわれは aaRS の中でもアミノ酸の一種であるイソロイシンに特異的に反応活性を持つイソロイシル tRNA 合成酵素 (IleRS) に注目し、これまで立体構造が解かれていた低分解能全体構造と反応活性を持つドメインのみの高分解能立体構造を理論的に組み合わせて、IleRS 全体の全原子立体構造を構築することを試みた。

ホモロジーモデリングを行い、全体の立体構造に対してドメイン部分の立体構造を当てはめることでタンパク質の立体構造予測を行った。次に、その構造に対して分子動力学計算を行い、より適切な構造を構築した。

それにより IleRS におけるイソロイシン基質の分子認識機構について明らかにした。とくにこの酵素はアミノ酸の中からイソロイシン基質だけを認識する過程を担っており、この過程を解明できたことはタンパク質合成過程においてきわめて重要である。また、この立体構造を理論的に構築できたことで、より高精度な計算手法 (QM/MM 法等) を適用することがはじめて可能となり、より詳細な化学反応過程を探求できるようになったことも極めて大きな進展である。

一方、DNA メチル化酵素は DNA 分子内のシトシンやアデノシンをメチル化する酵素であり、バクテリアから哺乳類まで広く存在し、細胞分化や遺伝子制御などにおいて重要な役割を果たしている。Haemophilus haemolyticus が有する M. HhaI は、塩基配列 5'-GCGC-3' を特異的に認識し、5' 側のシトシンの C5 炭素原子にメチル基を付加する。Bruce らによる理論的解析によれば、Glu119 からこのシトシンの N3 原子へのプロトン移動については、エネルギー障壁 (2.2 kcal/mol) およびプロトン移動前後のエネルギー変化 (-0.7 kcal/mol) が低く見積もられ、Glu119 は反応に寄与しないと報告された。ところが速度論的測定によれば、Glu119 の変異体の活性は著しく低下し、重要なアミノ酸残基であることが示唆されている。われわれは、これらの矛盾を解決するために

QM/MM 分子動力学計算を用い、Glu119 の機能的な役割を解析した。その結果、前述のプロトン移動における活性化エネルギー (8.1kcal/mol) と移動前後のエネルギー変化 (-2.2kcal/mol) は Bruce らの結果と著しく異なり、実験結果とよい一致をみた。HhaI DNA メチル化酵素特有の反応機構の詳細について解明を行った。

【2】タンパク質の DNA 認識とその電子構造の制御機構

生体内においては一般に、DNA の周囲に溶媒 (水分子) が存在するが、転写因子 (タンパク質) が DNA に結合すると、DNA の一部の塩基は、転写因子によって溶媒 (水) からマスクされる。溶媒が離れた (タンパク質が結合した) 塩基の分子軌道は、エネルギー順位が変化し、一般により不安定になることを見出した (その塩基内の分子軌道のエネルギーが上昇する)。そこでさらに、DNA の表面が溶媒に露出している面積 Solvent Accessible Surface Area (ASA) を計算し、溶媒と DNA との相互作用を定量化した結果、上記の分子軌道エネルギー順位の上昇との間に、密接な相関 (線形性) が存在することを初めて導いた。これは、DNA をリガンドとする酵素などの反応・機能のしくみを解析するなどの目的にも、新しい視点を提供するものである。

以上は、DNA-タンパク質複合体の全体を、ハイブリッド QM/MM 計算によって取り扱うことで初めて可能となった (同じ対象を、複数の異なる QM/MM スキームによって計算し、それらの電子構造を比較)。これらの解析は複合体全体の FullQM 計算や、一部分を取り出した QM 計算では不可能である。

【3】カチオン (プラスイオン) と π 電子との相互作用

阪大のグループによって、2009 年タンパク質構造内部に、 π 電子と Na⁺イオンとの結合が初めて見出されたが、(Na⁺イオンではなく) 水分子の結合である可能性が否定できなかった。我々は、阪大の研究者と共同で、見出された電子密度が Na⁺イオンであることを示した。その後さらに、Na⁺イオンを水に置き換えると、タンパク質構造が不安定になることも示し、その原因についても解明した。

このようなカチオン・ π 電子相互作用は、医薬品がタンパク質に結合する際など、一般に広く見られると考えられ、きわめて重要な相互作用である。しかしながら、その立体構造や相互作用についてはこれまで明らかにされていなかった。本研究ではその存在の証明と、新しい機能単位の発見、さらにその機能的な役割と仕組みについて解明できた為、極めて重要であると考えられる。

【4】ヘモグロビンの立体構造および水和構造の変化による酸素親和調節機構

ヘモグロビンは酸素濃度が高く CO₂濃度が低い肺(酸素の吸着)から、逆に、酸素濃度が低く CO₂濃度が高い組織(酸素の放出)へと酸素を運搬するタンパク質である。酸素の吸着と放出という異なる機能を一つのタンパク質で実現するためにヘモグロビンには酸素親和調節機能が備わっている。ヘモグロビンは 4 つのタンパク質(サブユニット)が会合した構造をとるが、このサブユニット間のコミュニケーションが酸素親和調節に重要であることが知られている。

タンパク質の構造と機能の研究の歴史の初期の段階におけるもっとも重要な研究は M. F. ペルツによるヘモグロビンの結晶構造の解明(1962年ノーベル化学賞)である。さらにペルツは酸素結合型と酸素非結合型ヘモグロビンの立体構造の違いから酸素親和調節機構を説明した(ペルツの機構, 1971年)。これはタンパク質の構造と機能の関係の最も代表的な例として浸透しており、生化学の教科書で必ず触れられるテーマでもある。

しかし、近年の実験でペルツの機構だけでは説明のつかない酸素親和調節が観測されるようになった。我々の研究の最終的な目的はヘモグロビンの酸素親和調節機構の謎を解明することである。

我々は古典力場による分子動力学計算を用いてこの問題にアプローチした。近年の計算機の性能の進歩は、より規模の大きい長時間のシミュレーションを可能にしたが、その一方で計算の精度はないがしろにされてきた。実際に、ヘモグロビンに対して行われた分子動力学計算では酸素非結合型が酸素結合型の構造に遷移するという多くの実験と矛盾する結果が報告されている。一方で、我々の計算の特徴は計算精度の向上を目指した点にある。

まず我々が行ったのは計算初期の水和構造の最適化である。タンパク質の分子動力学計算では通常、一分子を直方体の溶媒ボックスの中に埋めて、これを周期的境界条件でつなぐことで、実際の溶液中に近い状態を実現している。しかし、一般的な手法で溶媒水を配置するとヘモグロビンの場合、サブユニット間の空孔に十分な溶媒が配置されず結果として直方体の溶媒ボックスが欠けてしまうという問題があることが分かった。我々は初期の水和構造を最適化することによりこれを解決した。

また、分子動力学計算に用いる力場の評価を行い、ヘモグロビンの分子動力学計算に最も適切な力場を検証した。同時に従来いくつかの力場ではタンパク質中に一般に存在するグリシンのコンフォメーションを再現することが困難であることを示した。

こうした計算の精密化は我々に非常に重要な結果をもたらした。我々はヘモグロビンの水和構造の精密な解析を行い、結果としてサブユニット間の水を含んだ相互作用ネットワークを発見し、これに基づき全く新しい酸素親和調節機構を提案した。これは酸素の

結合により一つのサブユニットに起きた変化が少しの構造の変化と上記のネットワークを介して全てのサブユニットに伝搬し酸素親和性を変化させるというもので、現状報告されているモデルと実験の矛盾を説明するうる唯一の分子機構である。

さらに、ここまでの研究で確立したヘモグロビンの分子動力学計算のスキームを用いて酸素結合型、酸素非結合型のヘモグロビンに対して長時間の分子動力学計算を行った。剛体モデルを用いた解析によると確かに酸素非結合型のサブユニットの配置は酸素結合型に近づくが、一方で溶液中の実験的に報告されている酸素非結合型の相互作用をよく保存していることが分かった。これは、上記の変化が、初期構造として用いた結晶構造が溶液構造へと緩和する遷移である可能性を示唆している。

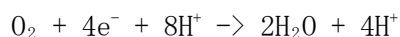
しかし、この構造が最終的な溶液構造なのか、あるいはまだ緩和の途中にあるのかは上記の計算から判断することは困難であり、さらなる大規模なサンプリングが必要である。この点を改善したうえで我々の提案する酸素親和調節機構はさらに検証されなければならない。そのためにはより精度の高い力場が必要になる。現状の生体高分子の力場はファンデルワールス相互作用、特にπスタッキングの再現に問題を抱えている。これは二重らせんDNAの塩基の積み重なり等に見られる相互作用でDNAやタンパク質の安定性に寄与している相互作用である。

上記の問題を解決した上で大規模なサンプリングを行うための基礎として、より分子量が小さくサンプリング空間が限られた蛋白質 Trp-cage に対して折り畳みシミュレーションを行った。タンパク質の折り畳みとは、特定の立体構造を持たない一本のペリペプチド鎖を溶液中で存在する構造へと折り畳むことであり、最も再現が困難なシミュレーションの一つである。この計算では我々が開発したスタッキング相互作用の改良力場とレプリカ交換分子動力学法とを組み合わせ用いた。

結果として我々の手法により、従来の方場よりも高い精度で溶液構造を再現することに成功した。これはヘモグロビンも含めた他のタンパク質にも応用可能な手法であり、さらなる研究の発展が可能となった。

【5】タンパク質と遷移金属の複合体の有効ポテンシャル場の開発と応用

シトクロム c 酸化酵素 (COX) は生体内で呼吸 (Respiration) に関連し、ミトコンドリアで酸素を水に還元する反応を担っている。この反応は



であり、電子移動とプロトン移動がカップルする反応である。反応には8プロトンが関わっており、化学反応に4プロトンが消費され、内膜への輸送に4プロトンが用いられる。生成される内膜のプロトン濃度勾配は生体内エネルギー源として用いられる ATP の

合成(ATPase)に使われる。一方で、電子移動については COX は Cytochrome c から電子 (e⁻) をもらい、金属中心 (CuA, heme a) を順に伝わって、反応中心である heme a₃-CuB に移動する。

COX における反応機構を解明するには QM/MM 分子動力学法を行うことが必要であるが、そのためにはまずその分子力場を作成することが必要である。構成アミノ酸については既に汎用力場が存在するが、金属中心についての力場は存在しない。そのため、金属中心 (CuA) に対する力場生成を行う事から研究を始めた。

密度汎関数法 (DFT) による CuA のポテンシャル曲面と一致するように以下のポテンシャル関数のパラメータを決定した。

$$U = \sum_{bonds} K_b (r - r_0)^n + \sum_{angles} K_a (\theta - \theta_0)^2 + \sum_{torsion} \frac{V_n}{2} [1 + \text{Cos}(n\phi - \gamma)] \\ + \sum_{L-J} \epsilon_{ij} \left[\left(\frac{R_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{R_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right] + \sum_{Coulomb} \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

通常の MD 計算では n=2 が使われるが、n=4 の自由度も必要となることが分かった。これにより力場の精度を著しく向上させることが出来た。本研究を用いれば、高精度な QM/MM 計算が可能となる為、プロトン移動過程や、酸素還元過程が解明できる。現在研究を進展させている。

【6】細胞のシグナル情報伝達の数学的モデル (分子数理モデル)

生体内の化学反応ネットワークシステムは Stiffness が厳しく、微分方程式を数値的に解くこと自体が困難である場合も多い。ましてや、その解の安定性の解析は極めて困難である。しかし、生物学的に重要であるのは、(その時間発展よりも) 定常状態である場合が多くある。そこで、微分方程式を (定常状態の) 代数方程式に変換することによって、その安定性を詳細に解析するための、新しい手法を提案した。これを応用することによって、フィードバック・ループを含むシグナル情報伝達ネットワークを解析し、ガン化などに至る、生物機能の新しい分子機構を提案した。

【7】バイオ・インフォマティクス技術の開発と応用

現在、生命科学では、個々の遺伝子ごとではなく、「ゲノム全体の遺伝子機能情報を一度に解析する」実験手法が、飛躍的に発展中である。例えば、iPS 細胞の諸々の問題は、遺伝子発現ネットワークにその根源があり、実用化に向けた課題の解決が不可欠である。同様に、生命科学上の様々な課題に、こうした実験手法が応用されつつある。こ

のような最先端の技術の解析には、情報科学（多変量解析）が必須であり、生命科学との融合が不可欠となっている。

我々は転写因子が認識する DNA 塩基配列を、自動的かつ高精度に予測するパターン認識システム（塩基配列モチーフの同定システム）を開発することに成功した。本方法は発がん機構や iPS 細胞、再生医療技術へ応用することができるため、新たな統合的生命科学を拓けると考えている。

<論文>

1. Hagiwara Y, Kino H, Tateno M.: Modulation of electronic structures of bases through DNA recognition of protein. J Phys Condens Matter. 22(15), 152101(2010).
2. Hagiwara Y, Tateno M.: Recent advances in jointed quantum mechanics and molecular mechanics calculations of biological macromolecules: schemes and applications coupled to ab initio calculations. J Phys Condens Matter. 22(41), 413101(2010).

<学位論文>

なし

<講演>

1. Masaru Tateno, A Computational Study of Catalytic Mechanisms of a Protein-RNA Hybrid Enzyme, April 22-24, 2010 Shanghai, China.
2. 舘野 賢, タンパク質機能の理論解析, 蛋白質の機能-構造相関解明のための精密構造解析とその方法 ~水素原子から細胞まで, 2010/10/6-7, 大阪大学蛋白質研究所
3. Tatsunori Nishimura, Theoretical characterization of elementary reaction cycles exploiting the steepness of the stimulus/response curve, International Conference on Computational and Systems Biology: ICCSB, Hangzhou, China, 2010/10/22-24.
4. Masaru Tateno, Development and application of hybrid quantum mechanics (QM)/molecular mechanics (MM) molecular dynamics calculation system implemented on massively-parallel supercomputers by interfacing QM and MM engines International Conference on Computational and Systems Biology: ICCSB,

Hangzhou, China, 2010/10/22-24.

5. Masaru Tateno, Investigation of Functional Mechanisms of Biological Nano-machines Exploiting Computer Simulations from Dynamical Electronic Structure to Reaction Network System, Annual World Congress of Nanomedicine 2010, Oct 23-25, Beijing, China
6. MoonYoung Yang, Masaru Tateno, Computational investigation of catalytic mechanisms of HhaI DNA methyltransferase, BMB2010 (第 33 回日本分子生物学会年会 第 83 回日本生化学会大会 合同大会), 2010 年 12 月 7 日-12 月 10 日, 神戸.

<ポスター発表>

1. ○花岡 恭平、館野 賢、ヘモグロビンの溶媒構造の同定を目指した計算科学的解析、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
2. ○佐藤 皓允、萩原 陽介、館野 賢、イソロイシル tRNA 合成酵素 によるエディティング反応機構の計算科学的解析、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
3. ○館野 賢、松村 浩由、○萩原 陽介, The grid-based energy representation: a novel description of the potential field involving Na⁺ - π interaction、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
4. 萩原 陽介、Martin J. Field、濡木 理、○館野 賢、A hybrid ribozyme/protein catalyst : a computational investigation of editing mechanism of aminoacyl-tRNA synthetases、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
5. ○梁 文榮、萩原 陽介、館野 賢, HhaI DNA メチル化酵素の反応機構の計算科学的解析、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
6. ○カン ジョン、太田 雄大、萩原 陽介、西川 佳吾、山本 哲徳、長尾 秀実、館野 賢、タンパク質の遷移金属結合活性サイトにおける電子構造: QM/MM 計算による解析、第 10 回日本蛋白質科学会年会, 2010 6/16, 札幌.
7. ○MoonYoung Yang and Masaru Tateno, Computational investigation of catalytic mechanisms of HhaI DNA methyltransferase, HhaI DNA メチル化酵素 の反応機構の計算科学研究, 第 33 回日本分子生物学会年会 第 83 回日本生化学会大会 合同大会, 2010 年 12 月 7 日-10 日, 神戸.
8. ○MoonYoung Yang, Yohsuke Hagiwara, Masaru Tateno, Computational analysis of reaction mechanisms of HhaI DNA methyltransferase, HhaI DNA メチル化酵素 の

- 反応機構の計算科学的解析, 第 48 回日本生物物理学会年会, 2010 年 9 月 20 日-22 日, 東北大学.
9. ○A. Sato, Y. Hagiwara, M. Tateno: “Computational Investigation of Catalytic Mechanisms of Editing by isoleucyl-tRNA Synthetase”, 第 48 回日本生物物理学会年会、2010 年 9 月 20 日-22 日、東北大学.
 10. ○Kyohei Hanaoka, Jiyong Kang, Takashi Yonetani, and Masaru Tateno, Computational analysis of dynamical structures of Human adult hemoglobin, ヒトヘモグロビンにおける動的構造の計算科学的解析, 第 48 回日本生物物理学会年会, 2010 年 9 月 20 日-22 日, 東北大学.
 11. ○Ryoh Nakaki, A novel computational system for identification of transcriptional regulation motifs in genome DNA base sequences, International Conference on Computational and Systems Biology: ICCSB, Hangzhou, China, 10/22-24.
 12. ○Jiyong Kang, Computational explorations of electronic and geometrical structure of heme a and heme a₃ in the bovine cytochrome c oxidase, International Conference on Computational and Systems Biology: ICCSB, Hangzhou, China, 10/22-24.
 13. ○Masaru Tateno, Evaluation of efficiency of a novel algorithm for accurate estimation of metal-p interaction energy International Conference on Computational and Systems Biology: ICCSB, Hangzhou, China, 10/22-24.
 14. ○Kyohei Hanaoka, Jiyong Kang, Takashi Yonetani, and Masaru Tateno, Molecular dynamics simulation of human adult hemoglobin, ヒトヘモグロビンの分子動力学計算, 第 33 回日本分子生物学会年会 第 83 回日本生化学学会大会 合同大会, 2010 年 12 月 7 日-10 日, 神戸.
 15. ○A. Sato, M. Tateno: “Computational Exploration of Mechanisms of Editing Reaction by isoleucyl-tRNA Synthetase”, BMB2010(第 33 回日本分子生物学会年会 第 83 回日本生化学学会大会 合同大会), 2010 年 12 月 7 日-10 日, 神戸.

<外部資金>

舘野賢 (代表)、生体反応の量子ハイブリッド分子動力学シミュレーション、基盤研究 (B), 2009-2011

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

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

【1】バナジウム酸化物系

(1) 量子スピン系

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

a) スピネル格子 MV_2O_4

- $Li_xZn_{1-x}V_2O_4$ — 高分解能 NMR による Anderson 型金属-絶縁体転移機構の微視的解析(継続).
- $Cd_xZn_{1-x}V_2O_4$ — 断熱比熱測定に基づく, 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(継続).

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

c) 他の物質群

- SrV_5O_{11} — 新規低次元導体の結晶構造および物性解析(継続).

(2) 金属 絶縁体転移系

上記 $Li_xM_{1-x}V_2O_4$ 系は組成に応じて Anderson 型金属-絶縁体転移を示す. 機能性物質の有力候補と考えられる複合結晶 $Cu_xV_4O_{11}$ は組成および温度に応じて金属-絶縁体転移を示す. これら他に代表的ペロプスカイト系, $MV_{10}O_{15}$ (既出 1.1c), $Li_xV_6O_{13}$, VO_2 等が現在の研究対象である(継続).

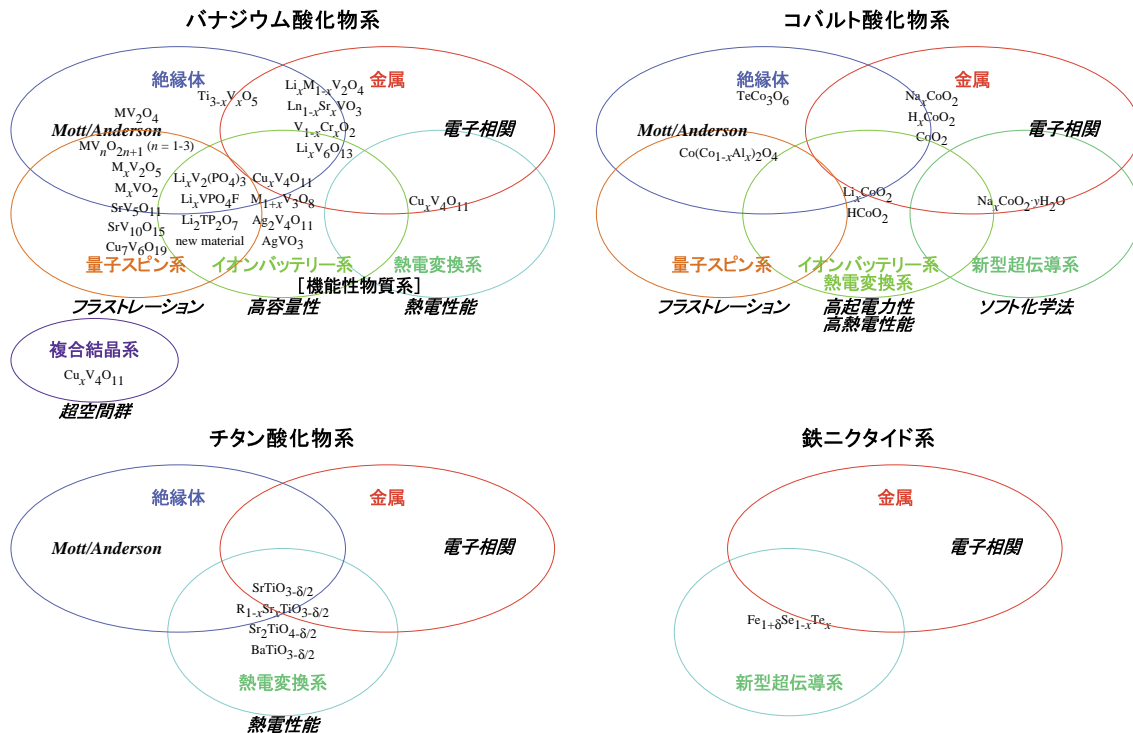


図 1: 近年, 本グループが研究対象としたバナジウム, コバルト, チタン酸化物系, 並びに鉄ニクタイト系の物質群.

(3) 機能性物質系・複合結晶系

機能性物質系として, イオンバッテリー, 熱電変換等で代表されるエネルギー貯蔵・変換系を扱っている. 前者の実用的目標は充放電のサイクル特性向上と高容量化であり, 後者は熱電性能指数の向上である. イオンバッテリー放電試料は, ほぼ 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.

前述の 2 つの機能性を備えた物質系として $Cu_xV_4O_{11}$ が挙げられる. 本物質は, 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.

- $(Cu_{1-z}M_z)_xV_4O_{11}$ — $x = 2.2$, $M = Co, Ni, Zn, Ag$ 単結晶および多結晶に関する物性解析 (講演 4; 継続).
- $Li_xV_2O_5$ — $x > 1$ の合成と物性評価 (学位論文 4; 講演 8; 継続).

上記物質系と並行して, 本年度より, ポリアニオン系正極材料を対象とした研究を開始した.

- オリビン型 $LiVPO_4F$ — 単相試料の合成, 元素分析, 充放電特性試験, 並びに反強磁性転移の発見 (論文 3; 講演 7; 継続).
- ナシコン型 $Li_3V_2(PO_4)_3$ — ソフト化学法による種々の Li 濃度試料の合成, 元素分析, および磁氣的性質の解明 (論文 3; 学位論文 4; 講演 7; 継続).
- 縮合型 $Li_2TP_2O_7$ — $T = Mn$ の合成, ソフト化学法による種々の Li 濃度試料の合成, 元素分析, 並びに物性評価 (論文 3; 講演 8; 継続).

(4) 新物質系

- $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ — ソフト化学的手法による新物質 $\text{Cu}_{1.1}\text{V}_4\text{O}_{11}$ の合成と物性評価（講演 2；継続）。

【2】コバルト酸化物系

三角格子型 Li_xCoO_2 をはじめとするコバルト酸化物系は特にイオンバッテリーの観点から精力的に研究されている。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を契機として、 Na_xCoO_2 も含め基礎研究も活発に行われるようになった。 Na_xCoO_2 は熱電素材としても注目されている。

(1) 量子スピン系

- スピネル格子 $\text{Co}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4$ — Co_3O_4 は 40 K で反強磁性秩序を示すが、 CoAl_2O_4 の磁気秩序状態に関しては未解決である。 $0 \leq x \leq 1$ の基底状態の考察（継続）。

(2) 関連電子系

- CoO_2 (P3) — LiCoO_2 のソフト化学処理により得られる CoO_2 の積層不整および弱相関金属性に関する微視的モデルの確立。本成果に基づくイオンバッテリー性能向上の検討（継続）。

(3) イオンバッテリー系

- Li_xCoO_2 — 代表的イオンバッテリー正極活物質であり、 LiCoO_2 の Li 脱ドーブ過程における結晶構造および電子構造の変化が、実験と理論両面から広範囲に研究されている。母物質および Li 脱ドーブ試料の構造と物性評価（講演 5；継続）。

(4) 新物質系

- TeCo_3O_6 — TeCl_4 を輸送剤とした化学輸送法により合成された Te-Co-O の精密結晶構造決定と物性評価（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

SrTiO_3 に酸素欠損あるいは Sr-希土類元素置換を導入することにより生じるバンド絶縁体-金属境界近傍の物性に関して、主として熱電素材の観点から研究を行った（論文 2）。さらに六方晶 BaTiO_3 に関しても同様の研究を進めた（学位論文 3；講演 3，6；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行った（学位論文 1；継続）。

(3) 三角格子 Li_xNiO_2

幾何学的フラストレーション効果，イオンバッテリー等の観点から LiNiO_2 およびその Li 欠損系に注目している．ソフト化学的手法により得られた試料の伝導機構に関しては一定の理解が得られたが，本系の物性理解をさらに進めるため，試料の質を高める工夫を計画している（継続）．

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

2008 年に発見された鉄ニクタイト系超伝導体の転移温度は銅酸化物高温超伝導体のそれに次ぐもので大変注目されている．本系の結晶構造，超伝導および常伝導機構を解明するために，多角的研究を進めた（論文 1；学位論文 2；講演 1；継続）．また大塚研究室との共同研究が開始された．

〈 論 文 〉

1. Masashige Onoda, Yasuna Kawasaki, Masashi Tsubokawa and Tamotsu Koyano, Comprehensive studies for the crystal structures and electronic properties of the superconducting system $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ with $\delta \simeq 0.037$ and $x \simeq 0.55$
Journal of Physics: Condensed Matter **22**, 505702 (9pp) (2010)
2. Masashige Onoda and Shuichi Tsukahara, The upper limit of thermoelectric power factors in the metal-band-insulator crossover of the perovskite-type oxygen deficient system $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$
Journal of Physics: Condensed Matter **23**, 045604 (7pp) (2011)
3. 小野田雅重，リチウム二次電池正極材料の構造及び物性に関する研究 (41pp) (2011)

〈 学位論文 〉

1. 小林健， $\text{Sr}_2\text{TiO}_{4-\delta/2}$ 系の輸送現象と磁性
数理工学研究所修士（理学）論文，2011 年 3 月
化石燃料あるいはバイオマスの燃焼からのガス放出による地球温暖化を解決するため，熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換できる熱電素材が注目されている．遷移金属酸化物系は，化学的，熱的構造安定性が高く，その有力候補に位置づけられる．最近，ペロブスカイト型酸素欠損系 $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ および Sr - 希土類元素置換系 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{TiO}_{3-\delta/2}$ ， $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_{3-\delta/2}$ のバンド絶縁体 - 金属境界近傍における伝導機構が解明され，室温の熱電性能因子が $2 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ に達することが報告された．本研究は，ペロブスカイト構造関連系として擬二次元構造を持つ Sr_2TiO_4 における輸送現象と磁性の酸素欠損量依存性を追究し，熱電性能因子を求めることを目的として行われ，室温において約 $10^{-5} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ の値が得られた．
2. 坪川雅， $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ 系の結晶構造と物性
数理工学研究所修士（理学）論文，2011 年 3 月
2008 年 2 月に超伝導転移温度 $T_c = 26 \text{ K}$ となる鉄系超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ が発見されて以来，世界中で本系の精力的な研究が進められ，様々な構造の鉄系化合物が発見された．近似的組成比 11 系に属する $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ 系は数ある鉄系超伝導体の中でも Fe_2Ch_2 (Ch = S, Se, Te) 層の積層だけからなる最も単純な構造の系として知られる．一方，鉄とカルコゲンの非化学量論組成，あるいは鉄カルコゲナイド，鉄酸化物といった不純物が生成しやすいことから試料依存性が強い系でもある．本研究では， $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ 系を対象に，種々の化学組成を持つ

良質の単結晶試料が合成され、超伝導および非超伝導組成の結晶構造が詳細に決定されるとともに、それらの伝導機構モデルが確立された。

3. 出村郷志, BaTiO_{3-δ/2} 系の輸送現象と磁性
数理解析科学研究所修士(物理学)論文, 2011年3月

これまでの研究で、ペロブスカイト型 SrTiO₃ の酸素欠損系が高い熱電性能因子を持つことが明らかにされ、また、酸素欠損による格子の乱れにより熱伝導度の低減が期待されている。本研究では、六方晶酸素欠損系 BaTiO_{3-δ/2} の熱電性能因子の評価が行われた。δ ≈ 2 までの試料が多数合成され、それらの物性から、室温における最大の熱電性能因子は δ = 0.0469 のとき達成され、 $1.4 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ であることが明らかにされた。

4. 廣瀬元, リチウムイオン二次電池正極活物質系の合成と磁性
数理解析科学研究所修士(理学)論文, 2011年3月

地球温暖化の問題を解決するとともに、種々の分野における電気エネルギー源の性能を高めるためには、三角格子型遷移金属酸化物および遷移金属リン酸塩等の典型的正極活物質に勝る新たな材料開発が必要である。これまでの正極活物質として LiCoO₂, LiMn₂O₄ 等が知られているが、それらの出力ポテンシャルおよびエネルギー密度は、種々の応用にあたって十分な性能とはいえない。本研究は、バナジウムとリン酸骨格からなる Li_xV₂(PO₄)₃ と Li_xV₂O₅ において、それらの合成条件を追究し、磁気的性質を解明することを目的として行われた。前者の系で、スピンの g 値が電子の局在化に伴って、自由スピン値から大きく減少することが明らかにされた。これは、次世代正極材料の特徴の一つである。

〈 講 演 〉

1. 坪川雅, 昇佳史, 小野田雅重, Fe_{1+δ}Se_{1-x}Te_x の結晶構造と物性
日本物理学会 2010 年秋季大会・大阪府立大学中百舌鳥キャンパス・2010 年 9 月 23 日・23aPS45
2. 田村麻人, 小野田雅重, 低次元伝導性複合結晶 Cu_xV₄O₁₁ の Cu 脱離効果
日本物理学会 2010 年秋季大会・大阪府立大学中百舌鳥キャンパス・2010 年 9 月 23 日・23aPS114
3. 出村郷志, 小野田雅重, BaTiO_{3-δ/2} の輸送現象と磁性
日本物理学会 2010 年秋季大会・大阪府立大学中百舌鳥キャンパス・2010 年 9 月 23 日・23aPS117
4. 小野田雅重, 石川尚志, 低次元伝導性複合結晶 Cu_xV₄O₁₁ の高機能化
日本物理学会 2010 年秋季大会・大阪府立大学中百舌鳥キャンパス・2010 年 9 月 23 日・23pWB12
5. 渋谷龍太, 小野田雅重, 三角格子系 Li_xCoO₂ の NMR II
日本物理学会第 66 回年次大会・新潟大学五十嵐キャンパス・2011 年 3 月 26 日・25pPSB65
(概要集原稿による発表)
6. 出村郷志, 小野田雅重, BaTiO_{3-δ/2} の輸送現象と磁性 II
日本物理学会第 66 回年次大会・新潟大学五十嵐キャンパス・2011 年 3 月 26 日・26pPSA21
(概要集原稿による発表)
7. 小野田雅重, 石橋剛彦, 稲垣誠, 廣瀬元, ポリアニオン系二次電池正極材料 I
日本物理学会第 66 回年次大会・新潟大学五十嵐キャンパス・2011 年 3 月 28 日・28aHA9 (概要集原稿による発表)

8. 池田聡, 小野田雅重, ポリアニオン系二次電池正極材料 II
日本物理学会第 66 回年次大会・新潟大学五十嵐キャンパス・2011 年 3 月 28 日・28aHA10
(概要集原稿による発表)

〈 高校生・中学生対象授業と講演 〉

1. 小野田雅重, スピン科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
附属駒場高等学校 2 年生筑波大学研究室訪問・自然系学系 E 棟, D 棟・2010 年 7 月
2. 小野田雅重, 高温超伝導体の合成および構造・物性解析
茨城県教育委員会「未来の科学者育成プロジェクト事業(高校生科学体験教室)」・自然系学系 E 棟, D 棟, プロジェクト研究棟・2010 年 8 月
3. 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・自然系学系 E 棟, D 棟・2011 年 2 月

〈 外部資金 〉

1. 小野田雅重, 共同研究(富士重工業スバル技術研究所), リチウム二次電池正極材料の構造及び物性に関する研究(2010-2011)

IX - 2. 半導体物性グループ

教授 舩本 泰章
 准教授 野村 晋太郎、池沢 道男
 助教 富本 慎一
 研究員 後藤 健、伊藤 宙陸
 大学院生 (15名)

【1】 半導体量子ドットのスピン光物性 (舩本泰章、富本慎一)

(1) 時間分解カー回転法による伝導電子の g 因子の符号の決定
 (富本慎一、野澤伸介、舩本泰章) [論文9,16]

ポンプ・プローブ法による時間分解カー回転 (TRKR) の観測において、半導体中の伝導電子のスピン歳差運動の方向を見出し、 g 因子の符号を決定する新しい方法を開発した。この方法は図1に示すように、試料表面に対して大きな入射角 ($\sim 45^\circ$) をもつポンプ光を用いる。この場合、生成する電子のスピンは一般に図のように試料表面の法線方向 (図1の z 軸) からポンプ光軸の向きに少し傾いたものとなる。一方、プローブ光は試料に垂直に入射させ、 z 軸方向のスピン成分の変化を TRKR で観察する。スピンは磁場に垂直な面内で歳差運動するが、その回転方向によって TRKR に現れる振動の初期位相が異なるので、そこからスピンの回転方向を判断することができる。実際の実験では、磁場方向を反転した2つの TRKR のデータを取得して比較し、それらの位相差の符号から g 因子の符号を決定した。図2は CdTe/ZnTe 量子井戸での実験結果である。ポンプ・プローブ光のエネルギー E を、励起子 PL バンドの高エネルギー側で 2.27 eV から 2.31 eV まで変化させた時のデータを (a) から (d) までのパネルに示す。磁場 $B = +6$ T (実線) と $B = -6$ T (破線) の2つのデータの間位相差が現れており、全てのエネルギーで $B = -6$ T (破線) の振動が遅れているのが分かる。これは電子の g 因子が負であることを示している。位相差の大きさは 2.28 eV と 2.29 eV の間で急激に変化しているが、これは 2.29 eV 以上でライトホールバンドからの励起が起きるためである。同じ方法は、希薄磁性半導体において有効 g 因子の符号を決定する際にも利用できる。我々は 1.3% の Cd を Mn で置換した量子井戸で同様の実験を行い、有効 g 因子の符号が正であることを見出した。これは、この量子井戸内の Mn イオンの d 電子と伝導電子とのスピン間相互作用において、通常のポテンシャル交換相互作用が優勢であることを示している。

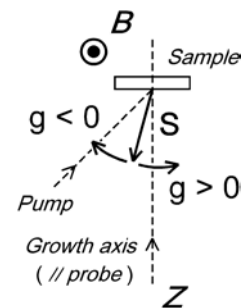


図1: 試料と磁場 (正方向) とポンプ・プローブ光軸の実験配置

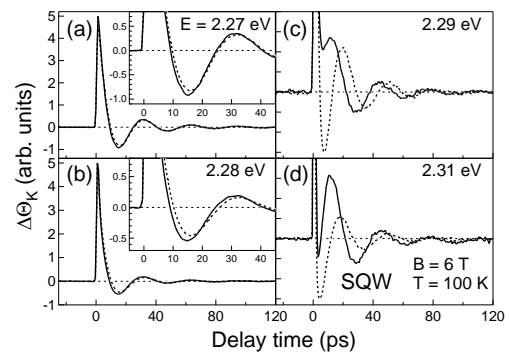


図2: CdTe/ZnTe 量子井戸における TRKR の測定結果 (T=100 K)

(2) ZnO 薄膜における電子スピンドイナミクス (富本慎一、野澤伸介、舛本泰章) [論文 11]

ウルツ鉱型結晶構造をもつ ZnO や GaN では、結晶場分裂がスピン・軌道相互作用に比べて大きいために、価電子帯の構造が閃亜鉛鉱型半導体とは異なる。そのため、バンド間遷移の光学選択則も異なったものとなる。ZnO における電子スピンの偏極と緩和のダイナミクスを TRKR 法によって調べた。試料は a 面サファイア基板上に MBE 成長した ZnO 薄膜であり、 $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で Ga をドーピングしたもの (厚さ 1.45 μm) とノンドーピングのもの (同 1.1 μm) の 2 種類である。これらの試料の低温 (15 K) での PL スペクトルを図 3 に示す。波長 367.6 nm 付近に自由励起子によるピークが 2 種類の試料に共通して見られるが、Ga をドーピングした試料では 369.5 nm 付近にドナー束縛励起子による強いピークが現れている。この試料での TRKR の測定結果 (温度 7 K、磁場 2 T) を図 4 に示す。ポンプ・プローブ光の波長が自由励起子ピークに共鳴している時 (366 nm)、観測されるスピンビートの寿命は 2.5 ns 程度であった。ノンドーピングの試料でもこれに近い寿命の信号が同じ波長で観測された。一方、ポンプ・プローブ波長がドナー束縛励起子に共鳴している時 (370 nm)、スピンビートの寿命は長くなり、レーザーパルスの繰り返し周期 (13 ns) を超えている。この長寿命の信号はノンドーピングの試料では現れないため、中性ドナーに束縛されている電子によるものと考えられる。この電子のスピンコヒーレンスは励起子から移されたもので、Elliott-Yafet 機構などの通常の自由電子のスピン緩和メカニズムが効かないために寿命が非常に長くなっている。ビート周波数から g 因子は、自由電子・ドナー束縛電子の双方に対して 1.97 と求められた。これは、結晶軸に対する磁場の方向によらず等方的である。また、光生成電子のスピン偏極の方向は常に結晶の c 軸に平行であった。これは、偏極方向がポンプ光の入射角に依存する閃亜鉛鉱型半導体の場合とは対照的な結果であり、価電子帯構造の違いを反映したものである。

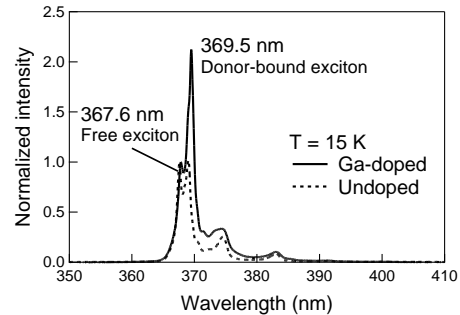


図 3: ZnO 薄膜の PL スペクトル

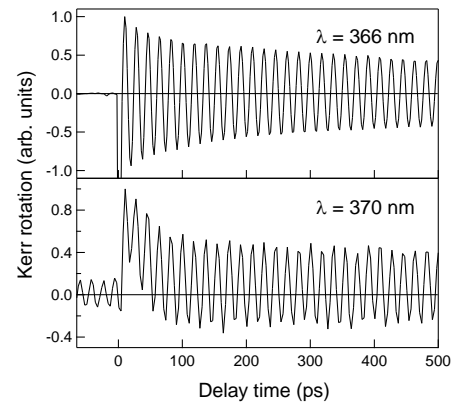


図 4: Ga をドーピングした ZnO 薄膜の TRKR データ (T=7 K、B=2 T)

(3) 光パルスの強度・偏光による量子ドット中の電子スピンの制御

(富本慎一、川名啓介、舛本泰章) [論文 4, 14]

1 個の電子がドーピングされた半導体量子ドットでは、トリオン (負の荷電励起子) への遷移に共鳴する光パルスの照射によって、電子 ($s = 1/2$) の 2 つのスピン準位間にコヒーレンスを生成することが出来る。この状態は光の強度や偏光状態、バンド幅に敏感に依存し、これらのパラメータの調整によってスピン偏極の方向と大きさを制御できる。バイアス電圧の印加によって 1 個の電子がドーピングされた量子ドット (チャージチューナブル InP/InGaP 量子ドット) において時間分解磁気光学測定を行った。ピコ秒パルスレーザー光の照射によって電子スピンのコヒーレンスがどのように生成されるかを実験的に調べ (図 5)、その結果を密度行列を用いた理論計算によって説明した (図 6)。

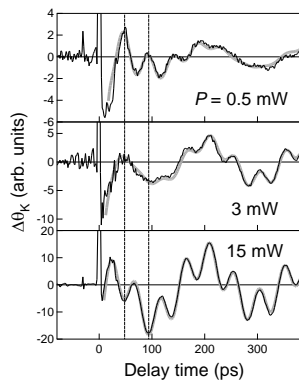


図5: InP量子ドットにおける時間分解カー回転の測定結果(励起強度依存性)。励起強度の違いによるスピン偏極方向の反転が、逆位相の振動として現れている。

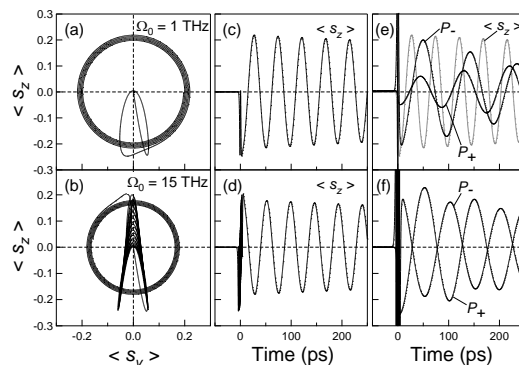


図6: 共鳴パルス光を照射した電子・トリオン4準位系の密度行列計算の例(光強度 $\Omega_0=1$ THz 及び 15 THz の場合)。(左) 磁場に垂直な面内で電子スピンの描く軌道。(中) 電子スピンの光軸(z軸)方向成分の時間発展。実験で観測された逆位相の振動を再現している。(右) 電気分極の2つの回転成分の時間発展。

【2】単一量子ドットの分光研究(池沢道男、舛本泰章)

(1) 単一 GaP:N 等電子トラップの磁気分光

(池沢道男、濱野毅信、佐久間芳樹^A、舛本泰章^A物質・材料研究機構)

窒素ドーパしたリン化ガリウム(GaP:N)結晶中に形成される NN ペア等電子発光中心を、単一発光中心の磁場中発光によって調べた。NN ペアは2つの窒素原子が近接するリン原子2つを置換することによって形成され、エネルギーの揃った単一光子源として有用であるが、NN ペアの周りに生じる異方的な結晶場のために、励起準位が原子配置に依存した微細分裂を示す。このような NN ペアの微細分裂を制御したり、原子配置に関する新たな知見を得るために、向きを特定した NN ペアに対して磁場を様々な方向から印加して発光スペクトルを測定した。

ここでは、二軸異方性(C_{2v})を持つ NN_4 発光中心を取り上げる。これまでの我々の研究で、 NN_4 は $[0,0,0]$ - $[4,4,0]$ というリン原子の面心立方副格子位置を置換した窒素原子対であることが分かっている。図7(a)は、観測方向に垂直な(001)結晶面内に形成された単一 NN_4 発光スペクトルの磁場依存性である。ゼロ磁場においても、前述の局所的な結晶場と電子正孔交換相互作用のために、励起状態が分裂している。高エネルギー側の2つのピークが、全角運動量 $J=1$ に対応する bright 励起状態であり、低エネルギー側に

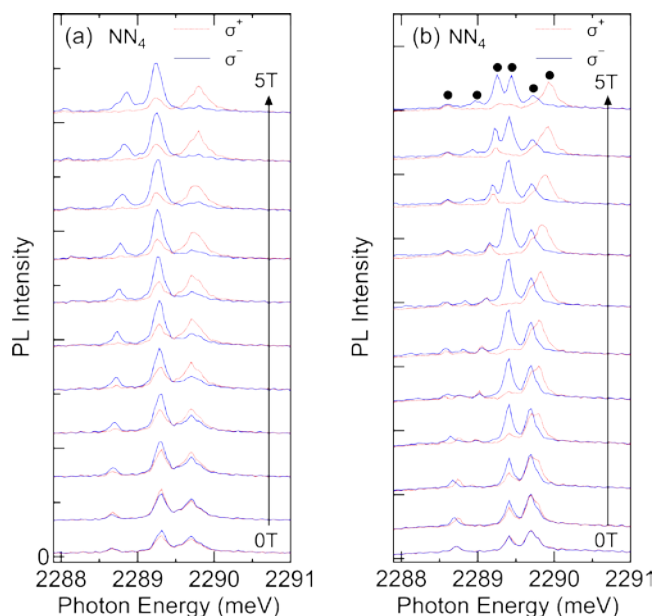


図7: 単一 NN_4 の磁場中の励起微細構造 (Faraday 配置)。(a) は、一原子層のみのドーピングを行った試料で観測される分裂パターン。(b) は、複数層のドーピングを行った試料で時折観測される分裂パターン。これらはそれぞれ、偏光異方性からドーピング面 (001) 内形成される NN_4 と、ドーピング面に垂直な面内 (100) や (010) に形成される NN_4 と考えられている。

見られる弱いピークが $J=2$ の dark 励起子状態の一つである。このような NN_4 に Faraday 配置で磁場を印加すると、 $N-N$ 軸と直交する方向 (C_2 回転軸) に磁場を印加することになる。磁場印加に伴って、bright 励起子の分裂幅が増大すると共に、dark 励起子ピーク強度が増大しているのが分かる。観測されたピークエネルギーの磁場依存性を図 8(a) に示した。複数層のドーピングを行うと、ドーピング面に垂直な面内に NN_4 が形成されるようになるが、これは偏光方向で見分けることが出来る。その磁場依存性を図 7(b) に示した。ゼロ磁場でのスペクトルは図 7(a) にかかなり近いが、磁場依存性はまったく異なっており、磁場印加と共に新しいピークが現れ、5T では合計 6 本のピークが観測される (図 8(b))。

観測された磁場依存性を説明するために、ハミルトニアンに Zeeman 相互作用の項を加え、重い正孔と軽い正孔と電子スピンの向きを考慮した合計 8 つの基底を用いて、磁場中のエネルギー固有値と固有状態を計算した。図 8 の点線がエネルギー固有値の磁場依存性を表す。線の太さが、その状態に含まれる bright 励起子成分に比例するように描いてある。図 8(a) と (b) の計算では同じ物質パラメータを用いて磁場の方向だけを変えているが、実験データの特徴はほぼ再現できている。

これ以外にも、Voigt 配置で可能な 2 つの磁場方向についても同様に実験と計算の一致が得られており、 C_{2v} 対称性を持つ NN ペアの磁場中の振る舞いについてほぼ理解できたと言える。

直接遷移型のバンド構造を持つヒ化ガリウム ($GaAs$) 結晶中の窒素等電子発光中心について、単一光子源としての観点から調べた。これまで、等電子発光中心として広く知られるリン化ガリウム中の NN ペア発光中心について、単一光子発生の実証や NN 原子配置の特定を報告してきたが、より高い発光レートが期待できる、直接遷移型の $GaAs$ に窒素をドーピングした $GaAs:N$ 中に形成される発光中心を研究した。窒素の希薄ドーピングによって、バンドギャップエネルギー中に鋭い輝線スペクトルから成る発光帯が現れる (図 9(a))。発光は空間的に局在した状態から起こっていることが分かっており、また輝線の濃度が二次イオン質量分析法で調べた窒素濃度 ($[N]=3 \times 10^{12}/cm^2$) よりずっと低いことから、単一の窒素原子ではなく NN ペアのような複数の窒素または、窒素と他の希薄不純物や欠陥との複合的な発光中心であると考えられる。その発光寿命は短いものでは 1ns を切り、期待したように $GaP:N$ 中の NN 発光中心の数十倍の発光レートを示した。この明るい発光中心を用いて、Hanbury Brown and Twiss (HBT) 相関計で単一光子発生を検証を行い、図 9(b) のように 50MHz の高繰り返し光パルス励起下でも明確なアンチバンチングを観測した。 $GaAs$ 中の不純物発光中心からの単一

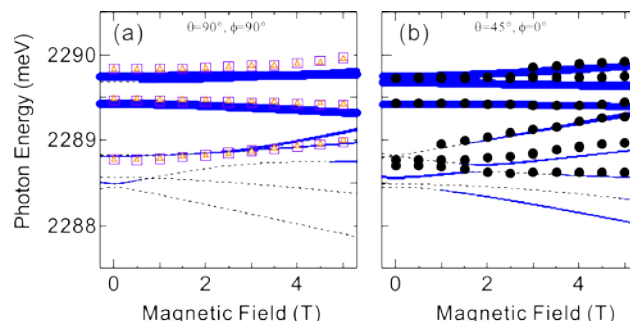


図 8: NN_4 に束縛された励起子状態についての計算結果。(a) がドーピング面内に存在する NN_4 について、(b) がドーピング面に垂直な面内の NN_4 について。観測された磁場依存性は定性的におよぼ再現されている。

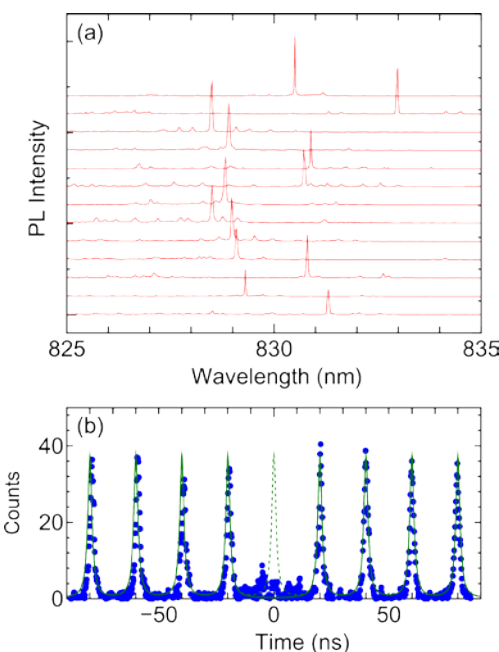


図 9: (a) $GaAs:N$ で見られる発光中心のスペクトル分布。830nm 付近に鋭い輝線スペクトルを持つ発光中心が多数観測される。(b) 単一発光中心からの単一光子発生を示す HBT 強度相関信号。中央ピークの消失から単一光子発生が確認できる。

光子発生が初めて達成された。

【3】新しい半導体ナノ構造 (舛本泰章、後藤健、池沢道男、富本慎一)

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

(舛本泰章、吉田清太郎、池沢道男、佐久間芳樹^A、富本慎一^A 物質・材料研究機構)

[論文 13, 15]

量子ドット中の励起子分子は励起子微細構造 (分裂) が小さいと、もつれあい光子対を発生するので、温度安定性の指標となる励起子分子の束縛エネルギーは大きいことが実用上重要である。大きな束縛エネルギーを生み出す戦略を明らかにする目的で、単一量子ドット分光に比べて格段に効率的に励起子分子の束縛エネルギーを決定できるマクロ測定である時間領域からの量子ビート測定を用いて、通信波長帯に近い InAs/InP 量子ドットを対象に、時間領域から量子ドットの励起子分子の束縛エネルギーを決定した。超高感度ヘテロダイン検出フォトンエコー法による量子ビート測定を用いて、歪みが極小化されたディスク状 InAs/InP 量子ドットの励起子分子の束縛エネルギーを計測した。

1.1~1.36 μm で発光する 1 原子層 (ML) 単位で精密に制御された数原子層のディスク状 InAs/InP 量子ドットを対象として、光ヘテロダイン検出フォトンエコーにより、励起子の位相緩和時間 T_2 と励起子分子束縛エネルギー E_B が調べられた。2K における T_2 は、3ML、4ML の高さの量子ドットにおいてそれぞれ 31ps(3ML)、41ps(4ML) と見積もられた。フォトンエコー信号の初期時間領域に励起子-励起子分子遷移による量子ビートが観測され、その振動周期から励起子分子束縛エネルギー E_B を $E_B(3\text{ML}) = 3.4\text{meV}$ 、 $E_B(4\text{ML}) = 4.1\text{meV}$ と見積もられた。これは、1.1~1.36 μm の近赤外域で発光する量子ドットとして最大である。ディスク形状のため歪が極小化されることが最大の励起子分子束縛エネルギーを持つ理由と考察した。

(2) ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの光学的性質

(後藤健、舛本泰章、吉田清太郎、P.Mohan^A、本久順一^A、福井孝志^A ^A北大量子集積エレクトロニクス研究センター) [論文 3,7]

ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤは、長さが 2 μm 、幅が 140 nm の六角柱状のナノワイヤであり、InP の核と外殻によって InAs が挟まれた構造をしている。表面の被覆により外気に対して不活性化された InAs は、六角ナノチューブとしての性格を持っており、側面と角の領域はそれぞれ量子井戸と量子細線の性質を有している。また、InAs および InP の a 軸 (c 軸) 方向の格子定数は、それぞれ 4.2 \AA (6.9 \AA)、4.0 \AA (6.6 \AA) であり、内包されている InAs 層は約 4 % の格子定数の違いによる三次元歪み (静水圧歪み) を受けている (図 10(a))。この大きな圧縮歪みが InAs の伝導帯を引き上げ、タイプ II 型量子井戸のバンド構造を形成することが Model-solid theory から示唆される。タイプ II 型バンド構造においては、電子と正孔の空間的な分離により波動関数の重なりが減少するために再結合寿命が長く、100ns 以上まで発光が持続することが確認できる (図 10(c))。

長い発光持続時間は、コアマルチシェルナノワイヤにおける側面 (量子井戸) 領域から角 (量子細線) 領域への励起子の移動が観測を可能にする。励起強度 61pJ の下で、ストリークカメラおよび単一光子計測法を用いて時間分解発光測定を行った。発光スペクトルが時間の経過に伴い低エネルギー側にシフトする、スペクトル拡散が明らかにされた。発光スペクトルの平均

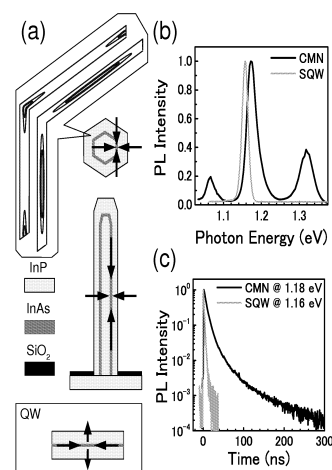


図 10 : (a) コアマルチシェルナノワイヤの断面図。角および側面に局在した正孔の波動関数。(b) コアマルチシェルナノワイヤおよび単一量子井戸の発光スペクトルと(c) 発光減衰。

値エネルギーをプロットすると、およそ 10ns で 15 meV レッドシフトした後、拡散速度が遅くなることを見出された (図 11(a))。この拡散速度の変化は、励起子がコアマルチシェルナノワイヤの側面である量子井戸領域から角の量子細線領域に移動したことを示している。双極子-双極子相互作用によって励起子が移動するモデルを考え、量子井戸 (二次元) および量子細線 (一次元) 領域中の励起子について計算した結果、閉じ込め領域の次元の減少に従って、拡散速度が遅くなること示された。発光線幅 (42meV) やコアマルチシェルナノワイヤの側面領域と角領域それぞれに局在した正孔の閉じ込めエネルギー (3meV : 有限要素法により計算) をパラメータとして分布関数を与えると、測定結果とも良くフィッティングする (図 11(a))。従って、励起子がコアマルチシェルナノワイヤ中の量子井戸 (側面) 領域から量子細線 (角) に移動することによって、10ns までは早い拡散が、10ns 以降は遅い拡散がそれぞれ生じることを見出した。

双極子-双極子相互作用による励起子移動は、タイプ I 型およびタイプ II 型バンド構造中のどちらの励起子についても、試行関数が同じであるために相互作用ハミルトニアンに違いはなく、タイプ I 型・II 型とも同じモデルを用いた議論に問題がないことを示した。その上で、タイプ I 型バンド構造を有する閃亜鉛鉱型 InP/InAs 単一量子井戸との比較を行った。InP/InAs 単一量子井戸の発光線幅は、InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤに比べて約半分 (19meV) と狭く、スペクトル拡散の速度が遅いことも観測された (図 11(b))。これは、上記の双極子-双極子相互作用による励起子移動モデルを用いて良く再現され、同一次元内においては発光線幅が狭いほど拡散速度が遅くなることわかった。

(3) 単一ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの偏光ルミネッセンス (舂本泰章, 平田裕基, P. Mohan^A, 本久順一^A, 福井孝志^A ^A北大量子集積エレクトロニクス研究センター) [論文 17]

新しいナノ構造であるウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤは単原子層から 4 原子層の厚みを持つ InAs 層の六角チューブを内側と外側から InP 層ではさむ構造であり、InAs 層の六角チューブの側面が InAs 量子井戸、側線が量子細線というように 1 つのナノワイヤの中に 2 つの量子構造を含んでいる。ナノワイヤの長軸の長さ 2000nm は六角の対角線の長さ 140nm に比べて一桁以上長い。この単一の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの発光の偏光

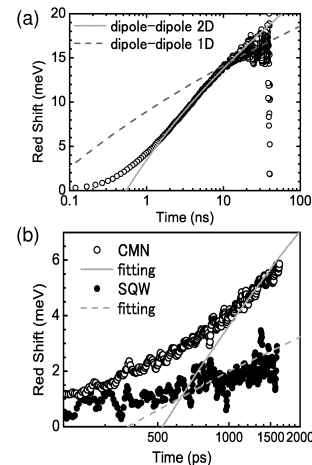


図 11 : (a) 発光の平均エネルギーのレッドシフト。(b) コアマルチシェルナノワイヤおよび単一量子井戸の発光平均エネルギーのレッドシフト。

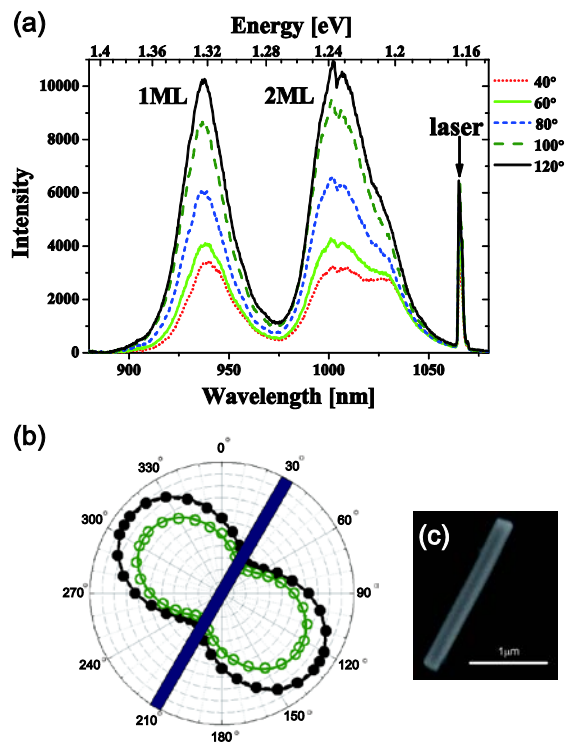


図 12 : (a) 単一 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの直線偏光発光スペクトル。(b) 一原子層 InAs からの直線偏光発光バンドと二原子層 InAs からの直線偏光発光バンドの積分強度の角度依存性 (● : 一原子層, ○ : 二原子層)。(c) 単一 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの走査電子顕微鏡像。

特性を、顕微分光手法を用いて詳しく調べた。六角のナノワイヤーを円柱と近似し、光の波長に比べて円柱の半径が短いとき、電磁波の真空と誘電体円柱との境界条件からナノワイヤーの長軸に強く偏光した光がナノワイヤーに侵入し、またナノワイヤーから放出されることになるが、単一の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの発光の直線偏光特性は、ウルツ鉈型構造による光遷移の偏光選択則から、c-軸方向に向いたナノワイヤーの長軸と垂直方向に強く偏光していることが明らかにされた(図 12 (a), (b), (c) 参照)。単原子層 InAs ナノチューブからの円偏光度は平均 -0.41、2 原子層 InAs ナノチューブからの円偏光度は平均 -0.44 となり、遷移の双極子がナノワイヤーの短軸に完全にそろっていると仮定して得られる -0.5 にきわめて近くほぼ完全なウルツ鉈型を持っていると結論される。InAs 価電子帯の対称性 (Γ_6 または Γ_7) に応じた直線偏光特性を生じている。

(4) (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶を用いたマイクロレーザー作製プロセスの研究

(井門靖樹、舛本泰章、佐々木史雄^A、原市 聡^A、堀田 収^B ^A産総研光技術, ^B京工繊大繊維) [論文 8, 10]

(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー [2,5-Bis(4-biphenyl)oligothiophenes (BPnT)] 結晶は、 π 電子共役系化合物で室温において高密度励起を行なうことにより、バルク結晶や薄膜結晶でも、自然放射増幅光が観測されている。また電界発光も観測されており、電流注入型有機半導体レーザーへの応用が期待されている。この研究では、先に BP1T の薄膜結晶を用いたマイクロサイズの光閉じ込め構造において、光励起下で共振器モードによるレーザー発振を実現した事を受けて、結晶成長方法と共振器作製方法のプロセスを研究し、閾値の低下を試みた。試料は結晶性の高い BP1T を用いた。

薄膜結晶作製方法としては、SiO₂/Si 基板に真空蒸着した後アニールして結晶化させる方法と、基板を加熱しながら蒸着して薄膜結晶を徐々に成長させる加熱蒸着法を比較し、加熱蒸着法の方が粒界が低減し、クラックが少ない良質の膜を作製することができることを明らかにした。そこで加熱蒸着法を用いて共振器作製プロセスを行い、閾値の改善を期待した。共振器作製プロセスとしては、埋め込み型と切り取り型を比較し、O₂リアクティブイオンエッチングに優れた耐性を持つ Ti 膜を用いてリフトオフをすることで数ミクロンメートルの円形ディスクにおいて、32 μ J/cm²の閾値を示す高効率の共振器作製に成功した。なお、この閾値は先に報告したアニール薄膜結晶の切り取り型マイクロディスクの閾値 200 μ J/cm² の 1/6 である。

(5) (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー分子を用いた微小共振器の研究

(森田孝裕、舛本泰章、佐々木史雄^A、原市 聡^A、堀田 収^B ^A産総研光技術, ^B京工繊大繊維)

チオフェン環とフェニレン環から構成された新規有機化合物分子 BPnT は、高い発光効率を持ち、有機半導体レーザーへの応用が期待されている。微小円筒共振器内とプラナー型微小共振器内に組み込まれた BP1T の光学特性の解明を行った。BP1T 分子を PMMA (ポリメチルメタクリレート) 中に分散させ、BP1T 分子を発光媒体、PMMA を共振器媒体として微小円筒共振器を作成し、室温で Nd:YAG レーザーの二倍波 532nm で励起すると、等間隔のピークからなる発光スペクトルが確認でき、光が屈折率の高い共振器内部と大気との境界面で全反射しながら周回する際に生じる、ウィスパーリングギャラリーモード (Whispering Gallery Mode) であることが、波動方程式の固有値問題の解との比較の結果、明らかにされた。次に、BP1T 分子を分散させた PMMA 膜を両側から銀膜を反射鏡としてはさんだプラナー型微小共振器と誘電体多層膜を反射鏡としてはさんだプラナー型微小共振器を作成し、いずれの場合も反射スペクトルと発光スペクトルにそれぞれ共振器ディップと共振器ピークを見いだした。

(6) 伝導性ポリマーから CdSe コアシェル量子ドットへのエネルギー移動

(P. Jing^A, X. Yuan^A, W. Ji^A, 池沢道男, Y. A. Wang^B, X. Liu^A, L. Zhang^A, J. Zhao^A, 舛本泰章

^A中国科学院長春光学精密機器物理研究所, ^BOcean NanoTech, USA) [論文 1]

化学的手法で作製した CdSe コア・シェル量子ドットを含む電子伝導性ポリマー [1,3,5-Tris(N-phenylbenzimidazol-2-yl)benzene (TPBI)] を用いて、量子ドットとポリマーとの間にエネルギー移動を観測した。CdSe/CdS、CdSe/ZnS および CdSe/Multi-shell コア・シェル量子ドットを TPBI にドーピングすると、そのいずれに対しても発光の励起スペクトルと、発光の時間応答に TPBI (ドナー) と量子ドット (アクセプター) 間のエネルギー移動があることが明らかになった。Förster 共鳴エネルギー移動機構による計算での実験データへのフィッティングからエネルギー移動速度が 0.07 ns⁻¹ と求まった。量子ドットを TPBI に十分ドーピングすると、エネルギー移動の効率は 60% を超えドーピング比、量子ドットのシェルの種類や厚みに大きく依存することが明らかにされた。量子ドットで光生成された励起子のエネルギーを伝導性ポリマーに、このエネルギー移動機構により移動させ電流・電圧として取り出せると考えられる。今後、量子ドットの種類、シェル構造、界面制御や伝導性ポリマーの選択、量子ドットのポリマーへのドーピングを工夫しながら、この効率の向上をはかり、さらにポリマー膜形成、ポリマーへの透明電極形成、電極形成などのプロセス技術を用いて、量子ドット・ポリマーハイブリッド太陽電池セルの作製とその性能評価・向上につなげる。

(7) MnS/ZnS コア/シェル量子ドット中の Mn²⁺イオンの高効率発光

(P. Jing^A, J. Zheng^A, 池沢道男, X. Liu^A, S. Lv^A, X. Kong^A, J. Zhao^A, 舛本泰章 ^A中国科学院長春光学精密機器物理研究所) [論文 6]

MnS/ZnS コア/シェル量子ドットを化学的に合成し、厚い ZnS シェルを用いると 35% を越える量子効率をもつ Mn²⁺イオンの高効率発光を達成した。140~300K の間で温度上昇とともに MnS コアと ZnS シェルの間の界面に局在した電子・正孔の熱活性により発光が増加する。量子ドット中の Mn²⁺イオンの発光減衰は 1~2ms、数 100 μ s と数 10 μ s の 3 つの指数関数成分からなる。おどろくべきことに、Mn²⁺イオンの発光寿命はシェルの厚さにほんのわずかに依存するだけで、量子ドットの発光の量子効率と明らかに異なる。実験結果から、MnS/ZnS 量子ドットの発光量子効率の改善の機構は ZnS シェルから Mn²⁺イオンへのエネルギー移動が増加し、厚い ZnS シェルで量子ドットの表面を覆うことで Mn²⁺イオンから ZnS シェルの表面トラップへの非輻射緩和がわずかに減少することで理解できる。

【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

(伊藤宙陸、柴田佑輔、古谷景佑、野村晋太郎) [論文 21]

近接場光学顕微鏡を用いた局所的な光励起と輸送測定を組み合わせた二次元電子系の端状態の空間分布を調べるのに有用な手段である。端状態の観測のためには、高い空間分解能が必要であると共に適切な光励起エネルギーを選択することが必要である。光励起エネルギー、キャリアが生成するのに十分な大きさであり、かつ光励起後のキャリア温度がランダウ準位間のエネルギー差よりも十分に小さくなる条件を満たす必要がある。そこで、私たちは近接場光学顕微鏡を用いて、単一ヘテロ接合試料の電圧端子間に発生する光起電圧の光励起エネルギー依存性を強磁場中で調べた。その結果、磁場 2.02 T、試料温度は 200 mK において、図 13 に示すように磁場中半導体二次元電子量子ホール試料端に形成される圧縮性液体と非圧縮性液体の縞状分布を観測することに世界に先駆けて初めて成功した。吸収ピークの低エネルギー側の裾を光励起して剰余エネルギーが小さい場合は端近傍の狭い範囲に光起電圧が発生し、より高いエネルギーで光励起して剰余エネルギーが大きい場合はバルク状態を含むホールバーの内側へ光起電圧の発生する範囲が広がることがわかった。以上のように、私たちの開発した手法により、二次元電子系の任意の位置に任意の剰余エネルギーの電子を注入することが可能であることが示された。

本研究は低温物性グループの大塚教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所赤崎グループとの共同研究である。

(2) 半導体二次元電子系の分数量子ホール領域における発光分光 (野村晋太郎)

分数量子ホール効果領域における二次元電子系発光は、全電荷が分数となる励起子である分数荷電励起子の存在が予言され、新たな興味を持たれている。 $\nu < 1$ において電子は最低ランダウ状態を占有し、Laughlin 状態では完全偏極しているとされる。従来の描像では、この状態に十分微弱な光で励起すると電子-正孔対が生成され、発光は比較的自由的な正孔と電子との間の再結合として理解された。私たちは、分数量子ホール効果領域における二次元電子系発光現象を理解するためには励起状態を含んだ相関を理解することが重要であることを示した。光励起により余剰エネルギーが生じるため、熱平衡に達する前に発光し、非平衡状態を考察する必要性に迫られる。分数量子ホール効果領域での発光は、電子間、電子-正孔間相互作用が本質的な役割を果たす現象であるので電子と正孔で記述するより、相互作用を繰り込んだ「粒子」、即ち複合フェルミオンや分数荷電励起子により記述した方が現象を理解しやすい。図 14 に σ^- 、 σ^+ 円偏光の発光強度の電子密度依存性を示す。 σ^- 偏光は主に上向きスピンの多数キャリアの再結合、 σ^+ 偏光は下向きスピンの少数キャリアの再結合に対応する。分数量子ホール効果状態を示す特定の分数 ν において構造が見られる。 σ^+ 偏光の低エネルギー側発光は $\nu = 1/2$ に対して対称に、 σ^- 偏光は反対称に変化する。これは、有効磁場 B^* が $\nu = 1/2$ において 0 となり、その両側において、 B^* に依存したスピンギャップエネルギーが増大するためである。さらに、この発光はエネルギー緩和過程のダイナミクスに左右される、つまり最低励起状態のみを知れば十分なのではなく、途中の緩和過程によって観測される円偏光度等の結果が異なることが示された。以上の結果は、励起状態間の相関、動的相関を考慮する必要があることを示す。私たちは、一重項・三重項分数荷電励起子の生成レート、結合エネルギー、光励起により生成される電子、正孔の偏極度を考慮し、分数荷電励起子と平衡関係にある複合フェルミオンとを

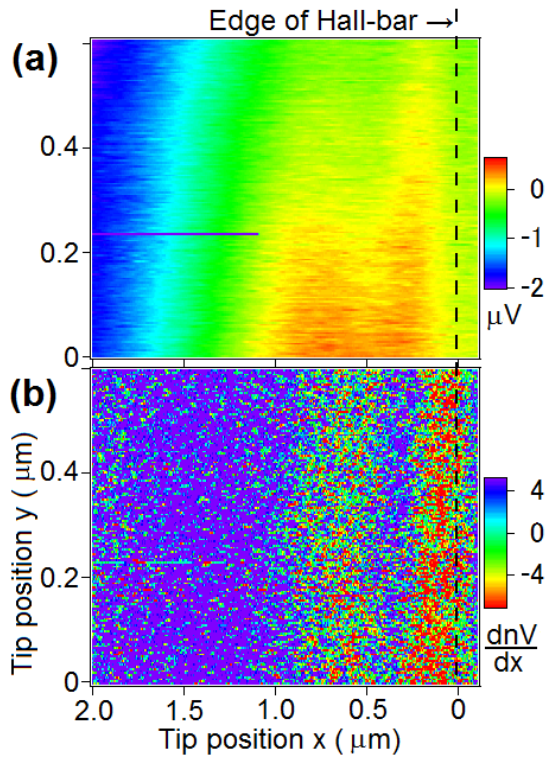


図 13: 磁場 2.02 T、試料温度は 200 mK において近接場顕微鏡を用いて得た (a) 光起電圧の空間マップ像と (b) その空間微分マップ像。端付近に縦方向縞状の構造が見られる。

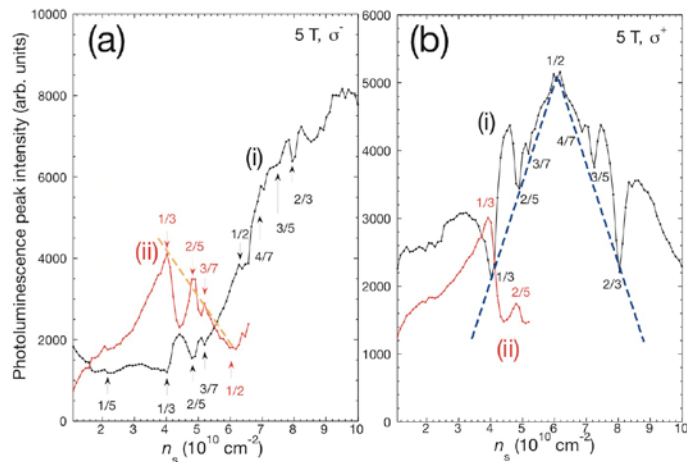


図 14: 分数量子ホール効果領域の (a) は σ^- 偏光、(b) は σ^+ 偏光での (i) 低エネルギー側、(ii) 高エネルギー側にみられる 2 つのピークの発光強度の電子密度依存性。測定温度 $T=100$ mK、磁場 $B=5$ T。

レート方程式を用いてモデル化した。その結果、複合フェルミオン、即ち電子系のスピン偏極度、分数量子ホール効果ギャップエネルギー Δ 、等の値を発光スペクトルにより決定することがはじめて可能となった。

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

(3) 半導体中スピン観測のためのナノ SQUID の開発 (柴田佑輔、宋戸将之、野村晋太郎) [論文 26]

ナノメートルサイズの超伝導量子干渉素子 (ナノ SQUID) は、ジョセフソン接合を二つ有する量子干渉素子であり、超高感度の磁場検出素子として知られる。ナノ SQUID は単一スピンの検出のための有力な候補である。私たちは半導体ナノ構造中電子スピンの直接的な観測のために、ナノ SQUID の開発を行っている。ナノスケールでの局所磁気観察用プローブとして、SQUID と測定対象との直接的な磁気カップリングについて検討し、マッピング可能な走査型 SQUID プローブの開発に着手した。まずベクトル磁気観察を想定した 2ch-SQUID 測定系の開発を行った。また基板端へのフォトリソグラフィーを可能にするプロセスを開発し、作製した 4 端子パターンにおける Nb/Au 薄膜の超伝導転移を確認した。極低温中で動作するピエゾアクチュエータを用いた走査機構の開発を行った。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

(4) Si ナノレイヤー・ナノワイヤーの発光分光 (櫻井蓉子、野村晋太郎) [論文 22]

最近、ナノメートルサイズの極微デバイスの特性評価や LSI における光配線等、デバイスへの応用の観点から低次元 Si の光学特性の研究が重要になってきている。Si は励起子 (FE) の寿命が長く、異方的かつ縮退したバンド構造を持つため、励起子の電子正孔液滴 (EHD) への凝縮を観測するのに適した系である。二次元系では、励起子の結合エネルギーが三次元系の 4 倍となり EHD が生成されやすい。擬一次元系である Si ナノワイヤーは、次世代デバイスの有力候補である。生成された EHD の安定性は、例えば、非発光中心や EHD 生成の際の核等、Si/SiO₂ 界面の特性に影響を受ける。このため、SOI の発光測定は、Si/SiO₂ 界面の特性を知る上でも有力なツールである。物理としても一次元系、二次元系の多励起子状態の解明は興味深い対象である。そこで、本研究では、低温において異なる膜厚の Si ナノワイヤーおよび Si ナノワイヤーの顕微発光測定を行った。図 15 に得られた発光スペクトルの膜厚依存性を示す。

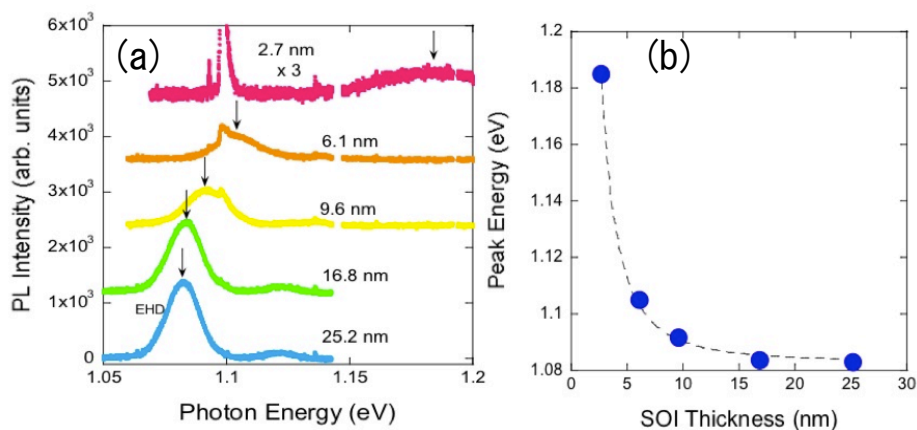


図 15: (a) 4.4 K における膜厚 2.7 ~ 25.2 nm の SOI の発光スペクトル。(b) EHD からの発光ピークエネルギーの膜厚依存性。破線はフィット曲線 $f(d)=c/d^2+1.08$ を示す。

矢印で示す EHD からの発光が膜厚に依存して高エネルギーシフトすることが示された。また、Si ナノワイヤーからの発光強度の水素アニーリング温度依存性を調べ、水素アニーリング温度に依存した Si ナノ

ワイヤーの界面準位密度の変化を光学的に検知することに成功した。

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。

<論文>

1. P. Jing, X. Yuan, W. Ji, M. Ikezawa, Y. A. Wang, X. Liu, L. Zhang, J. Zhao, Y. Masumoto: "Shell-Dependent Energy Transfer from 1,3,5-Tris (*N*-phenylbenzimidazol-2-yl) Benzene to CdSe Core/Shell Quantum Dots", *J. Phys. Chem. C* 114, 19256-19262 (2010).
2. E. L. Ivchenko, V. K. Kalevich, A. Yu. Shiryaev, M. M. Afanasiev, Y. Masumoto: "Optical orientation and spin-dependent recombination in GaAsN alloys under continuous-wave pumping", *J. Phys. C.* 22, 465804-1-12 (2010).
3. Y. Masumoto, K. Goto, B. Pal, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Spectral diffusion of type-II excitons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Physica E* 42, 2579-2582 (2010).
4. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Coherent spin precession of electrons and excitons in charge tunable InP quantum dots", *Physica E* 42, 2493-2496 (2010).
5. 舛本泰章: 「量子ドット中の永続的ホールバーニング」 *光学* 39(9), 453-460 (2010).
6. J. Zheng, W. Ji, X. Wang, M. Ikezawa, P. Jing, X. Liu, H. Li, J. Zhao, Y. Masumoto: "Improved Photoluminescence of MnS/ZnS Core/Shell Nanocrystals by Controlling Diffusion of Mn Ions into the ZnS Shell", *J. Phys. Chem. C* 114, 15331-15336 (2010).
7. Y. Masumoto, K. Goto, S. Yoshida, Y. Sakuma, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "One- and two-dimensional spectral diffusion of type-II excitons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Phys. Rev. B* 82, 075313-1-5 (2010).
8. Y. Ido, Y. Masumoto, F. Sasaki, M. Mori, S. Haraichi, S. Hotta: "Reduced lasing threshold in thiophene/phenylene co-oligomer crystalline microdisks", *Appl. Phys. Express* 3, 012702-1-3 (2010).
9. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Anisotropic spin dynamics of confined electrons in CdTe/ZnTe quantum structures", *Phys. Rev. B* 81, 125313-1-10 (2010).
10. F. Sasaki, M. Mori, S. Haraichi, Y. Ido, Y. Masumoto, S. Hotta: "Microdisk lasers and field effect transistors of thiophene/phenylene co-oligomers by using high temperature deposition method", *Organic Electronics* 11, 1192-1198 (2010).
11. S. Tomimoto, S. Nozawa, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: "Optical electron spin orientation in Ga-doped and undoped ZnO films", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
12. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Reexamination of the atomic configurations of NN centers and observation of new infrared luminescence centers in GaP:N", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
13. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, Y. Sakuma: "Exciton Dephasing and Biexcitons in InAs Quantum Rhombic Disks", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
14. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Initialization of Electron Spins in One-Electron-Doped InP Quantum Dots", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
15. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, S. Tomimoto, Y. Sakuma: "The enhanced binding energy for biexcitons in InAs quantum dots", *Appl. Phys. Lett.* 98, 061905-1-3 (2011).
16. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Exciton spin dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", *Phys. Stat. Sol. B* 248(2), 389-392 (2011).
17. Y. Masumoto, Y. Hirata, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Polarized photoluminescence from single wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Appl. Phys. Lett.* 98, 211902-1-3 (2011).

18. Y. Sakurai, Y. Takada, J-I. Iwata, K. Shiraishi, S. Nomura, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki: "Electron Tunneling between Si Quantum dots and Two Dimensional Electron Gas under Optical Excitation at Low Temperatures", ECS Transactions 28 (1), 369-374 (2010).
19. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of the New Physical Model of Ohmic Contact for Future Nano-scale Contacts", ECS Transactions 28 (1), 369-374 (2010).
20. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, T. Endoh, K. Shiraishi: "Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot", IEICE Transactions on Electronics, E93-C No.5, 563-568 (2010).
21. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials 19 (4), 563-569 (2010).
22. Y. Sakurai, S. Nomura, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada: "Photoluminescence Characteristics of Ultra-Thin Silicon-on-Insulator at Low Temperatures", Key Engineering Materials 470, 39-42 (2011).
23. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Electron Tunneling Model in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Structure", Key Engineering Materials 470, 48-53 (2011).
24. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura K. Shiraishi: "Investigation about I-V Characteristics in a New Electronic Structure Model of the Ohmic Contact for Future Nano-scale Ohmic Contact", Key Engineering Materials 470, 43-47 (2011).
25. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell", Jpn. J. Appl. Phys. (in press).
26. T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya: "Fabrication of weak-link Nb-based nano SQUIDs by FIB process", FDP-39 (in press).

<学位論文>

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文 (2011年3月)

1. 濱野毅信: 「GaP:N および GaAs:N 中の単一等電子トラップの磁気光学」
2. 平田裕基: 「ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光フォトルミネッセンス」
3. 森田孝裕: 「微小共振器に組み込んだ(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの光学特性」
4. 宍戸将之: 「2次元電子系スピン検出のための GaAs 上における Nb-SQUID の研究」
5. 古谷景佑: 「近接場光学顕微鏡を用いた2次元電子系端状態における光励起効果の研究」
6. 森川祐: 「High-k ゲート絶縁膜付き GaAs/AlGaAs 量子井戸発光」
7. 重田浩司: 「ハフニウム系絶縁膜中欠陥の光局所励起による研究」

<国際会議>

1. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Exciton spin dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'10) (Brisbane, 2010.7).
2. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Initialization of Electron Spins in One-Electron-Doped InP Quantum Dots", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
3. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, Y. Sakuma: "Exciton Dephasing and Biexcitons in InAs Quantum Rhombic Disks", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
4. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Reexamination of the atomic configurations of NN centers and observation of new infrared luminescence centers in GaP:N", 30th International Conference on the

- Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
5. S. Tomimoto, S. Nozawa, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: "Optical electron spin orientation in Ga-doped and undoped ZnO films", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
 6. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Atomic configurations of NN centers and new infrared luminescence centers in GaP:N", The International Conference on NANOPHOTONICS 2010 (Tsukuba, 2010.6).
 7. S. Tomimoto, K. Kawana, Y. Masumoto: "Coexistence of the fast and slow spin orientation processes of the doped electron in InP quantum dots", The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (Tokyo, 2010.8).
 8. Y. Sakurai, Y. Takada, J-I. Iwata, K. Shiraishi, S. Nomura, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki: "Electron Tunneling between Si Quantum dots and Two Dimensional Electron Gas under Optical Excitation at Low Temperatures", ECS meeting (Vancouver, 2010.4).
 9. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of the New Physical Model of Ohmic Contact for Future Nano-scale Contacts", ECS meeting (Vancouver, 2010.4).
 10. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Proposal of a new electronic structure model of Ohmic contacts for the future metallic source and drain", 2010 International Workshop on Joint Technology (Shanghai, 2010.5).
 11. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", O-50, Nanophotonics 2010 (Tsukuba, 2010.6).
 12. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki: "Reduction of electric-field-dependent broadening of photoluminescence linewidth with electron density", P-B19, Nanophotonics 2010 (Tsukuba, 2010.6).
 13. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Photoluminescence characteristics of ultra-thin silicon-on-insulator at low temperatures", P-25, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
 14. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective electron tunneling model in Si-nano dot floating gate MOS structure", P-37, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
 15. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of I-V characteristics in a new electronic structure model of the Ohmic contact for future nano-scale Ohmic contact", P-20, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
 16. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Real-space mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", Th-5-12, 29th Electronic Materials Symposium (Syuzenji, 2010.7).
 17. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama: "Dynamical correlation of fractionally charged excitons with a two-dimensional electron system", P1-196, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
 18. M. Yamaguchi, H. Sanada, S. Nomura, T. Sogawa, H. Tamura, T. Akazaki: "Spin lifetime of localized electrons in a gated undoped GaAs quantum well at low electron density", P1-196, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
 19. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope", P2-188, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).

20. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, Y. Shigeta, T. Endoh: "Collective tunneling model between two-dimensional electron gas to Si-nano-dot", P2-105, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
21. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell", E-3-2, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (Tokyo, 2010.9).
22. T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, A. Yamaguchi, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya: "Weak-link Nb nanoSQUIDs fabricated by FIB process", 23rd International Symposium on Superconductivity (Tsukuba, 2010.11).
23. (invited) S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, P. Hawrylak: "Circular polarized photoluminescence from fractionally charged excitons in composite fermion sea", 2010 Workshop on Innovative Devices and Systems (WINDS) (Kohala coast, 2010.12).
24. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, P. Hawrylak: "Composite Fermion Picture for Photoluminescence in the Fractional Quantum Hall Effect Regime", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
25. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Photoluminescence from Electron-Hole Droplet in Ultra-Thin Silicon-on Insulator at Low Temperatures", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
26. K. Miyagi, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, S. Nomura: "Gate Voltage Dependence of Lifetime of Photoluminescence From an Asymmetric GaAs-AlGaAs Double Quantum Wells", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
27. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, S. Nomura: "Investigation of the Spatial Profile of the Quantum-Hall Edge State by the Photovoltage Mapping Using Near-field Optical Microscopy", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
28. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki: "Motional Narrowing of Photoluminescence Linewidth of 2DEG-hole Emission", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
29. K. Tsumura, M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, K. Hirakawa, H. Takayanagi: "Development of graphene-based superconducting quantum interference device", MANA International Symposium 2011 (Tsukuba, 2011.3).
30. M. Shishido, S. Nomura, T. Matsumoto, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, H. Takayanagi: "Evaluation of focused ion beam induced damage to GaAs heterojunction by micro-photoluminescence measurements", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).
31. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Silicon-on-Insulator Thickness Dependence of Photoluminescence from Electron-Hole Droplet", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).
32. H. Juda, R. Hasunuma, K. Yamabe, K. Yamada, K. Shiraishi, S. Nomura: "Leakage current mapping of hafnium silicate gate dielectrics by local optical excitation", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).

<講演>

1. 池沢道男、佐久間芳樹、曾根良則、張遼、濱野毅信、館林潤、舛本泰章：「GaAs 中の窒素等電子発光中心からの単一光子発生」 秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会（2010 年 9 月）
2. 館林潤、佐久間芳樹、池沢道男、曾根良則、落合雅幸、池田直樹、舛本泰章、中尾正史、杉本喜正、迫田和彰：「窒素を導入したGaPナノワイヤの結晶成長及び光学特性」 春季第58回応用物理学関係連合講演会（2011年3月）

3. 野村晋太郎：「半導体二次元電子系の発光分光」、特定領域研究「光一分子強結合反応場の創成」領域 および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」 領域合同シンポジウム（日本科学未来館みらいCAN ホール）（2010年5月）
4. 山口真澄、野村晋太郎、田村浩之、赤崎達志：「高品質 GaAs 量子井戸発光の電子密度-電場強度二次元マップ、」特定領域研究「光一分子強結合反応場の創成」領域 および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」 領域合同シンポジウム（日本科学未来館みらいCAN ホール）（2010年5月）
5. 櫻井蓉子、白石賢二、大毛利健治、山田啓作、野村晋太郎：「低温における極薄 SOI の発光特性」応用物理学会学術講演会（2010年9月）
6. 柴田祐輔、宍戸将之、松本哲朗、柏谷 聡、野村晋太郎、高柳英明：「局所磁気観察用 2ch-SQUID 測定系の開発」 応用物理学会学術講演会（2010年9月）
7. 伊藤宙陸、古谷景佑、柴田祐輔、大塚洋一、野村晋太郎、柏谷聡、山口真澄、田村浩之、赤崎達志：「近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測 その2」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
8. 野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、平山祥郎：「分数量子ホール領域の円偏光発光スペクトルの温度依存性 II」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
9. 山口真澄、眞田治樹、寒川哲臣、田村浩之、赤崎達志、野村晋太郎：「ゲートつき非ドープ GaAs 量子井戸のスピン緩和測定」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
10. 宮城浩一、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、野村晋太郎：「ゲート付 GaAs-AlGaAs 非対称二重量子井戸の蛍光寿命のゲート電圧依存性」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
11. （招待講演）野村晋太郎：「複合フェルミオン描像による分数量子ホール効果領域発光の理解」 東北大学電気通信研究所研究会“ナノスケールのゆらぎ・電子相関制御に基づく新規ナノデバイス”（宮城県）（2010年11月）
12. 野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、平山祥郎：「複合フェルミオンスピン偏極の光学検出」 PASPS-15（つくば）（2010年12月）
13. 野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、平山祥郎：「分数量子ホール領域の発光の微細構造」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
14. 櫻井蓉子、大毛利健治、山田啓作、角嶋邦之、岩井洋、白石賢二、野村晋太郎：「低温における Si ナノワイヤーの発光特性」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
15. 古谷景佑、伊藤宙陸、柴田 祐輔、大塚洋一、野村晋太郎、柏谷聡、山口真澄、田村浩之、赤崎達志：「近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測 その3」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
16. 矢ヶ部恵弥、佐久間大輔、津村公平、石黒亮輔、渡辺 英一郎、津谷大樹、野村晋太郎、高柳英明：「トンネル型マイクロ SQUID 磁束計による光励起少数電子スピン観測システムの開発」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
17. 柏谷裕美、松本哲朗、野村晋太郎、高柳英明、柏谷 聡：「Nb 系 nano - SQUID の開発」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
18. 櫻井 蓉子、大毛利 健治、山田 啓作、角嶋 邦之、岩井 洋、白石 賢二、野村 晋太郎：「デバイス評価に向けた Si ナノワイヤーの発光測定」 第58回応用物理学関係連合講演会（2011年3月）
19. 森川祐、野村晋太郎、山口真澄、小野満恒二、原田裕一、赤崎達志：「発光スペクトルによる high-k ゲート絶縁膜付き GaAs/AlGaAs 量子井戸のゲート制御性評価」 第58回応用物理学関係連合講演会（2011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 |
| 大学院生 D2 | 柴田恭幸 |
| | D2 大村彩子 (H21.6-) |
| | D1 五十嵐一泰 |
| | M2 栗原佑太朗 |
| | M1 伊藤 港 |
| | M1 朱 徐皓 |
| | M1 淵側良太 |
| | B4 若梅一真 |
| | B4 伊藤満太 |

【1】ポリマー型電池材料の電子状態[1] (守友、(JASRI)、(理研)、(島根大)) 図1

ポリマー型電池材料であるシアノ錯体は、Li イオンの出し入れに対して堅固であることが知られている。高輝度放射光X線光源を利用して、結晶内で酸化還元反応を示す Co-Fe シアノ錯体の MEM 電子密度を決定した。さらに、得られた電子密度分布より、静電ポテンシャルを計算した。これらの結果は、Fe-C 間の強い π -d 混成を示している。さらに、この π -d 混成は、酸化状態でも還元状態でも観測される。したがって、シアノ錯体のポリマー構造が堅固である理由は、この強い π -d 混成のためであると考えられる。

この成果は、毎日新聞、科学新聞、山陰中央新報、でも取り上げられた。

【2】カチオン交換によりシアノ錯体の対称性を制御 [2] (松田、守友、(JASRI)) 図2

シアノ錯体はナノポーラス構造をとり、ナノ空間を専有するアルカリ金属イオン(ゲスト)を収納することができる。このアルカリ金属イオンとシアノ錯体骨格との間には強い相互作用があると思われる。我々は、Co-Fe シアノ錯体のカチオンとカリウムからナトリウムに置換することにより、シアノ錯体骨格の対称性を立方晶から菱面晶へ替えることに成功した。さらに、第二高調波発生効率が、立方晶—菱面晶転移に伴い、わずかに増大した。

この成果は、日経産業新聞、化学工業日報新聞、科学新聞、でも取り上げられた。

【3】シアノ錯体全固体素子のイオン移動と

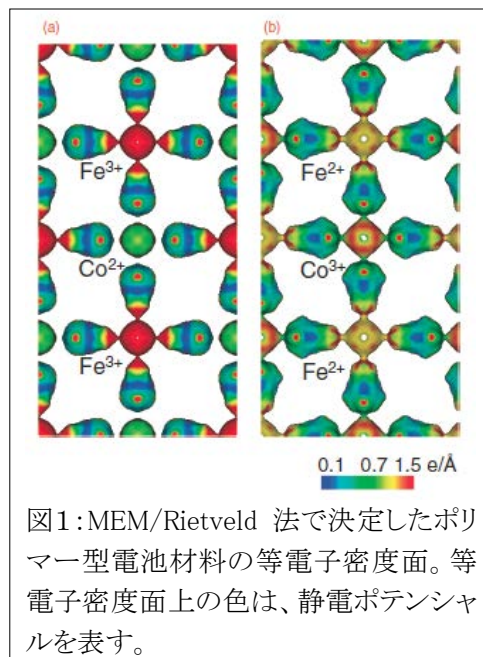


図1: MEM/Rietveld 法で決定したポリマー型電池材料の等電子密度面。等電子密度面上の色は、静電ポテンシャルを表す。

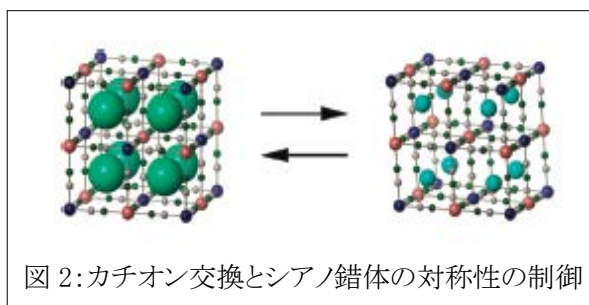


図2: カチオン交換とシアノ錯体の対称性の制御

膜形態[3](柴田、守友)

シアノ錯体薄膜を物理的に接合し電圧を印加すると、片方の膜から他方の膜にカチオン移動を誘起することができる。この素子は、電解質溶液を含まないので、全固体素子と呼ぶ。我々は、3種類のシアノ錯体薄膜をホモ接合し、イオン移動の速度と薄膜の表面形態との関係を調べた。その結果、結晶性のよい薄膜ほど、高速なイオン移動を示すことが分かった。

【4】 Co-Fe シアノ錯体の光誘起相転移ダイナミクス[4] (伊藤港、上岡、守友)

図3

Co-Fe シアノ錯体は光誘起相転移を示すが、そのダイナミクスの詳細は明らかにされていない。我々は、良質薄膜を用いることで、光誘起相転移の変換効率の絶対値を決定するとともにそのダイナミクスを明らかにした。Co-Fe シアノ錯体薄膜の光誘起相転移では、(1) 励起光強度の閾値や(2) 不可時間といった非線形性が観測されなかった。これは、ガラス基盤と Co-Fe シアノ錯体は強く結合し、電子-格子相互作用が抑制されたためであると考えられる。事実、光誘起相転移に伴い格子膨張は観測されていない。

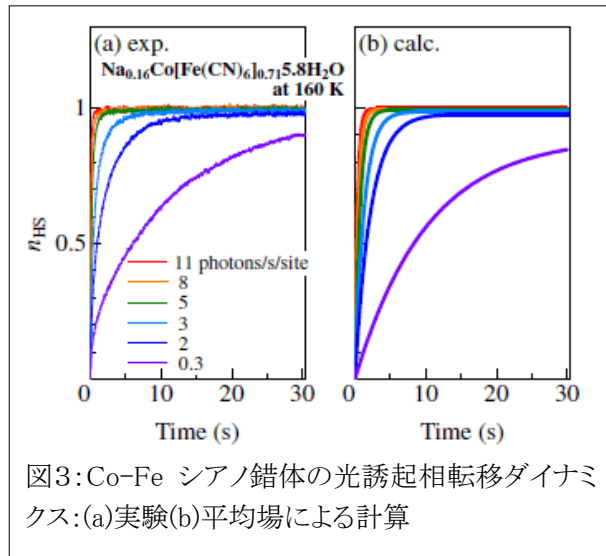


図3: Co-Fe シアノ錯体の光誘起相転移ダイナミクス: (a) 実験 (b) 平均場による計算

【5】 シアノ錯体の高圧ラマン分光[5] (守友、松田、淵側、阿部、上岡)

シアノ錯体では、格子定数とともに熱膨張係数が正から負に変化することが知られている。この経験則の起源に迫るために、高圧ラマン分光法により CN 伸縮振動モードの圧力係数を測定した。CN 伸縮振動モードの圧力係数は、格子定数とともに急激に小さくなることが分かった。格子定数が大きな領域で圧力係数が小さな理由は、Fe(CN)₆ 八面体が回転して逃げるためであると考えられる。事実、格子定数が大きな領域では、CN 結合長の格子定数の格子定数依存性が小さい。こうした Fe(CN)₆ 八面体の回転が負の熱膨張の起源であると考えられる。

【6】 Fe-Ni 固溶体の価数差分光 [6] (大村、栗原、守友、(山形大))

Fe-Ni 固溶体の酸化還元プロセスを価数差分光法で明らかにした。

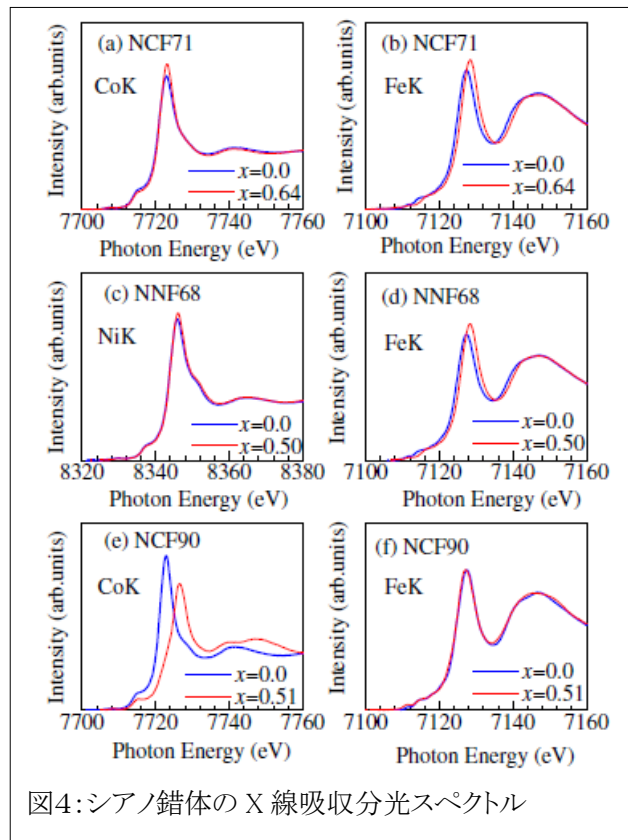


図4: シアノ錯体の X 線吸収分光スペクトル

【7】 X線吸収分光法と価数差分分光法によるシアノ錯体の電子状態 [7] (栗原、守友、(東京理科大)、(JASRI)(三菱化学)) 図4

Ni-Fe シアノ錯体、Co-Fe シアノ錯体 (Fe 欠損大)、Co-Fe シアノ錯体 (Fe 欠損小) の電子状態を X 線吸収分光と価数差分分光法により明らかにした。可視領域の吸収スペクトルを第一原理計算から得られた電子構造と比較した。第一原理計算と実験結果は半定量的に一致し、この物質系においても第一原理計算が有効であることが示された。

【8】 Zn-Fe シアノ錯体の圧力誘起相転移[8] (松田、柴田、上岡、守友)

Zn-Fe シアノ錯体の高圧ラマン分光を行ったところ、2GPa 程度で異常が観測された。この異常は、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 八面体の回転歪によるものと考えられる。

【9】 熱整流効果[8] (小林、守友、(早大)、(名古屋大))

異なる熱伝導度を有する材料を接合すると熱整流効果が期待される。これを確かめるために、異なる組成の $(\text{Sr},\text{La})\text{CoO}_3$ 焼結接合した素子の熱伝導度を測定した。特に、熱整流効果を高めるため非対称な形状の素子を作成した。得られた熱伝導度は、各々の材料の熱伝導度と素子形状から再現することができた。

【10】XFEL 利用推進に向けた委託研究

本研究グループは、文部科学省からXFEL利用推進課題(「フェムト秒時間分解顕微鏡の構築と光応答性物質の探索」:代表 守友 浩、H21.4-H23.3)の委託研究を推進している。

【11】戦略イニシャティブ(A)に関する活動

戦略イニシャティブ(A)「学際物質科学研究拠点(代表:大塚洋一)」(平成20年度-22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22年度KEK大学等連携支援事業「加速器科学と融合した物質科学教育研究拠点の構築に向けて」の代表として、筑波大-KEKの連携・協力の強化のための活動をおこなった。主な事業内容は、以下のとおりである。

(1) 研究会の開催

- ◇ 第4回連携研究会【11/29@筑波大学】-共同研究・装置提案報告会-
- ◇ 第5回連携研究会【12/17-18@筑波大学】-熱電変換材料と新規機能性材料-
- ◇ 第6回連携研究会【1/28-29@筑波大学】-有機太陽電池の基礎と応用-

(2) 放射光とパルス中性子の高度利用に向けたテーマの開拓

大学院生や若手研究者から、量子ビーム利用を目指した共同研究課題と装置提案課題を公募した。

<論文>

1. J. E. Kim, H. Tanaka, K. Kato, M. Takata, and Y. Moritomo, "Extended d-Electron State of $\text{Fe}(\text{CN})_6$ Unit in Prussian Blue Analogue", Appl. Phys. Express, 4, 125801 (2011).

2. T. Matsuda, J. E. Kim, Y. Moritomo, "Symmetry switch of cobalt ferrocyanide framework by alkaline cation exchange", J. Am. Chem. Soc. 132,12206 (2010)
3. T. Shibata, Y. Moritomo, "Electric properties of all solid ion-transfer device fabricated with transition metal cyanides" Jpn. J. Appl. Phys., 49, 094101 (2010).
4. M. Ito, H. Kamioka, Y. Moritomo, "Crystallization process of photoexcited high-spin sites in Co-Fe cyanide film", J. Phys. Soc. Jpn., 80, 023703 (2011)
5. Y. Moritomo, T. Matsuda, R. Fuchikawa, Y. Abe, and H. Kamioka, "High-pressure Raman spectroscopy of transition metal cyanide", J. Phys. Soc. Jpn., 80, 024603 (2011)
6. A. Omura, Y. Kurihara, M. Ishizaki, M. Kurihara and Y. Moritomo, "Oxidization process of Fe-Ni mixed Prussian blue analogue as investigated by valence-differential spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys., 50, 032401 (2011)..
7. Y. Kurihara, H. Funashima, M. Ishida, N. Hamada, T. Matsuda, K. Igarashi, H. Tanida, T. Uruga and Y. Moritomo, "Electronic Structure of Hole-Doped Transition Metal Cyanides", J. Phys. Soc. Jpn., 79, 044710 (2010).
8. D. Sawaki, W. Kobayashi, Y. Moritomo, and I. Terasaki, "Thermal rectification in bulk materials with asymmetric shape ", Appl. Phys. Lett. 98, 081915 (2011)
9. H. Nakao, T. Murata, D. Bizen, Y. Murakami, K. Ohoyama, K. Yamada, S. Ishiwata, W. Kobayashi and I. Terasaki, "Cobalt e_g orbital ordering of the intermediate spin state in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10.5}$ ", J. Phys. Soc. Jpn. 80, 023711 (2011). (Editor's choice)
10. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, M. Hirano, L. Skuja, H. Hosono, "Diffusion of oxygen molecules in fluorine-doped amorphous SiO_2 ", Materials Science and Engineering B 173, 158-161 (2010).
11. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, M. Hirano, L. Skuja, H. Hosono, "Exchange between interstitial oxygen molecules and network oxygen atoms in amorphous SiO_2 studied by ^{18}O isotope labeling and infrared photoluminescence spectroscopy", Phys. Rev. B 83, 064202/1-12 (2011).

<著書>

1. 守友 浩、「原子のジャングルジムと負の熱膨張係数」、パリテイ、25、38-41、(2010)
2. 上岡隼人、「Eu²⁺蛍光体」、シーエムシー出版 「酸化物半導体と鉄系超伝導—新物質・新機能・応用展開—」(監修:細野秀雄, 平野正浩) 第4章第3節. 149-159 (2010)

<学位論文>

1. 修士論文 栗原佑太朗、「シアノ錯体薄膜の価数差分分光とエピタキシャル成長」

<講演>

1. 守友 浩、「シアノ錯体薄膜のイオニクス」第5回連携研究会「熱電変換材料と新規機能材料」@筑波大、2010/12/18-19
2. 松田智行、「プルシアンブルー類似体結晶構造のカチオン依存性」第5回連携研究会「熱電変換材料と新規機能材料」@筑波大、2010/12/18-19

3. 小林航、「コバルト酸化物熱電変換材料と熱整流素子の開発」第5回連携研究会「熱電変換材料と新規機能材料」@筑波大、2010/12/18-19
4. 守友 浩、「過渡吸収分光による有機薄膜のダイナミクスの研究」第6回連携研究会「有機太陽電池の基礎と応用」@筑波大、2011/1/28-29
5. 守友 浩、「ゲスト-ホスト相互作用系としてのシアノ錯体の構造物性の展開」、ナノテクシンポジウム@筑波大学、2010/8/5-7
6. 守友 浩、「シアノ錯体のイオン制御」、第4回東北大 COE シンポジウム@東北大、2010/12/3-5
7. 守友 浩、松田智行、「錯体におけるLiドーブと構造物性」第4回連携研究会@筑波大、2010/11/29
8. 上岡隼人、「シアノ錯体の過渡的電子相の時間分解 XAFS 分光」第4回連携研究会@筑波大、2010/11/29
9. 小林航、「遷移金属酸化物におけるリチウムドーブと構造物性展開」第4回連携研究会@筑波大、2010/11/29
10. (invite)Y. Moritomo, "Fast electrochromism in all solid device made by Prussian blue analogues", IEM-9@Boedeaux, 2010/9/6-9
11. Y. Moritomo, "Noble functionality of Prussian blue analogues", ICSM2010@Kyoto, 2010/9/4-9
12. 守友 浩、「光励起によるナノポーラスシアノ錯体の物質移動と物性制御」配列ナノ空間」、第6回領域会議@名古屋大学、2010/5/28-30
13. 守友 浩、「筑波大-KEK 連携事業の概要」、筑波大-KEK 連携事業キックオフシンポジウム@筑波大、2010/5/26
14. (invite)Y. Moritomo, "All solid electrochromic device made by Prussian blue analogues", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
15. 大村彩子、栗原佑太朗、松田智行、宇留賀朋哉、守友 浩「斜出射深さ分解 XAFS による Co-Fe シアノ錯体薄膜の酸化プロセス」日本化学会第4回関東支部大会、2010/8/30-31@筑波
16. 柴田恭幸、守友 浩「シアノ錯体薄膜による固体エレクトロクロミック素子」日本化学会第4回関東支部大会、2010/8/30-31@筑波
17. 栗原佑太朗、守友 浩「プルシアンブルー薄膜のエピタキシャル成長と機能性」日本化学会第4回関東支部大会、2010/8/30-31@筑波
18. 伊藤港、上岡隼人、守友浩「Co-Fe シアノ錯体薄膜の光誘起相転移ダイナミクス」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪
19. 瀧側良太、阿部雄太、松田智行、上岡隼人、守友浩「シアノ架橋金属錯体の高圧ラマン分光」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪
20. 松田智行、金廷恩、守友浩「プルシアンブルー格子のゲスト-ホスト相互作用」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪
21. 栗原佑太朗、守友浩「シアノ錯体薄膜のエピタキシャル成長と機能性」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪
22. 大村彩子、栗原佑太朗、松田智行、宇留賀朋哉、守友浩「Co-Fe シアノ錯体薄膜の深さ分解 XAFS 分光」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪
23. 柴田恭幸、守友浩「合型シアノ錯体素子の温度依存性」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010/9/23-26@大阪

24. 小林航, 小泉雄飛, 守友浩「Bi 単結晶の熱ホール効果」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
25. 伊藤港, 上岡隼人, 守友浩「シアノ錯体薄膜における光誘起相転移の時空間ダイナミクス果」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
26. 上岡隼人, 柴田恭幸, 栗原佑太朗, 守友浩, 野澤俊介, 佐藤篤志, 足立伸一「シアノ錯体の過渡的電子相の時間分解 XAFS 分光」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
27. 守友浩, 松田智之, 栗原佑太朗, 金延恩「シアノ錯体における立方晶-菱面晶構造相転移の起源」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
28. 松田智行, 金延恩^A, 守友浩「プルシアンブルー類似体における特異なイオン配列」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
29. 柴田恭幸, 上岡隼人, 守友浩「固体-固体界面におけるイオン伝導と電子伝導の同時測定」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
30. 栗原佑太朗, 守友浩「エピタキシャル成長させた遷移金属シアノ錯体積層膜の整流特性」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
31. I. Terasaki, W. Kobayashi, H. Takahashi, and Y. Yasui "Routes to thermoelectrics by strongly correlated electrons", The Fall 2010 MRS Meeting, Boston, 29 Nov. -3 Dec. 2010.
32. I. Terasaki and W. Kobayashi, "Oxide thermal rectifier and oxide thermoelectric device", Workshop on "NEW TRENDS IN NONLINEAR DYNAMICS: HEAT CONTROL AND THERMO-ELECTRIC EFFICIENCY" (HEAT2010), Erice, 23-28 October 2010.
33. W. Kobayashi, D. Sawaki, Y. Moritomo, and I. Terasaki, "Thermal rectification in transition metal oxides junction device", The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Epochal Tsukuba, Japan, March 9-10, 2011
34. 松下正樹, 小林航, 寺崎一郎, 中尾明子, 中尾裕則, 村上洋一、「SrNbO_{3.4}の構造と物性相関」物構研シンポジウム'10-量子ビーム科学の展望@つくば国際会議場、2010/12/7-8
35. 寺崎一郎, 小林航、「熱のダイオード」京都大学基礎物理研究所研究会@京都大学、2010/11/18-20
36. 澤木大輔, 小林航, 寺崎一郎、「コバルト酸化物熱整流素子における形状依存効果」日本物理学会 2010 年秋季大会@大阪府大、2010/9/23-26
37. 松下正樹, 田村亘, 小林航, 寺崎一郎, 中尾明子, 中尾裕則, 村上洋一、「Sr_{3-x}Ca_xRCO₄O_{10.5} (R=Y, Ho)の磁性と構造相関」日本物理学会 2010 年秋季大会@大阪府大、2010/9/23-26
38. 小林航, 小泉雄飛, 守友浩, 「Bi 単結晶の熱ホール効果」日本物理学会第66回年次大会、2011/3/25-28(中止)新潟
39. 小林航, 松下正樹, 寺崎一郎, 中尾明子, 中尾裕則, 村上洋一、「擬 1 次元伝導体 SrNbO_{3.4} における熱電特性と物性相関」第 28 回 PF シンポジウム@つくば国際会議場、2011/3/14-15

ポスター発表(主要なもの)

1. Y. Kurihara, H. Funahashi, M. Ishida, N. Hamada, Y. Moritomo, "Electronic structure of electrochromic transition metal cyanides", IEM-9@Boedeaux, 2010/9/6-9

2. T. Shibata, Y. Moritomo, "Quick response of all solid electrochromic device with Prussian blue analogues", IEM-9@Boedeaux, 2010/9/6-9
3. T. Shibata, Y. Moritomo, "Improvement of device properties of Prussian blue junction", ICSM2010@Kyoto, 2010/9/4-9
4. Y. Kurihara, Y. Moritomo, "Valence differential spectroscopy of cyanide film", ICSM2010@Kyoto, 2010/9/4-9
5. H. Kamioka, "Photo-induced phase transition processes in Co-Fe cyanide films", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
6. T. Matsuda, "Structural Phase Transition by Cation Exchange in Cobalt(II) Hexacyanoferrate(II)", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
7. A. Oomura, "Oxidation reduction process of $\text{Na}_x(\text{Ni}^{\text{II}}_{0.8}\text{Fe}^{\text{III}}_{0.2})[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.67}$ as investigated by valence-differential spectroscopy", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
8. T. Shibata, "Interrelation between Prussian Blue Device Property and Film Morphology", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
9. Y. Kurihara, "Electronic Structure of Hole-doped Transition Metal Cyanide films", The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop@Hsinchu, 2010/4/2-3
10. T. Shibata, Y. Moritomo, "Simultaneous measurement of ion and electron conductions in all solid device", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
11. Y. Kurihara, H. Funahashi, M. Ishida, N. Hamada, Y. Moritomo, "Valence-differential spectroscopy of cyanide film", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
12. K. Wakaume, Y. Kurihara, J. E. Kim, Y. Moritomo, "Magnetic properties of $\text{Na}_x\text{Cr}[\text{Cr}(\text{CN})_6]_y\text{zH}_2\text{O}$ ($0.67 < y < 0.77$)", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
13. M. Ito, H. Kamioka, Y. Moritomo, "Spatial-Temporal dynamics of photo-induced phase transition in cyanide film", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
14. M. Ito, T. Shibata, Y. Moritomo, "3D-1D Crossover of growth method in transition metal cyanide film", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
15. T. Matsuda, J. E. Kim, Y. Moritomo, "Rubidium ion chain formed by distorted Prussian blue framework", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba
16. H. Kamioka, T. Shibata, Y. Moritomo, S. Nozawa, T. Sato, S. Adachi, "Tome-resolved XFAS spectroscopy for the electronic phases in cyano complexes", ISIMS-2011, 2011/3/9-11@Tsukuba

<受賞>

1. 大村彩子: つくばダイヤモンド研究奨励費「放射光 X 線を用いたシアノ錯体薄膜の電子構造の研究」
2. 栗原佑太郎: ICSM2010 において Young Resercher Poster Award を受賞

<特許>

1. 特願 2010-180002、守友 浩、大塚洋一、柴田恭幸「シアノ架橋金属錯体作成方法およびエレクトロクロミック素子」筑波大学、2010/8/22
2. 特願 2010-076810、守友 浩、栗原佑太郎「シアノ架橋金属錯体超構造作成方法およびシアノ架橋金属錯体超構造作成装置」筑波大学、2010/3/30

<その他>

1. 新聞記事

ノ子 ア格 シ錯 高輝度光 科学研など

イオン出し入れ制御

メモリーなど応用へ

高輝度光科学研究セン
ターと筑波大学などは16
日、アルカリ金属イオン
の交換に用いるアルシアノ
錯体格子の可逆的な対称
性変化に成功したと発表

した。この対称性変化を
利用すると、試料の色や
非線形光学特性のスイッ
チが可能になる。シアノ
錯体化合物は銅、炭素、
鉄、といった豊富な元素
のみから構成された環境
負荷の小さな機能性材
料。軽くて、柔らかいと
いう特徴を有しており、
メモリー材料などへの応
用が期待されている。

シアノ錯体格子では、
一辺が1千万分の5ミリの
小さな隙間が規則正し
く配列している。この小
さな隙間にゲストである
アルカリ金属イオンを入
れたり出したりすること
ができる。

今回の発見は、ホスト
であるシアノ錯体格子と
ゲストであるアルカリ金
属イオンを組み合わせた
30種類以上の化合物を合
成し、大型放射光施設「S
Pring8」の高輝
度X線を用いて、精密構
造を系統的に調べて得ら
れた成果。これによっ
て、ホストとゲストの相
互作用を利用することに
より、新しい機能を発現
することができるとい
う。

への応用を探る。
鉄や銅、炭素などか
らなるシアノ錯体「を
使う。0.5ナノは10
億分の1」のすき間が
格子状に開いており、ナ
トリウムイオンの溶液に
浸すと、格子の間にナト
リウムイオンが入り、カ
出し入れし、特性を変え
ることができれば、次世
代のメモリーなどに応用
できる可能性があるとい
う。現状では詳しいメカ
ニズムが分かっていない
ため、さらに解析を進め
て応用分野を探る。

イオンで光学特性変化

筑波大などメモリーに応用も

筑波大学の守友浩教授「ナトリウムなどのイオン」る物質を見つけたと発表
と高輝度光科学研究セン「を加えると光学的な特性」した。詳細なメカニズム
ターは16日、カリウムや「などを可逆的に変えられ」を調べて、メモリーなど

H22.8.17
日経産業新聞
(先端技術・10面)

H22.8.17 化学工業日報
(ファイン・スペシャリティ/4面)

柔らかいポリマー使い

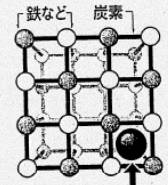
「曲がるリチウムイオン電池」も?

携帯電話やパソコンなどで利用されているリチウムイオン電池は、現在主流の金属の酸化物ではなく、炭素や鉄などを結合させた、ある種のポリマー(重合体)でも作製できる可能性が高いとの研究結果を、守友総務筑波大教授(物性物理学)らのチームが3日発表しました。

大型放射光施設「スプリング8」(兵庫県

筑波大教授らチーム発表

ポリマー型リチウムイオン電池材料の構造(イメージ)



佐用町)でポリマーの
詳細な構造を解析した
結果判明した。ポリマ
ーを使えば、リチウム
イオン電池を柔らかい
素材で作ることが、磁
石など電池以外の多彩
な機能を持たせること
もできるという。

リチウムイオン電池
は電極の中にリチウム
イオンを出し入れする
ことで電流を発生させ
る。ポリマーはチウ

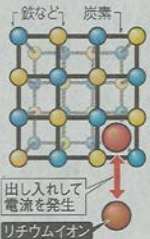
ムイオンを何度も出し
入れするうちに、格子
状の構造が壊れる懸念
があるとされてきた。

今回、チームが分析
したところ、ポリマー
内部ではリチウムイオ
ンが入っている時と出
た後とで鉄の状態が微
妙に変化するものの、
炭素との結合様式は維
持しながら強く結び付
くことが分かった。こ
れが丈夫な格子を形成
しており、守友教授は
「同程度でもイオンの出
し入れが可能だ」とし
ている。

高分子型リチウムイオン電池材料

島大准教授ら構造解明

ポリマー型リチウムイオン電池材料の構造(イメージ)



の広がりが見待たれる。
研究グループは高輝度
光科学研究センター(兵
庫県)、理化学研究所
(埼玉県)、筑波大(茨
城県)、島根大(松江市)
で構成。文部科学省の科
学研究費補助金を使い研
究を進めてきた。



田中宏志准教授

リチウムイオン電池は
電極の材料の中にリチウ
ムイオンを出し入れする
ことで電流を発生させ
る。パソコンや携帯電話
に使われ、電気自動車の
電源としても大容量化の
材料の構造を解明した。

現在主流の金属酸化物系
の材料にはない、薄さや
柔らかさを兼ね備えた新
しい電池材料として利用
採用されている。しかし、
材料(正電極)として最
も有望視される、鉄とコ
バルトの化合物「フルシ
ヤンブルー類似体」は、
劣化しにくい特性がある
とされながら、電池内の
電子の動きや詳細な構造
が分からず、開発が進ん
でいなかった。

これに対し、同グルー
プは兵庫県佐用町の大型
放射光施設「スプリング
8」にある高輝度X線装
置を使い、ポリマー型で
は、電子が鉄や炭素など
のネットワーク構造を補

島根大総合理工学部の
田中宏志准教授(48)「物
質科学」が企画する研
究グループが世界で初め
て「ポリマー型リチウム
イオン電池」に使われる
材料の構造を解明した。

「ポリマー型リチウム
イオン電池」に使われる
材料の構造を解明した。

現在主流の金属酸化物系
の材料にはない、薄さや
柔らかさを兼ね備えた新
しい電池材料として利用
採用されている。しかし、
材料(正電極)として最
も有望視される、鉄とコ
バルトの化合物「フルシ
ヤンブルー類似体」は、
劣化しにくい特性がある
とされながら、電池内の
電子の動きや詳細な構造
が分からず、開発が進ん
でいなかった。

これに対し、同グルー
プは兵庫県佐用町の大型
放射光施設「スプリング
8」にある高輝度X線装
置を使い、ポリマー型で
は、電子が鉄や炭素など
のネットワーク構造を補

強する役目を果たしてお
り、リチウムイオンを何
度も出し入れしても壊れに
くい構造となっているこ
とを突き止めた。

電子の分布を解析する
世界で唯一のプログラム
を持つ、X線装置で得ら
れた測定データの解析に
当たった田中准教授は
「構造の解析に成功した
ことで、これまで手探り
だった開発が飛躍的に進
む」としている。

イオン出し入れで物性制御 JASRI、筑波大など成功

新しいタイプの記録素子開発に指針

ナノポラス(多孔質)な化合物は、その小さな空間にゲストイオンやゲスト分子を取り込み、有用な機能性を発現する。例えば、シアノ錯体格子(遷移金属イオンと鉄イオンがシアノ基で架橋されている化合物)では、一辺1000万分の5程度の小さな隙間が規則正しく配列しており、その小さな隙間にゲストであるアルカリ金属イオンを入れたり出したりすることができ、高輝度光


科学研究センター(JASRI)および筑波大学の研究グループは、ゲストであるアルカリ金属イオン交換により、ホストであるシアノ錯体格子に可逆的な対称性変化を起させ、この対称性変化を利用して、イオンの種類や個数を記録するといった新しいタイプの記録素子の開発に道を開くものと期待される。

研究グループの一人、筑波大学数理解析物理学の守友

浩教授によると「これまでこの研究開発では、ホストは単なるゲストの入れ物と考えられてきましたが、我々はゲストの出し入れにより、ホストの性質を変えることができる」と考えました。そして、ホストであるシアノ錯体格子とゲストであるアルカリ金属イオンを組み合わせた30種類以上の化合物を合成し、その性質を系統的に調べた。

その結果、アルカリ金属イオン交換によるホストの可逆的な対称性変化を見だし、試料の色や光学特性のスイッチに成功した。合成した化合物はカリウム塩(K⁺ salt)とナトリウム塩(Na⁺ salt)の2種類あり、この化合物(試料)の色は、赤みがかったり、X線回折パターンは立方晶を示している。この試料を1モルのNaCl水溶液に浸したところ、試料の色は緑がかった。X線回折パターンも大きく変化し、リートベルト構造

カリウム塩



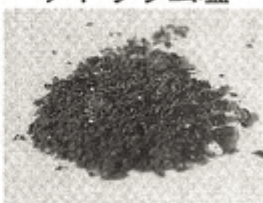
Na⁺

→

K⁺

←

ナトリウム塩



さらに試料をNaCl水溶液に浸すとX線回折パターンが立方晶に戻った。このようにアルカリ金属イオンを可逆的に起こすことが可能となった。

「この特性を利用して、イオンの種類や個数を記録するといった新しいタイプの記録素子への道が開けます。今後は、薄膜化・素子化を

解析により変面晶であることが分かったという。」

目指した開発を行っていき

H22.9.3
科学新聞
(1面)

ポリマー型電池材料 丈夫さの起源を解明

新しい電池材料開発に期待 JASRIなど

高麗産科学研究センターを用いて、世界で初めて「**ポリマー型リチウムイオン電池**」(JASRI)を開発した。研究員、張成金、副研究員、趙大。このポリマー型リチウムイオン電池は、大分放電速度が速く、ネットワーク機器、リチウム電池の材料は、リチウムイオン電池の出し入れによる劣化の少ないネットワーク

H23.2.18
科学新聞
(科学技術総合・4面)

ここで、その構造的特徴に迫るため、S.P. Parkらで報告された同試料の室温状態でのX線解析結果を詳しく解析、この材料の充電状態と放電状態にそれぞれに対応する電子密度分布を明らかにした。

具体的には、ポリマー型リチウムイオン電池の材料が、充電と放電に依存する状態、結合に依存する電子がネットワークを構成する鉄イオンやコバルトイオンと酸素などの原子が交差し、ポリマー中に電子が広がっていることを突き止めた。

この広がった電子は、木造建築に見られる、筋交い(すじかい)の役割を担い、ネットワーク構造をリチウムイオンの出入りに対して堅固なものにすることができると見られる。鉄イオンを他の金属イオンにおきかえることで、ポリマー型リチウムイオン電池の蓄電容量や耐久性向上の可能性がでてきた。

筑波大学の守友浩教授は「この構造が丈夫な材料の起源が丈夫なのか、鉄イオンが重要な役割を担っているのか、という点について、明らかにしたい」と話している。この発見は、この発見が蓄電容量を担う鉄イオンが重要な役割を担っていることを明らかにした。この発見は、この発見が蓄電容量を担う鉄イオンが重要な役割を担っていることを明らかにした。

日刊工業新聞 Business Line | 電子版 | サイトマップ

ニュース | 企業発表 | 特集 | 企業・製品 | 会社人 | robo nable | 有料サービス | イベント

トップ | 機械 | IT | エレクトロニクス | 自動車 | 環境 | 中堅・中小 | 新技術・新製品 | 素材・エネルギー | 金融・商況 | 人物 | 地域 | 企画・解説 | フォト

HOME | ニュース | 新技術・新製品

新技術・新製品

筑波大、色が変わる薄膜型電極開発

掲載日 2011年04月06日

【水戸】筑波大学大学院数理物質科学研究科の守友浩教授らは、リチウムイオン電池向けに色の变化で電池の残量が分かる薄膜型電極の開発に世界で初めて成功した。炭素などの導電助剤やバインダーを正極材に混ぜ合わせないことで、活物質自体の色を可視化し、充電残量がなくなると無色になる。

ICカードや電動歯ブラシなど、透けて見えるスケルトン素材で覆った製品での使用を想定。ベンチャー企業などの協力を探し、実用化を目指す。6日発行の応用物理学会の英文論文誌APEXで公開される。

リチウムイオン電池の正極材料で主流の酸化物系材料とは異なり、ネットワークポリマー系材料を使った。鉄やマンガンなどの遷移金属が炭素と窒素と結ばれた構造をしており、「これまで電気抵抗が高いと思われ、ほとんど研究されていなかった」(守友浩教授)。

IX-5. 低温物性グループ

| | |
|------|---|
| 教授 | 大塚洋一 |
| 准教授 | 神田晶申 |
| 助教 | 森下將史、斎藤政通 |
| 研究員 | 後藤秀徳 |
| 大学院生 | 浦野敬太、海老名宏、黒田隆、庄司裕、友利ひかり（数理物質科学研究科2年）、 豊田行紀、樋川和哉（同1年） |
| 卒業研究 | 幸坂健史、佐藤拓海、貫井洋佑、松下慎平、山口和也（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、単分子架橋系やグラフェンなどのナノあるいはメゾスコピックな導体系の電気伝導、微小超伝導体の渦糸、微小ジョセフソン接合を利用した微小磁性計測および吸着³He薄膜の核磁性の研究を行っている。

学際物質科学研究センター(TIMS)量子制御コアの担当であり、大阪大学および東京理科大学と行ってきた連携学生研究会（長万部）にM1学生2名が参加した。また大塚は筑波大学戦略イニシアティブ(A)「学際物質科学研究拠点」の代表として、第3回学際物質科学国際シンポジウム(ISIMS-2011) (2011.3.9-10、エポカルつくば)や第3回筑波-新竹ワークショップ(TSAMS2010、4月2~3日、台湾国立清華大学)の開催などにあたった。

【1】単分子伝導の研究：C₆₀分子架橋の電気伝導（浦野、幸坂、大塚）

希釈冷凍温度に組み込んだ機械破断接合(MBJ)用ステージを使ってフラーレンC₆₀の単分子超伝導架橋の電気伝導の研究をすすめた。電極金属としてアルミニウムAlとスズSnを用い、約0.2Vまでの広いバイアス電圧領域で計測を行った。超伝導スペクトロスコーピーと非弾性ポイントコンタクトスペクトロスコーピーの同時計測によって分子架橋状態と電子伝導性の相関を知るのが目的である。超伝導ギャップエネルギー程度の低バイアス領域の電流・電圧特性は多重アンドレーエフ反射過程で理解でき、その解析によって有効伝導チャンネル数とその透過率を決定した。高バイアスでは分子振動・フォノン励起による非線形性の他、電子波干渉によるコンダクタンス揺らぎや2状態間の確率的な遷移、テレグラフ雑音などが見られる。Al-C₆₀MBJとAl-MBJの結果を比較することでC₆₀分子に関する伝導特性を検討した。また、Sn-MBJ及びAl-C₆₀MBJにおいて系のコンダクタンスと強い相関を持つ明瞭な構造が見つかった。原因を考察中である。

【2】グラフェンの電気伝導（友利、田中、豊田、貫井、後藤、神田）

(1) バリスティック伝導を目指したグラフェンジョセフソン接合の作製と電気伝導測定（友利、神田）

新規2次元物質グラフェンからなる超伝導ジョセフソン接合(SGS接合)において予測されている相対論的ジョセフソン効果を実験的に検証するために、必要条件であるバリスティック(無散乱)伝導を示す接合の作製手法の開発と電気伝導測定を行った。

作製手法開発では、平均自由行程(100nm程度)より短い電極間隔をもった“極めて短いSGS接合”と、Si基板中の荷電不純物の影響を減少させるために接合部分を基板から浮かせた“架橋SGS接合”の作製手法を新たに開発した。

電気伝導測定では、極めて短いSGS接合において、超伝導電流の温度依存性がバリスティック接合の特徴を持つこと、そして、電極近傍のグラフェンのフェルミレベルピン止めの影響が伝導に大きな影響を与えていることを明らかにした。また、架橋SGS接合では、抵抗の温度依存性においてアンドレーエフ反射に起因する抵抗の減少を観測した。

(2) グラフェンにおけるスピン緩和機構の解明 (後藤、豊田、神田)

グラフェンでは、原子番号が小さいこと、超微細相互作用が無視できることから、スピン緩和が起こりにくいので、グラフェンはスピントロニクス応用に適していると考えられている。しかし、これまでの実験では、スピン緩和時間は極端に短い値 (理論予測の 10 分の 1 以下) しか報告されていない。この理論と実験の食い違いの原因究明とスピン伝導特性の改善が、グラフェンのスピントロニクス応用のために急務である。我々は、電極配置の影響 (外的要因) とグラフェン内のスピン散乱 (内的要因) の両方に着目して実験を進めている。まず、電流ドレイン位置の異なる 2 種類の非局所スピンバルブ測定を行い、両方でスピン信号だけでなく、データから求まるスピン緩和長も数倍異なることを見出した。これは、グラフェンの抵抗率が強磁性金属よりも大きいことに起因するもので、従来の測定では、スピン緩和長を過小評価していると考えられる。さらに、内的要因についての実験を行うために、(1) で開発された方法を応用して架橋型スピンバルブ素子を作製している。

(3) グラフェンにおける電流アニール効果 (田中、神田)

グラフェンデバイスの移動度 (平均自由行程) を向上させる手法として、電流アニールが良く用いられる。電流アニールとは、真空中でグラフェンに大電流を印加し、発生したジュール熱によってグラフェンを清浄化する方法である。架橋グラフェンに対しては、ほぼ 100% の確率で移動度は向上するが、グラフェンが SiO_2/Si 基板上にある場合には、移動度が増加する場合もあれば、減少する場合もある事が判明した。AFM では、前者ではアニール後にグラフェン表面が平坦であるのに対し、後者では、アニール後に表面に汚れの塊が多数付着している。アニール条件を精査したところ、アニール時に印加する電力密度が $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 以上の時に移動度が劣化することが分かった。

(4) 非接触トップゲートによる多層グラフェンの移動度分布の解明 (貫井、後藤、神田)

半導体にゲート電圧を印加して電気伝導を変調するのはよく知られている方法である。グラフェンに対してこれを行う際、ゲート絶縁膜がグラフェンに接触しているとグラフェンの電気特性が劣化する恐れがある。そこで本実験では、ゲート金属を浮かせた非接触トップゲートの作製手法を開発し、実際に多層グラフェンの伝導特性を調べた。

作製した試料に対して室温でトップゲート電圧かバックゲート電圧のどちらかを印加してコンダクタンスを測定した。適切なモデルを仮定し、コンダクタンスのゲート依存性から、多層グラフェンの上層部分と下層部分の移動度を求めた。その結果、上層部分の移動度は下層部分に比べて、二倍近く移動度が高いことがわかった。これは、下層部分が SiO_2 基板の影響を強く受けていることに起因していると考えられる。

(5) グラフェンへの歪み導入によるゲージ場生成 (友利、神田)

グラフェンでは、特殊な結晶構造に由来して、歪みによってゲージ場が生成することが理論的に予測されている。周期的な歪みを導入すると、擬似磁場によるランダウ準位によってバンドギャップを生成できる可能性がある。我々は、微細加工プロセスを改良することで、グラフェン中に歪みを導入する方法を開発した。また、歪みのあるグラフェンに対し、顕微ラマン分光を行い、歪み量に対応したラマン信号の変調を観測した。

【 3 】メゾスコピック超伝導体における新奇渦糸状態の探索 (黒田、佐藤、神田)

サイズが超伝導コヒーレンス長や磁場侵入深さと同程度のメゾスコピック超伝導体では、バルクの時には見られない新しい渦糸状態が出現する。我々は独自の渦糸状態検出方法 (Multiple-small-tunnel-junction法) を用いて新奇渦糸状態について研究を行ってきた。これまでに、巨大渦糸状態、1次元渦糸状態の初観測に成功するとともに、巨大渦糸/多重渦糸状態の相図の決定、渦糸状態の電流注入によ

る制御等の成果を挙げてきた。2010年度は、これまで理論で予測されていたながら、実験的には観測されたことの無い“渦糸-反渦糸対”の検出を目指した研究を行った。

試料は、1辺が1ミクロン程度の正方形の超伝導薄膜で、NIMSの高野義彦、山口尚秀両氏の協力による集束イオンビーム加工によって作製した、2×2の微細孔を有している。また、試料の対称性を制御するための局所電流注入用の電極が取り付けられている。試料の構造、サイズは、アントワープ大学（ベルギー）のM. V. Milošević, F. M. Peeters両教授によるGinzburg-Landau計算によって最適化されたものを用いた。測定では、ゼロ磁場冷却時、磁場中冷却時の渦糸状態の相図を、電流注入時、非注入時について精密測定し、比較した。その結果、渦糸-反渦糸対の生成を示唆する実験結果は全く得られなかった。これは、理論予測と相反するものである。試料構造に設計と異なる部分があったことが分かっているので、今後、さらなる検証が必要である。

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

分子磁性体は高スピン基底の多核錯体であり、分子間の磁氣的相互作用が弱い分子 1 つを孤立したスピンとして近似することができる。そのため、スピン状態を巨視的な磁化として観測することが可能となり、巨視的量子トンネル現象を調べる上で重要な研究対象である。我々が開発したトンネル接合型マイクロ SQUID は臨界電流が 10 pA 程度と非常に小さいため、測定に伴う発熱が従来型のマイクロ SQUID の 10^{-7} 倍以下と極めて小さい。したがって、極低温での微小試料の精密磁気測定にきわめて有効な素子であり、量子トンネル現象を調べる上でも理想的な磁気プローブである。

昨年に引き続き、トンネル接合型マイクロ SQUID の開発と分子磁性体である Fe₈ クラスターの磁化測定を行った。本年度は、膜厚 200 Å のより薄い Al 薄膜で SQUID 素子を作製することで磁場耐性をさらに向上させることに成功し 1.3 T の高磁場まで磁化測定を行うことができた。これによって飽和磁化を確認することができ、スピン状態占有数の変化からトンネル確率の情報を得ることができた。さらにトンネル確率から Landau-Zener-Stückelberg モデルに基づいたトンネル分裂の大きさを評価した結果、トンネル分裂の磁場掃引速度依存性は、発熱の極めて小さい条件下でも従来型マイクロ SQUID で測定された先行研究の結果とよく一致することが分かった。このことから、磁化曲線の磁場掃引速度依存性として現れるトンネル確率の変化は、試料依存や、磁場掃引による温度変化などの影響ではなく、Fe₈ クラスター分子磁性体のより本質的特性として、結晶内の局所磁場に起因する現象であることを支持する結果となった。なお、本研究では数理物質科学研究科物質創成先端化学専攻大塩寛紀教授の協力をいただいた。

【 5 】 スピンホール効果の磁氣的観測（斎藤、松下、大塚）

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

エッジスピン磁化を捕捉するための試料は、Pt 薄膜のエッジ上に長さ 100 μm、幅 1 μm の非常に細長いループを持ったトンネル接合型マイクロ SQUID を配置した構造となっている。まずこの試料作製に着手し、所定の精度で Pt 薄膜のエッジ部分に SQUID ループを配置させることができた。また、数値計算による見積りの結果、作製した試料においてエッジから 100 nm の範囲にスピンの蓄積した場合、 10^{-4} 以上の偏極率でスピンの蓄積すると検出可能であることが分かった。本研究は山口尚秀氏（物材機構）の協力をいただいた。

【 6 】 鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x のトンネル分光 (樋川、大塚)

2008 年に行われた鉄系超伝導体 LaFeAsO_xF_y の報告は新たな高温超伝導物質群の発見として注目を集め、集中的な研究が行われている。この物質では Fe-Pn からなる正方格子層に広がる Fe3d バンドが伝導を担うとともに、そのフェルミ面は複数の電子及び正孔ポケットからなると考えられている。理論によれば、超伝導発現機構はスピン揺らぎを媒介とした相互作用であり、特異なバンド構造のため、超伝導状態は複数のオーダーパラメータを持ち、かつ電子ポケットと正孔ポケットのオーダーパラメータの符号は互いに異なるとされる。しかし、実験的な検証は未だ十分ではない。このことを調べるために小野田研究室の協力を得て FeSe_{1-x}Te_x のトンネル分光実験を開始した。

FeSe_{1-x}Te_x は鉄系超伝導体の中で最も単純な構造を有する。実験は液体ヘリウム温度域でメカニカルブレークジャンクション(MBJ)用クライオスタットを用いて鉄系超伝導結晶のポイントコンタクトおよびトンネル接合を実現しその I-V 特性、コンダクタンス G を詳細に調べる。これまでに数回の実験を行ったが試料の破断が期待した通りにはいかず結果を得るには至っていない。現在継続して実験中である。

【 7 】 イオン液体 Si-FET (庄司、山口、大塚)

Si を基板としたイオン液体 FET を作製しその伝導特性を調べた。高濃度のキャリアドーピングや微細形状化、イオン液体と界面電子の相互作用などが興味の対象である。p 型 Si ウエハを基板としてリンの熱拡散によりソース・ドレイン用の n+ 型領域を形成、電極を蒸着した後、チャンネル部分の SiO₂ を除去しイオン液体とゲート用金電極を取り付けることでホールバー型 FET を作製した。[bmim][pf6] と [PPI3][TFSI] の 2 種類のイオン液体について電気抵抗及びホール効果測定を行った。得られたキャリア密度は最大 $2.1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 、移動度は最大約 $1000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ (いずれも室温) である。ゲート静電容量は $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 程度であり、Au/イオン液体界面での値の約 10% となった。静電容量の減少の原因として Si 自然酸化膜、Si 反転層部分の静電容量の影響が考えられる。温度の低下と共に移動度は増加し抵抗は減少するが、約 70K 以下で逆に増大に転じた。また抵抗の不連続な変化やヒステリシスもみられる。これらは基板との熱収縮の違いによって生じる固化したイオン液体の局所的な破壊が原因ではないかと考えられ、低温でのイオン液体の利用ではその対策が必要である。なお、本研究では学際物質科学研究センター・ハイブリッド機能コア 山部教授(電子・物理工学専攻)、同・機能性高分子コア 神原教授(物性分子工学専攻)の協力をいただいた。

【 8 】 ヘリウム 3 単原子層膜における強フラストレーション量子スピン系の研究 (森下)

グラファイトは原子レベルで平坦な表面をもち、この上にヘリウム原子は 1 層ずつ規則正しく物理吸着し、薄膜となる。ヘリウム 3 (³He) 薄膜、ヘリウム 4 (⁴He) 薄膜は、それぞれ理想的な 2 次元ボーズ粒子系、2 次元フェルミ粒子系を与える。³He は核スピン 1/2 をもち、³He 薄膜は 2 次元量子スピン系のモデル物質と考えられている。2 次元量子スピン系の大きな興味は、相互作用が等方的である場合絶対零度まで長距離秩序を持たないこと、反強磁性相互作用をもつ場合、全ての隣り合うスピンを反平行に配置することのできない、いわゆる幾何学的フラストレーションを生じ、その基底状態が理論的にも未解決である点であり、スピン液体状態などの新奇な状態の存在が期待されていることである。³He スピン間の磁気相互作用は、多体交換モデルで説明されるが、ここでは強磁性相互作用と反強磁性相互作用が共存し、この競合が新たなフラストレーションを生んでいる。本研究では、熱容量・熱伝導測定を中心にこの系の調査を行っている。実験は全て、研究基盤総合センター低温部門の共同利用設備を用いて行われている。

(1) カゴメ格子 ³He 固相薄膜の生成

幾何学的フラストレーションの強いスピン系の典型的な構造として、三角格子、カゴメ格子などが挙

げられる。カゴメ格子は、揺らぎのために絶対零度においてすら長距離秩序が存在せず、古典系でも基底状態が多数縮退している点が特徴となっている。様々な三角格子上、カゴメ格子上のスピノン物質が合成され研究がなされているが、格子の違いによる差異について詳細はあきらかになっていない。

グラファイト上 ^3He 薄膜は三角格子を基調とするが、吸着第2原子層に生ずる $4/7$ 相と呼ばれる整合固相において、 $1/4$ の ^3He を非磁性な ^4He に置換すると、残る ^3He はカゴメ格子を組むことが期待される。実際に、このような系の熱容量は温度に対しダブルピーク構造を示し、低温ピークはスピノン系の短距離秩序に、高温ピークは ^3He と ^4He が熱励起として吸着サイトを交換していることに由来するものとして非常によく説明できる。即ち、充分な低温ではカゴメ格子が実現されていることが強く示唆されている。カゴメ格子が実現されていることにより確実な証拠を得ることを目的として、同じ $4/7$ 相において ^4He での置換量を $1/4$ から $1/2$ 、 $3/4$ と変化させての熱容量測定を行った。結果を図1に示す。熱励起としての吸着サイトの交換に由来する熱容量ピークが観測されることを期待しての観測であったが、この議論では説明できない結果となった。これは、 ^4He 置換量を増すに従い、固液共存状態になり、 ^3He の一部が2次元フェルミ流体として振る舞い、温度に比例する熱容量を示しているためと考えられる。同図に $4/7$ 相の $3/4$ の面密度をもつ流体相の熱容量も併せて示した。 $3/4$ を ^4He に置換した場合の熱容量は、高温域で全く同様の振る舞いをしている。流体相の熱容量の全容が不明であり、カゴメ格子実現の可否について、現状では結論できない。

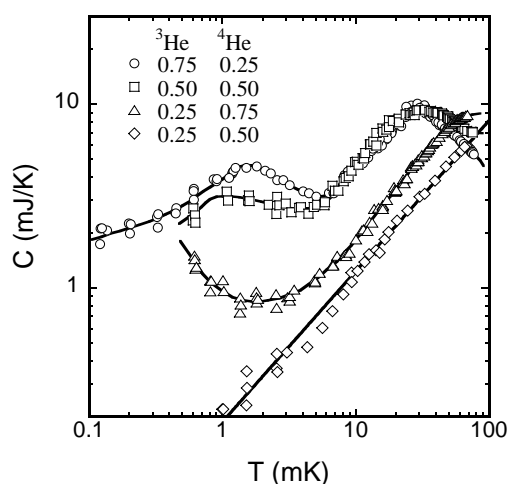


図1. グラファイト ^3He - ^4He 薄膜の熱容量。図中の数字は、吸着第2原子層における $4/7$ 相に対する ^3He , ^4He それぞれの面密度の比率を示す。実線はガイドライン。上から3つは、合計として $4/7$ 相に相当する面密度を有し、◇は流体相である。○はカゴメ格子が期待される組成だが、 ^4He 置換量を増すに従い、温度に比例する流体相からの寄与が増大している。

(2) ^3He - ^4He 薄膜の固化

(1) において、 $4/7$ 相で ^4He 置換量を増すに従い流体相が出現したことは、純粋な ^4He は $4/7$ 相には固化しないことを示唆する。様々な観測結果から、 ^3He 薄膜吸着第2層は $4/7$ 相に固化することはほぼ確からしい。一方、過去の熱容量測定の結果などから、 ^4He も ^3He 同様に $4/7$ 相に固化するものと長年信じられてきた。しかし、最近、数値計算の結果に基づき、 ^4He は $4/7$ 相に固化しないことが理論的に指摘された。今回の観測結果、この理論予測を支持するものである。ヘリウムの面密度の増大に伴う固化は Mott 転移で説明される。即ち、ヘリウム原子間に働くハードコア斥力のために、面密度の増大とともに自由度を失い、吸着ポテンシャルの起伏の助けを借りて固化するものと考えられる。 ^4He は ^3He に比べ零点振動が小さく、より高密度まで固化しないことはナイーブに期待され、 $4/7$ 相に固化しないことは驚きに値しない。しかし、固化の臨界点への漸近の仕方が ^3He とは全く異なる。図2は、熱容量のフェルミ流体の振る舞いから求めた ^3He の有効質量の面密度依存性である。Mott-Hubbard 転移の議論に従えば、有効質量の発散は臨界点への漸近を意味する。 ^3He を加えながらの測定と ^4He を加えながらの測定で、臨界点異なることは固化を生ずる面密度異なることを意味するが、 ^3He を加えながらの方が有効質量の増大が急峻で有り、臨界点への漸近の仕方が ^4He とは全く異なる。これは同図に併せて示した、 ^4He を1層吸着した上の ^3He の $4/7$ 相と、HD を2相吸着した上の ^3He の $4/7$ 相との違いに酷似する。

漸近の仕方の違いの原因はまだ不明であり、今後さらなる究明を必要とする。

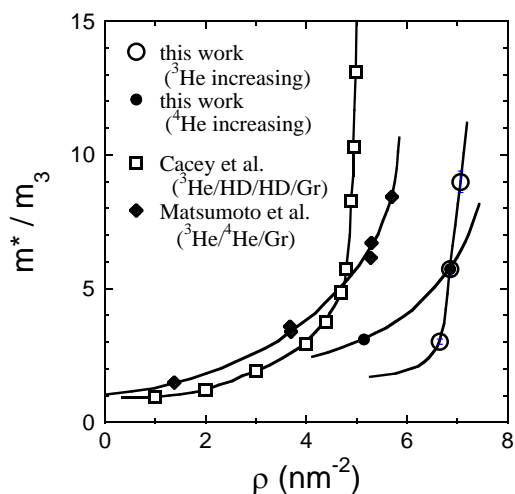


図2. グラファイト ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 薄膜における ${}^3\text{He}$ 有効質量の面密度変化。実線はガイドライン。 ${}^3\text{He}$ を加えた場合と ${}^4\text{He}$ を加えた場合とで発散の様子が異なる。この違いは、純粋な ${}^3\text{He}$ において、下地が2原子層のHDの場合と、 ${}^4\text{He}$ の場合との違いに酷似する。

<学位論文>

- 浦野敬太：超伝導電極を用いたC60分子架橋系の電気伝導（修士論文、2011年3月）
 海老名宏：トンネル接合型マイクロSQUIDによる分子磁性体磁化過程の研究（修士論文、2011年3月）
 黒田 隆：メゾスコピック超伝導体における欠陥による渦糸状態の制御と渦糸-反渦糸状態の探索（修士論文、2011年3月）
 庄司 裕：イオン液体-FETを利用したSi-2次元電子系の研究（修士論文、2011年3月）
 田中 翔：グラフェンにおける移動度低下の要因とその除去（修士論文、2011年3月）
 友利ひかり：バリスティック伝導を目指したグラフェンジョセフソン接合の作製と電気伝導測定（修士論文、2011年3月）
 幸坂健史：Sn-C60-Sn超伝導架橋系の電気伝導（卒業論文、2011年3月）
 佐藤拓海：微小超伝導リングにおけるフラクソイド量子化（卒業論文、2011年3月）
 貫井洋佑：非接触トップゲートを用いたグラフェンの電気的性質の測定（卒業論文、2011年3月）
 松下慎平：マイクロSQUIDによるスピンホール効果の磁氣的検出（卒業論文、2011年3月）
 山口和也：低温でのイオン液体-FETの電気伝導測定（卒業論文、2011年3月）

<受賞>

- 友利ひかり：数理物質科学研究科長賞（2011年3月）
 Hikari Tomori：Best Poster Award, The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011)（2011年3月, Tsukuba）

<論文>

1. Y. Kubo, T. Yamaguchi, S. Ueda, Y. Takano and Y. Ootuka, Macroscopic Quantum Tunneling in a Bi₂ Sr₂ CaCu₂ O_{8+δ} Single Crystalline Whisker, Appl. Phys. Express 3 (2010) 063104.
2. H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, A. Kanda, M. Otani, S. Okada, "Influence of Disorder on Conductance in Bilayer Graphene under Perpendicular Electric Field", Nano Lett. 10, 3888-3892 (2010).
3. N. Kokubo, S. Okayasu, A. Kanda, and B. Shinozaki, "Scanning SQUID microscope study of vortex polygons and shells in weak-pinning disks of an amorphous superconducting film", Phys. Rev. B 82, 014501 (2010).
4. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda, "Theoretical study of superconducting proximity effect in single and multi-layered graphene", Physica C 470, S846-847 (2010).
5. S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, A. Kanda, "Giant vortex and multivortex states under local supercurrent injection in a mesoscopic superconducting square", Journal of Physics, Conference Series, 232, 012003 (2010).

6. S. Tanaka, H. Goto, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi and A. Kanda, “Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene”, *Journal of Physics, Conference Series*, 232, 012015 (2010).
7. H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, “Inverse spin valve effect in multilayer graphene device”, *Journal of Physics, Conference Series*, 232, 012002 (2010).
8. S.L. Li, H. Miyazaki, A. Kumatani, A. Kanda, and K. Tsukagoshi, “Low Operating Bias and Matched Input-Output Characteristics in Graphene Logic Inverters”, *Nano Lett.*, 10 (7), 2357-2362 (2010).
9. H. Tomori, A. Kanda, H. Goto, S. Takana, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, “Fabrication of ultrashort graphene Josephson junctions”, *Physica C* 470, 1492-1495 (2010).
10. A.Kanda, T. Sato, H. Goto, H. Tomori, S. Takana, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, “Dependence of proximity-induced supercurrent on junction length in multilayer-graphene Josephson junctions”, *Physica C* 470, 1477-1480 (2010).
11. S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, A. Kanda, “Experimental distinction between giant vortex and multivortex states in mesoscopic superconducting squares”, *Physica C* 470, 1141-1144 (2010).
12. Y. Kuroda, S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda, “Effect of surface defects on vortex penetration in small superconducting squares”, *Physica C* 470, 1145-1147 (2010).
13. S. Odaka, H. Miyazaki, S.-L Li, A. Kanda, K. Morita, S. Tanaka, Y. Miyata, H. Kataura, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Anisotropic transport in epitaxial graphene on SiC substrate with periodic nanofacets”, *Applied Physics Letters* 96 (6), 062111/1-3 (2010).
14. H. Miyazaki, S. Li, A. Kanda, and K. Tsukagoshi, “Resistance modulation of graphite/graphene film controlled by gate electric field”, *Semiconductor Science and Technology* 25 (3), 034008/1-8 (2010).
15. H. Goto, H. Tomori, Y. Toyota, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, and A. Kanda, “Extrinsic spin relaxation in graphene lateral spin valve devices”, submitted.
16. S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, K. Nagai: “Surface Majorana Cone of the Superfluid 3He B Phase”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 80, 013602-(1-4), (2011)
R. Nomura, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, K. Akiyama, M. Saitoh, Y. Aoki, Y. Okuda: “Surface Andreev Bound States of the Superfluid 3He B Phase”, *Physica E* 43, 718-721, (2011).
17. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, S. Kashiwaya, Y. Ootuka, S. Nomura, Optical mapping of the boundary of a two-dimensional electron gas by a nearfield optical microscopy, *Physics Procedia* Volume 3, Issue 2, 31 January 2010, Pages 1171-1175
18. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, Mapping of Quantum-Hall Edge Channels by a Dilution-Refrigerator Based Near-Field Scanning Optical Microscope, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 19(2010)563-569.
19. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki, Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope, *Proc. of ICPS2010*
20. M. Morishita: Surface Observation and Magnetization Measurements of Grafoil Substrate, *J. Low Temp. Phys.*, 162, 638-644 (2011).

<解説>

1. 神田晶申, 「グラフェン物理の展開」, *パリティ*第26巻第1号 (2011年1月) 24-26.
2. 神田晶申, 「2010年のノーベル物理学賞」, *パリティ*第25巻第12号 (2010年12月) 30-31.
3. 神田晶申 (翻訳), 「グラフェンを超える (コスチャ・ノボセロフ著)」, *パリティ*第25巻第8号 (2010年8月) 4-9.
4. 神田晶申、田中翔、後藤秀徳、友利ひかり、塚越一仁, 「グラフェンの電気伝導の現状と可能性」,

<著書>

1. 神田晶申, 「電子輸送 (FET、移動度)」, カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック 12 章 12-2 節 (飯島澄男、遠藤守信監修、コロナ社)、印刷中
2. A. Kanda, Y. Ootuka, K. Kadowaki, F.M. Peeters, “Novel Superconducting States in Nanoscale Superconductors”, in “The Oxford Handbook of Nanoscience and Technology” (ed. A. Narlikar and Y.Y. Fu), volume I, (2010), 639-676.

<講演>

国際会議

1. Y. Ootuka, Opening Address, The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop on Nano- and Bio-related Materials and Technologies, 清華大学 (台湾), 2010. 4. 2-3
2. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka, Development of micro-SQUID and Observation of Quantum Tunneling of Magnetization of Single-Molecule Magnets, The 3rd Hsinchu - Tsukuba Joint Workshop on Nano-and Bio-related Materials and Technologies, 清華大学 (台湾) 2010. 4. 2-3
3. (Invited) A. Kanda, M.V. Milosevic, S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, F.M. Peeters, “Manipulation of quantum vortex states by local current injection”, International Conference on Superconductivity and Magnetism, Antalya (Turkey), 2010. 4. 25-30.
4. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki, Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope, NANOPHOTONICS2010 エポカルつくば 2010. 5. 30-6. 3.
5. H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, “Gate modulation of Spin Transport in Multilayer Graphene”, The 37th International Symposium on compound Semiconductors, Takamatsu, 2010. 5. 31-6. 4.
6. S. Tanaka, H. Goto, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, “Effect of Current Annealing on Transport Properties of Graphene”, The 37th International Symposium on compound Semiconductors, Takamatsu, 2010. 5. 31-6. 4.
7. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope, the International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS2010), Seoul, Korea, 2010. 7. 25-30.
8. H. Tomori, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, A. Kanda, K. Tsukagoshi, “Fabrication and transport properties of ultrashort graphene Josephson junctions”, Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, 2010. 8. 1-6.
9. H. Miyazaki, S. Odaka, S. Li, K. Tsukagoshi, A. Kanda, K. Murata, S. Tanaka, “Anisotropic transport in graphene grown on vicinal SiC substrate”, Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, 2010. 8. 1-6.
10. A. Kanda, H. Tomori, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, “Gate modulation of superconducting proximity effect in single and multilayer graphene”, Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, 2010. 8. 1-6.
11. M. Morishita: Surface Observation and Magnetization Measurements of Grafoil Substrate, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), Grenoble, 2010. 8. 5.
12. S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Surface Majorana cone of the superfluid ^3He B phase, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), Grenoble, France, 2010. 8. 1-7.
13. A. Kanda, H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, H. Yoshioka, M. Hayashi, “Superconducting proximity effect in single and multilayer graphene”, Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic phenomena (SM-2010), Paestum (Italy), 2010. 9. 5-11.

14. A. Kanda, Y. Kuroda, S. Hatsumi, Y. Ootuka, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, T. Yamaguchi, Y. Takano, "Vortex state transitions induced by local current injection into mesoscopic superconductors", 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), Tsukuba, 2010.11.1-3.
15. H. Tomori, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, "Fabrication and transport properties of ultrashort graphene Josephson junctions", 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), Tsukuba, 2010.11.1-3.
16. Y. Kuroda, A. Kanda, Y. Ootuka, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, T. Yamaguchi, Y. Takano, "Search for vortex-antivortex states in mesoscopic superconductors", 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), Tsukuba, 2010.11.1-3.
17. H. Goto, H. Tomori, Y. Toyota, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, "Spin transport in suspended graphene", Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST2011), Wako (Saitama), 2011.1.5-6.
18. H. Tomori, H. Goto, Y. Toyota, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda, "Ballistic Graphene Josephson Junctions", Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST2011), Wako (Saitama), 2011.1.5-6.
19. Y. Ootuka, K. Urano, K. Kosaka and M. Saito, Electrical transport through a C60 molecular bridge between superconducting aluminum electrodes, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), NTT 物性科学基礎研究所(厚木), 2011.1.11-14.
20. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka, Development of Tunnel Junction Micro-SQUID for Investigation of Single-Molecule Magnets, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), NTT 物性科学基礎研究所(厚木), 2011.1.11-14.
21. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, and S. Nomura, Investigation of the spatial profile of the quantum-Hall edge state by the photovoltage mapping using near-field optical microscopy, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011) NTT 物性科学基礎研究所(厚木) 2011.1.11-14
22. (Invited) A. Kanda, "Spin and Cooper-pair transport in graphene", Workshop on Dirac Electron Systems 2011, Tsukuba, 2011.1.19.
23. Y. Ootuka, Opening Remark, The Third International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Tsukuba, 2011.3.9-10.
24. H. Tomori, H. Goto, Y. Toyota, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda, "Fabrication of ballistic graphene Josephson junctions and its transport measurement", The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Tsukuba, 2011.3.9-10.
25. Y. Nukui, H. Goto, H. Tomori, Y. Toyota, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda, "Transport properties of multilayer graphene with a contactless suspended top gate", The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Tsukuba, 2011.3.9-10.
26. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka: Observation of Magnetization Process of Single-Molecule Magnet by Tunnel Junction Micro-SQUID, The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Tsukuba, 2011.3.9-10.
27. T. Kousaka, K. Urano, M. Saito and Y. Ootuka, Electrical conduction through a C60 molecular bridge between superconducting electrodes, The Third International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011), Tsukuba, 2011.3.9-10.

国内会議

1. (依頼講演) 神田晶申、「グラフェンの基礎物性と応用の可能性」、大阪大学産業技術研究所竹谷研究室セミナー、大阪大学、2010.4.20
2. 伊藤宙陸, 古谷景佑, 柴田祐輔, 大塚洋一, 野村晋太郎, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 近接場光学顕微鏡による圧縮/非圧縮性液体領域の実空間マッピング, DYCE2010 合同シンポジウム, 日本科学未来館, 2010.5.27-28

3. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki, Real-space mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope, 第 29 回電子材料シンポジウム, ラフォーレ修善寺, 2010. 7. 14-16
4. 神田晶申, 後藤秀徳, 友利ひかり, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生, 「単層・多層グラフェンの超伝導近接効果」, 「グラフェンと超伝導体のナノ構造に関する研究会」, 秋田大学, 2010. 8. 11
5. 友利ひかり, 神田晶申, 後藤秀徳, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生, 「バリスティック伝導を目指したグラフェン接合の作製と電気伝導特性」, 「グラフェンと超伝導体のナノ構造に関する研究会」, 秋田大学, 2010. 8. 11
6. 樋川和哉, 小野田雅重, 大塚洋一, 劈開法による Fe 系超伝導体 FeSe_{1-x}Tex 薄膜の試料作成・電気伝導測定, 第 5 回 三大学(東京理科大・筑波大・大阪大)連携学生研究会「アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会」, 東京理科大学・長万部キャンパス, 2010. 8. 26-28
7. 豊田行紀, 後藤秀徳, 田中翔, 友利ひかり, 大塚洋一, 神田晶申, Si 基板上的の PMMA に置かれたグラフェンの光学顕微鏡による識別, 第 5 回 三大学(東京理科大・筑波大・大阪大)連携学生研究会「アトミック/ポリスケールテクノロジー連携研究会」, 東京理科大学・長万部キャンパス, 2010. 8. 26-28
8. 宮崎久生, 黎松林, 日浦英文, 塚越一仁, 神田晶申, 「連結厚さ変調ゲートによる 2 層グラフェン pn 接合」, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 長崎大学, 2010. 9. 14-17
9. 伊藤由陸, 古谷景佑, 柴田祐輔, 大塚洋一, 野村晋太郎, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測 その 2, 2010 年秋季物理学会, 大阪府立大 2010. 9. 24
10. 大塚洋一, 浦野敬太, 幸坂健史, 超伝導 Al 電極に架橋した C₆₀ 分子の電気伝導, 2010 年秋季物理学会 大阪府立大 2010. 9. 26
11. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一, トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体磁化反転ダイナミクスの観測, 2010 年秋季物理学会 大阪府立大 2010. 9. 26
12. 友利ひかり, 後藤秀徳, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申, 「バリスティック伝導を目指したグラフェン接合の作製と電界効果」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010. 9. 23
13. 小久保伸人, 岡安悟, 神田晶申, 篠崎文重, 「SQUID 顕微鏡で直接観測した微小超伝導体の磁束配列とピン止めの効果」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010. 9. 23
14. 林正彦, 神田晶申, 吉岡英生, 「グラフェンにおける超伝導近接効果の理論」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010. 9. 23
15. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体磁化反転ダイナミクスの観測, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010. 9. 23-26
16. 森下将史, 「カゴメ格子ヘリウム 3 単原子層膜の生成」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010. 9. 26
17. 野村竜司, 村川智, 和田雄一郎, 田村雄太, 和才将大, 秋山綱紀, 青木悠樹, 斎藤政通, 奥田雄一: 超流動ヘリウム 3 の表面アンドレーエフ束縛状態とマヨラナフェルミオン, 第 4 回 物性科学領域横断研究会, 東京大学, 2010. 11. 13-15
18. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: トンネル接合型マイクロ SQUID の開発と分子磁性体磁化反転ダイナミクスの観測, 第 18 回渦糸物理国内会議, 日本原子力機構システム計算科学センター, 東京, 2010. 12. 1-3
19. 神田晶申, 「Toward graphene SFS Josephson junctions」, 「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第 1 回領域研究会, 京都大学, 2010. 12. 18-20
20. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: Development of Tunnel Junction Micro-SQUID Magnetometer for Investigation of Edge Spin magnetization Induced by Spin Hall Effect, 文部科学省科学研究費補助金新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第 1 回領域研究会, 京都大学, 2010. 12. 18-20
21. 野村竜司, 村川智, 和田雄一郎, 田村雄太, 和才将大, 秋山綱紀, 青木悠樹, 斎藤政通, 奥田雄一: 超流動ヘリウム 3 の表面アンドレーエフ束縛状態とマヨラナフェルミ粒子, 文部科学省科学研究費補助金新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第 1 回領域研究会, 京

都大学, 2010. 12. 18-20

22. 斎藤政通, 海老名宏, 松下慎平, 大塩寛紀, 大塚洋一: スピンホール効果の磁氣的観測に向けたトンネル接合型マイクロ SQUID の開発, 第 15 回半導体スピン工学の基礎と応用, 筑波大学, 2010. 12. 20-21
23. 友利ひかり, 後藤秀徳, 田中翔, 豊田行紀, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申, 林正彦, 吉岡英生: 「架橋グラフェンジョセフソン接合の作製と電界効果」日本物理学会第 66 回年次大会
24. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体磁化緩和の観測, 日本物理学会第 66 回年次大会
25. 大塚洋一, 浦野敬太, 幸坂健史, 斎藤政通, C60 分子超伝導電極架橋系の電気伝導 II, 日本物理学会第 66 回年次大会
26. 古谷景佑, 伊藤宙陸, 柴田祐輔, 大塚洋一, 野村晋太郎, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測その 3, 日本物理学会第 66 回年次大会
27. 森下将史, 「グラファイト上吸着 4He 薄膜の固化」, 日本物理学会第 66 回年次大会

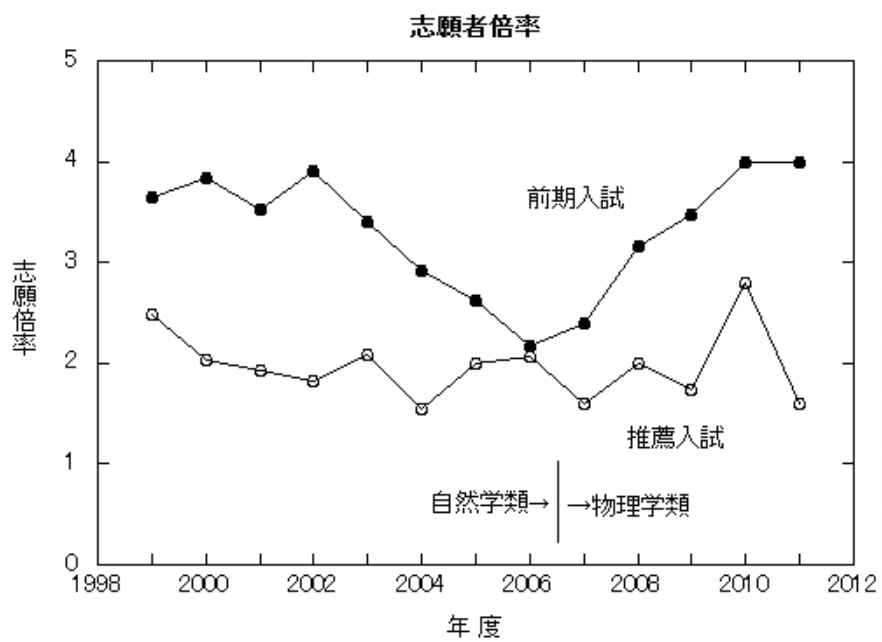
物理教育および物理教育の研究

【1】物理教育（初貝安弘）

本年度、平成22年度で筑波大学の特徴であった入学時に専門を特定しない形の自然科学類が発展的に改組し、物理学類としての入学生を受け入れてから4年目となった。伴って、物理学類所属の55名が第一期の卒業研究として研究室に配属され、3月には物理学類としての初の卒業生52名を送り出した。旧自然科学類に関しては卒業研究に3名配属され、前年度に卒業研究を終了していた1名と合わせて3名が卒業した。物理学類卒業生52名の進路は42名が大学院進学、就職は8名（民間企業5、公務員1、教員2）、2名が進学準備等となっている。

物理学類の教育に関しては、カリキュラム委員会にてその内容を審議し、教員会議に諮り最終的な審議、承認を行っている。この数年行っている学生による主体的学習活動为目标とする課題探究実習は正式科目として設置され、本年も有志の教員を中心に実施された。これに関しては、カリキュラム委員会にて、今後の展開の方法等を審議しているところである。また、教員、学生双方の意見に基づいて効率的な演習の形態を模索してきたが、基本的な科目に関しては講義と演習を一体化する方針が決定され、年時進行にて、講義と演習の改革を進めている。具体的には物理学類1年次の物理学A,Bに関しては平成23年度から一体化した形で講義と演習を実施する予定である。

物理学類の現状は、上記の卒業生55名の他に1年生71名、2年生67名、3年生81名の構成である。本年度の入学試験に関しては、時期の早い順に、編入試験（志望者17名、合格者5名内1名2年次編入）、2学期推薦入試（志望なし）、AC（アドミッションセンター）入試（志望4名合格者なし）、オリンピック特別入試（志望者2名、合格者2名）、推薦入試（志望者24名、合格者15名）、2月期の前期入試（志望者170名、合格者45名内1名追加合格）を行った。3月の後期入試は行っていない。以下の図に、この数年の前期入試、推薦入試の推移をグラフに示す。本年度は推薦入試の倍率が低下したが、前期試験に関しては、



物理学類の志望者、倍率はほぼ昨年と同様の4倍という高いものであり、物理学類の人気が高いことを裏付けている。

【2】体験学習（受川史彦）

物理学類では、大学における物理学の教育の内容を高校生に知ってもらうために、体験学習を毎年実施している。平成22年度は、大学説明会の翌日7月29日（木）に実施した。59名の参加者があった。学類長の説明のあと、物理学に関する講義2件を開講し、午後は、物理学実験（参加者は3テーマのうちからひとつ選択）と在学生との懇談を行い、さらに希望者は学内のセンターの見学を行った。

具体的な内容と時間進行は以下の通りである。

| | | |
|-------------|---------------------------|---------|
| 9:30- 9:40 | 物理学類長挨拶，事務連絡 | |
| 9:50-10:10 | 物理学類説明（学類長），実験内容説明，アンケート | |
| 10:20-11:00 | 【講義1】素粒子とはどのようなものか | （受川史彦） |
| 11:10-11:50 | 【講義2】宇宙進化と天体形成 | （森 正夫） |
| 11:50-12:50 | 昼食 | |
| 12:50-13:00 | 実験の組み分け | |
| 13:00-15:30 | 【物理実験】 | |
| | 演算増幅器 | （東山和幸） |
| | ガイガー・ミュラー計数管による放射線と宇宙線の測定 | （鈴木 宏） |
| | 光の干渉と回折 | （受川史彦） |
| 15:30-16:15 | 在学生との懇談 | |
| 16:15-16:30 | 修了式 | （初貝安弘） |
| 16:35-17:15 | プラズマセンター見学 | （小波蔵純子） |
| 17:20-18:00 | 計算科学研究センター見学 | （吉戸智明） |

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

【3】カリキュラム関係（受川史彦）

平成 22 年度中のカリキュラム関係の報告は以下の通りである。

1. 教育の改善：学生が主体となった授業評価アンケートを実施し，その結果をもとに学生と教員の意見交換を行い，問題点等の把握・分析と今後の改善に向けての方策を議論した。
2. 新たな教育方法の開拓と実践
 - (ア) 学生の能動的な学習を喚起するために，前年度に引き続いて「課題探究実習」を実施した。平成 22 年度には，「太陽の科学」，「パソコンで微分方程式を解いてみよう」，「身の回りの物理」，「光学望遠鏡で天体を観測する」の課題を実施した。
 - (イ) 物理学の教育では，歴史的に，講義形式の授業による知識の吸収と，学生が自ら手を動かして問題を解き，知識をさらに深く理解するための演習形式の学習が取り入れられてきた。それぞれの形式での教育の有効性をさらに向上させる目的で，両者の関係をより密接にすることが検討され，平成 23 年度からの実施が決定された。
 - (ウ) 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ている。
 - (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整備して開講した。
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「物理学 AI」，「物理学 BI」の再履修授業を，非常勤講師の協力のもと，夏休みに実施した。
 - (ウ) 日韓理工学留学生を対象とした物理学の入学前教育を担当した。

《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22年度

| | 博士 | | | | | | 卒研 生 | * 学振 | | * TA | 合計 |
|----------------|----|----|----|----|-----------|-----|---------|---------|-------|---------|------------------|
| | M1 | M2 | D1 | D2 | D3 一貫5 | 小計 | | PD | DC | | |
| 素粒子理論 | 5 | 4 | 1 | 1 | 2 | 13 | 3 | 1 | { 1 } | [10] | 17 { 1 } [10] |
| 宇宙理論 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 8 | 6 | 0 | { 0 } | [3] | 14 { 0 } [3] |
| 原子核理論 | 3 | 5 | 1 | 0 | 1 | 10 | 3 | 0 | { 0 } | [6] | 13 { 0 } [6] |
| 非平衡統計物理 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0 | 0 | { 0 } | [5] | 5 { 0 } [5] |
| 量子物性理論 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | { 0 } | [2] | 2 { 0 } [2] |
| ナノ量子物性 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | { 0 } | [1] | 1 { 0 } [1] |
| ソフトマター理論 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | { 0 } | [2] | 4 { 0 } [2] |
| 半導体ナノ物性 (創) | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 5 | 0 | 0 | { 1 } | [3] | 5 { 1 } [3] |
| ナノ構造物性 (創) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | { 0 } | [0] | 1 { 0 } [0] |
| 生命物理 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 6 | 1 | 0 | { 1 } | [2] | 7 { 1 } [2] |
| 素粒子実験 | 7 | 6 | 2 | 2 | 0 | 17 | 5 | 1 | { 0 } | [16] | 23 { 0 } [16] |
| 宇宙観測 | 4 | 3 | 0 | 2 | 1 | 10 | 7 | 0 | { 1 } | [3] | 17 { 1 } [3] |
| 原子核高エネ | 5 | 2 | 3 | 2 | 2 | 14 | 4 | 1 | { 1 } | [8] | 19 { 1 } [8] |
| 原子核低エネ | 4 | 3 | 1 | 0 | 2 | 10 | 4 | 0 | { 0 } | [6] | 14 { 0 } [6] |
| 磁性物性 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 8 | 2 | 0 | { 0 } | [4] | 10 { 0 } [4] |
| 半導体物性 (創) | 6 | 7 | 1 | 1 | 0 | 15 | 7 | 0 | { 0 } | [6] | 22 { 0 } [6] |
| 強相関物性 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0 | 8 | 2 | 0 | { 1 } | [6] | 10 { 1 } [6] |
| 表面物性 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | { 0 } | [0] | 2 { 0 } [0] |
| 低温物性 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 8 | 5 | 0 | { 0 } | [5] | 13 { 0 } [5] |
| プラズマ | 11 | 8 | 2 | 1 | 1 | 23 | 5 | 0 | { 0 } | [7] | 28 { 0 } [7] |
| 合計 | 56 | 53 | 13 | 12 | 12 | 146 | 49 | 4 | { 5 } | [86] | 199 { 5 } [86] |
| (創) | 7 | 9 | 1 | 2 | 2 | 21 | 7 | 0 | { 1 } | [9] | 28 { 1 } [9] |

*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) 大野 浩史 [金谷 和至]
A variational study on charmonium properties at finite temperature in lattice QCD
(格子QCDにおける対角化法を用いた有限温度下でのチャーモニウムの性質に関する研究)
- 2) 武田 光平 [石塚 成人]
Nucleon strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry
(厳密なカイラル対称性を持つ格子QCDからの核子ストレンジクォーク含有量)
- 3) 江幡 修一郎 [矢花 一浩]
Canonical-basis Time-Dependent Hartree-Fock-Bogoliubov Theory and Linear-Response Calculation for Light to Heavy Nuclei
(正準基底時間依存ハートリー・フォック・ボゴリューボフ理論と軽から重核の線形応答計算)
- 4) 石井 峻 [中井 直正]
Development of the Transportable Telescope for Submillimeter-Wave Astronomy in Antarctica
(南極におけるサブミリ波天文学のための可搬型望遠鏡の開発)

【博士論文】

<課程博士> [] 内は指導教員名
数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻

- 1) 福西 広晃 [白石 賢二]
Computational study on antigen-binding mechanism for high-affinity antibody
(高親和性抗における抗原結合メカニズムの計算科学的研究)

【修士論文】

<博士課程修士> [] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 伊藤 新助 [青木 慎也]
真空偏極補正によるテクニカラーモデルの制限に関する研究
- 2) 岩井 雄大 [石橋 延幸]
弦理論を用いた強結合超対称ゲージ理論における散乱振幅の解析
- 3) 馬場 隆行 [石橋 延幸]
局所化の方法を用いた $N=2$ 超対称ゲージ理論の低エネルギー有効作用の計算
- 4) 扇谷 豪 [森 正夫]
超新星爆発のガス加熱による重力場変動のダークマターハロー中心密度分布への影響
- 5) 中村 繁幸 [森 正夫]
銀河風と矮小銀河の形状の関係について
- 6) 三木 洋平 [森 正夫]
銀河衝突による銀河進化と活動銀河中心核への影響に関する理論的研究
- 7) 横山 貴士 [梅村 雅之]
非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化
- 8) 岡本 稔 [丸山 敏毅]
相対論的平均場モデルによる低密度核物質の非一様構造
- 9) 畑 佑樹 [矢花 一浩]
時間依存密度汎関数理論を用いた分子における高次高調波発生の研究
- 10) 福岡 佑太 [矢花 一浩]
スキルム力を用いた多スレーター行列式の重ね合わせによる軽い原子核の励起状態の記述
- 11) 三藤 竜也 [矢花 一浩]
TDHFB 法を用いた原子核の四重極型非軸対称非線形振動の研究
- 12) 李 畊旻 [矢花 一浩]
First-principles Study of Magnetic Circular Dichroism in Time-dependent Density Functional Theory
(時間依存密度汎関数理論による磁気円二色性の第一原理計算による研究)
- 13) 阿部 朝彦 [有光 敏彦]
超高速粒子の繰り返し測定におけるスピン位相緩和 —NETFD による解析—
- 14) 岡崎 祥太 [宮崎 州正]
 k -space overlap 液体の特異なダイナミクス

- 15) 花岡 恭平〔舘野 賢〕
 Computational investigation of the modulation mechanism of oxygen affinity of human adult hemoglobin through hydration and 3D structure changes
 (ヘモグロビンの立体構造および水和構造の変化による酸素親和調節機構の計算科学的解析)
- 16) 梁 文榮〔舘野 賢〕
 Computational study of enzymatic reaction mechanisms of complex of nucleic acid and protein
 (核酸とタンパク質複合体による酵素反応機能の計算科学的研究)
- 17) 木内 健司〔受川 史彦〕
 高エネルギー分解能を有するハフニウム系超伝導トンネル接合光子検出器の開発研究
- 18) 黒川 悠文〔受川 史彦〕
 光子コンバージョンによる ATLAS 内部飛跡検出器の物質評価の研究
- 19) 小池 博子〔受川 史彦〕
 リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いられる光検出器 MPPC の応答線形性の研究
- 20) 田中 航平〔金 信弘〕
 リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータの応答一様性の評価
- 21) 橋本 就吾〔金 信弘〕
 CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究
- 22) 濱崎 菜都美〔金 信弘〕
 パンチスルーを用いたシリコンセンサー保護機能の評価
- 23) 長崎 岳人〔中井 直正〕
 南極サブミリ波望遠鏡用サイドバンド分離型受信機系の開発
- 24) 新田 冬夢〔中井 直正〕
 南極サブミリ波望遠鏡搭載用超伝導カメラ光学系の開発
- 25) SALAK DRAGAN〔中井 直正〕
 A Study of the CO ($J=1-0$) Emission from the Starburst Galaxy M82
 (爆発的星形成銀河M82からのCO ($J=1-0$)輝線の研究)
- 26) 石橋 陽子〔小沢 顕〕
 核偏極移行反応による不安定核の核偏極生成
- 27) 大石 寛人〔小沢 顕〕
 RIBFにおけるNa同位体の相互作用断面積測定
- 28) 竹内 理将〔江角 晋一〕
 RHIC-PHENIX $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金+金衝突における多粒子相関法を用いた高温高密度QCD物質と高横運動量粒子間の相互作用についての研究

- 29) 小林 健 [小野田 雅重]
Sr₂TiO_{4-δ/2}系の輸送現象と磁性
- 30) 出村 郷志 [小野田 雅重]
BaTiO_{3-δ/2}系の輸送現象と磁性
- 31) 廣瀬 元 [小野田 雅重]
リチウムイオン二次電池正極活物質系の合成と磁性
- 32) 坪川 雅 [小野田 雅重]
Fe_{1+δ}Se_{1-x}Te_x系の結晶構造と物性
- 33) 栗原 佑太朗 [守友 浩]
シアノ錯体薄膜の価数差分分光とエピタキシャル成長
- 34) 浦野 敬太 [大塚 洋一]
超伝導電極を用いた C₆₀分子架橋系の電気伝導
- 35) 海老名 宏 [大塚 洋一]
トンネル接合型マイクロ SQUID による分子磁性体磁化過程の研究
- 36) 黒田 隆 [大塚 洋一]
メゾスコピック超伝導体における欠陥による渦糸状態の制御と渦糸-反渦糸状態の探索
- 37) 庄司 裕 [大塚 洋一]
イオン液体-FET を利用した Si-2 次元電子系の研究
- 38) 友利 ひかり [大塚 洋一]
バリステイック伝導を目指したグラフェンジョセフソン接合の作製と電気伝導測定
- 39) 田中 翔 [大塚 洋一]
グラフェンにおける移動度低下の要因とその除去
- 40) 石井 雄太 [吉川 正志]
GAMMA10 セントラル部における多チャンネルマイクロ波干渉計の構築
- 41) 太田 真雄 [假家 強]
GAMMA10 電子加熱実験における端損失電子計測と新型ジャイロトロンの開発
- 42) 小澤 博樹 [中嶋 洋輔]
GAMMA10 セントラル部における中性粒子ビーム入射加熱と粒子供給
- 43) 原口 裕介 [今井 剛]
GAMMA10 磁場中でのフルート不安定性に関する計算機シミュレーション
- 44) 細井 克洋 [中嶋 洋輔]
GAMMA 10 ECH 実験における粒子バランスの研究

45) 谷口 文彬〔吉川 正志〕

GAMMA 10 における Thomson 散乱計測システムの導入と電子温度計測

46) 米永 理央〔中嶋 洋輔〕

高速カメラを用いた GAMMA10 センtral部プラズマの2次元イメージ解析

【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) 山口 慶太〔白石 賢二〕

Clarification of operation mechanism of MONOS-type memories based on first-principles calculations

(第一原理計算に基づいた MONOS 型メモリー動作機構の理解)

2) 重田 浩司〔野村 晋太郎〕

ハフニウム系絶縁膜中欠陥の光局所励起による研究

3) 宍戸 将之〔野村 晋太郎〕

2次元電子系スピン検出のための GaAs 上における Nb-SQUID の研究

4) 濱野 毅信〔舛本 泰章〕

GaP:N および GaAs:N 中の単一等電子トラップの磁気光学

5) 平田 裕基〔舛本 泰章〕

ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光フォトルミネッセンス

6) 古谷 景佑〔野村 晋太郎〕

近接場光学顕微鏡を用いた 2次元電子系端状態における光励起効果の研究

7) 森川 祐〔野村 晋太郎〕

High-k ゲート絶縁膜付き GaAs/AlGaAs 量子井戸発光

8) 森田 孝裕〔舛本 泰章〕

微小共振器に組み込んだ(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの光学特性

物理学セミナー

平成22年度

| | 開催日 | 講師 | 題目 |
|-----|--------|--------------------------|---------------------------|
| 第1回 | 9月1日 | 中井 直正 (宇宙観測) | 銀河と宇宙の暗黒物質 |
| 第2回 | 9月8日 | 上岡 隼人 (物性実験) | 発光現象の素過程 |
| 第3回 | 9月15日 | 橋本 省二 (素粒子理論) 高エネ研 | 素粒子の真空とは |
| 第4回 | 9月29日 | 梅村 雅之 (宇宙理論) | 宇宙に生まれる最初の星 |
| 第5回 | 10月6日 | 初貝 安弘 (物性理論) | 鉛筆中の相対論とゲージ対称性 |
| 第6回 | 10月13日 | 佐藤 構二 (素粒子実験) | ヒッグス粒子探索の最前線 |
| 第7回 | 10月20日 | 坂本 瑞樹 (プラズマ) | 核融合プラズマの閉じ込めと境界プラズマ研究 |
| 第8回 | 10月27日 | 船木 靖郎 (原子核理論) | 原子核に現れるクラスター構造 |
| 第9回 | 11月10日 | 中條 達也 (原子核実験) | 高エネルギー重イオン衝突で探るビッグバン直後の宇宙 |

大学院関係経費

1. TA経費 数理物質科学研究科 物理学専攻分 4,831,900 円
2. TA経費 数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻(物理学分野)分
619,850 円

| 研究種目 | 職名 | 研究代表者 | 課題番号 | 研究題目 | 金額(千円) |
|------------|-----|-------|----------|--|--------|
| 特定領域研究 計 | 教授 | 金 信弘 | 18071002 | 陽子反陽子衝突実験CDFによるトップとボトム・フレーバーの物理 | 24,100 |
| " 公 | 教授 | 初貝 安弘 | 22014002 | フラストレートした磁性体におけるベリー位相とその展開 | 1,100 |
| " 公 | 教授 | 守友 浩 | 22013003 | 光励起によるナノポーラスシアノ錯体の物質移動と物性制御 | 1,900 |
| " 計 | 准教授 | 岡田 晋 | 19054002 | ナノチューブ複合構造体の物性解明と物質設計 | 1,100 |
| " 公 | 准教授 | 宮崎 州正 | 21015001 | コロイド系のガラス転移と非線形レオロジー | 1,900 |
| " 公 | 助教 | 久保 敦 | 21020006 | 表面プラズモンポラリトンの顕微鏡的フェムト秒ダイナミクス | 2,100 |
| 新学術領域研究 総 | 教授 | 青木 慎也 | 20105001 | 素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明 | 5,500 |
| " 計 | 准教授 | 野村晋太郎 | 20104005 | 低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測 | 16,900 |
| 基盤研究(S) | 教授 | 宇川 彰 | 18104005 | 超並列クラスタ計算機による計算素粒子物理学の展開 | 11,200 |
| " | 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 | 11,200 |
| " | 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 | 16,100 |
| 基盤基盤(A) 一般 | 教授 | 中井 直正 | 20244011 | 天の川のアンモニア掃天観測 | 4,500 |
| " " | 教授 | 舛本 泰章 | 20244044 | 人工原子の量子光学とスピン緩和の研究 | 7,400 |
| " " | 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 | 10,800 |
| " " | 准教授 | 蔵増 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 | 12,100 |
| " " | 准教授 | 森 正夫 | 21244013 | 理論と観測の融合による銀河発生学の探究 | 5,600 |
| " " | 講師 | 瀬田 益道 | 22244011 | 南極から探る銀河系の星間ダストの姿 | 9,000 |
| 基盤研究(B) 一般 | 教授 | 青木 慎也 | 20340047 | 格子量子色力学による核力の研究 | 4,700 |
| " " | 教授 | 金谷 和至 | 21340049 | 物理的クォーク質量における有限温度・有限密度QCDの格子研究 | 3,000 |
| " " | 教授 | 初貝 安弘 | 20340098 | 対称性の破れを伴わない量子液体相：幾何学的位相による理論とその応用 | 4,900 |
| " " | 准教授 | 舘野 賢 | 21340108 | 生体反応の量子ハイブリッド分子動力学シミュレーション | 7,200 |
| " " | 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 |
| " " | 講師 | 笹 公和 | 21310004 | 加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確率 | 2,100 |
| 基盤研究(C) 一般 | 教授 | 石橋 延幸 | 20540247 | D-ブレーンと閉じた弦の場の理論 | 600 |
| " " | 教授 | 受川 史彦 | 22540305 | ハドロン衝突におけるクォークオニウム生成機構の解明 | 1,500 |
| " " | 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 | 800 |
| " " | 准教授 | 宮崎 州正 | 21540416 | 過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性 | 900 |
| " " | 講師 | 小松原哲郎 | 21540295 | 銀河系ガンマ線A1-26の天体起源の解明 | 600 |
| " " | 講師 | 原 和彦 | 20540291 | P型シリコンを用いた高耐放射線性マイクロストリップ検出器の開発 | 300 |
| " " | 准教授 | 石塚 成人 | 20540248 | 格子QCDによる共鳴状態の研究 | 500 |

| 研究種目 | 職名 | 研究代表者 | 課題番号 | 研究題目 | 金額(千円) |
|------------|-----|-------|----------|--|---------|
| 挑戦的萌芽研究 | 教授 | 坂本 瑞樹 | 21656235 | 分光学的手法を用いた動的酸素リテンション実時間計測法の開発 | 700 |
| 〃 | 講師 | 吉川 耕司 | 21654026 | 6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション | 900 |
| 若手研究(B) | 助教 | 佐藤 勇二 | 21740158 | 可解構造に基づいた重力理論/ゲージ理論双対性の研究 | 500 |
| 〃 | 準研 | 船木 靖郎 | 21740209 | 原子核におけるガスのクラスター構造、及びクラスターによる量子凝縮状態の研究 | 800 |
| 〃 | 研究員 | 有川 晃弘 | 21740281 | 量子可解模型の相関関数と動力学 | 800 |
| 〃 | 研究員 | 三宅 秀樹 | 22740139 | 二体ミュー粒子及び二体荷電粒子トリガーを用いたbクォーク電弱希崩壊の精密測定 | 1,800 |
| 研究活動スタート支援 | 助教 | 岡本 崇 | 21840015 | 三次元輻射流体シミュレーションで探る銀河形成の物理 | 900 |
| 〃 | 助教 | 川勝 望 | 22840007 | 多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明 | 1,130 |
| | | | | 合計 | 178,830 |

※ 網掛けは計算センターより申請・交付

平成22年度 一般受託研究等

| NO | 職名 | 氏名 | 委託者名 | 研究題目 | 金額 (円) |
|----|-----|-------|------------------------|--|------------|
| 1 | 准教授 | 神田 晶申 | (独)科学技術振興機構 | 面内伝導システム基礎伝導 | 7,800,000 |
| 2 | 准教授 | 岡田 晋 | (独)科学技術振興機構 | グラファイト複合構造体の基礎物性解明とデバイス設計指針の開発 | 18,330,000 |
| 3 | 准教授 | 池沢 道男 | (独)科学技術振興機構 | 単一不純物を利用した光機能的半導体量子素子の創出 | 4,160,000 |
| 4 | 教授 | 守友 浩 | 文部科学省 | 物質のフェムト秒物理・化学現象解析のためのX線散乱計測技術(フェムト秒時間分解顕微鏡の構築と光応答性物質の探索) | 3,500,000 |
| 5 | 教授 | 中井 直正 | 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 | 高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明 | 7,170,000 |
| 6 | 助教 | 小林 航 | (独)科学技術振興機構 | サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発 | 5,837,000 |
| 合計 | | | | | 46,797,000 |

平成22年度 奨学寄附金

| NO | 職名 | 氏名 | 寄付者等名 | 寄付の目的 | 金額 (円) |
|----|----|-------|---------------------|--|-----------|
| 1 | 助教 | 斎藤 政通 | 財団法人日揮・実吉奨学会 | 「マイクロSQUIDによるスピン流の検出」に対する研究助成 | 2,000,000 |
| 2 | 講師 | 笹 公和 | 公益財団法人クリタ水・環境科学振興財団 | 「採択された研究テーマ(長半減期核種C1-36を用いた地下水滞留時間評価法の研究)」に対する研究助成 | 650,000 |
| 3 | 教授 | 中井 直正 | (原寄附者)公益財団法人三菱財団 | 「南極サブミリテラヘルツ望遠鏡の開発」のため | 7,000,000 |
| 合計 | | | | | 9,650,000 |

平成22年度 民間等との共同研究

| NO | 職名 | 氏名 | 民間等機関 | 研究題目 | 金額 (円) |
|----|-----|-------|-----------|---------------------------|-----------|
| 1 | 准教授 | 小野田雅重 | 富士重工業株式会社 | リチウム二次電池正極材料の構造及び物性に関する研究 | 5,250,000 |
| 合計 | | | | | 5,250,000 |

平成22年度 その他

| NO | 職名 | 氏名 | 民間等機関 | 研究題目 | 金額 (円) |
|----|----|----|-------|------|-----------|
| 合計 | | | | | 0 |

平成22年度 各種受賞等

| NO | 職名 | 氏名 | 賞名 | 受賞論文等 | 受賞月 |
|----|----|------|---|---|-----|
| 1 | 助教 | 久保 敦 | 平成22年度文部科学省 若手研究者賞 | ナノスケール光-電子応答のフェムト秒映像化技術の研究 | 4月 |
| 2 | 助教 | 小林 航 | Award JPSJ Papers of Editors' Choice | Sr ₃ YCo ₄ O _{10.5} における中間スピン状態の整列に関する論文に 対して | 2月 |

役 務 分 担

平成22年度

| | |
|----------------------------------|--|
| 数理物質科学研究科物理学専攻長 物理学系長 | 青木慎也 |
| 数理物質科学研究科学務委員（物理学専攻） | 守友浩 |
| 数理物質科学研究科運営委員（物理学専攻） | 青木慎也， 守友浩 |
| 物理学類長 | 初貝安弘 |
| 物理学類学務委員 | 受川史彦 |
| 自然学類運営委員 | 初貝安弘， 受川史彦 |
| 物理学関係自己評価委員 | 青木慎也（委員長）， 有光敏彦， 今井剛， 受川史彦， 梅村雅之， 大塚洋一， 白石賢二， 中井直正， 舩本泰章， 三明康郎， 矢花一浩， 舘野賢 |
| 図書係 | 小野田雅重 |
| カリキュラム委員 | 受川史彦（委員長）， 青木慎也， 今井剛， 梅村雅之， 金谷和至， 中井直正， 初貝安弘， 守友浩， 矢花一浩， 新井一郎 |
| 学類クラス担任（1年） | 舘野賢， 池沢道男 |
| （2年） | 小沢顕， 吉川耕司 |
| （3年） | 吉江友照、武内勇司 |
| （4年） | 守友浩， 岡田晋 |
| 自然学類就職委員 | 吉江友照， 岡田晋 |
| 自然学類学生委員会（学生生活審議会委員） （学生担当教員） | 1年クラス担任：舘野賢， 池沢道男 |
| 学類学生委員会 | 舘野賢， 池沢道男 |
| ハラスメント委員/相談員 | 神田晶申 |
| 実験廃棄物取扱責任者 | 東山和幸 |
| | |
| | |
| | |
| | |

物理学系人事異動

(平22. 4. 1～平23. 3. 31)

【物理学系に来られた方々】

| 氏名 | 職名 | 発令日 | 異動内容(前職) |
|------|------|------------|----------------------------|
| 濱本雄治 | 助教 | H22. 4. 1 | 東京大学大学院理学系研究科・学振特別研究員(DC2) |
| 庄司光男 | 助教 | H22. 7. 1 | 大阪大学学振特別研究員(PD) |
| 小林航 | 助教 | H22. 9. 1 | 早稲田大学高等研究所助教 |
| 宮本祐介 | 準研究員 | H22. 9. 1 | 数理物質科学研究科研究員 |
| 坂本瑞樹 | 教授 | H22. 10. 1 | 九州大学応用力学研究所准教授 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

【物理学系を去られた方々】

| 氏名 | 職名 | 発令日 | 異動内容 |
|-----|-----|-------------|--------------------------|
| 岡本崇 | 助教 | H22. 11. 30 | 筑波大学計算科学研究センター・主任研究員 |
| 鈴木宏 | 助教 | H23. 3. 31 | 理化学研究所 仁科加速器研究センター・特別研究員 |
| 舘野賢 | 准教授 | H23. 3. 31 | 兵庫県立大学大学院生命理学研究科・教授 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

物理学系構成員

2010. 4. 1～2011. 3. 31

| | | 教授 | 准教授 | 講師 | 助教 | 準研 | 技術 | |
|--------|--------|--|---|--|-------------------|----------------|----------|--|
| 理 | 素粒子 | 青木(慎) [計七] 石橋 宇川 [計七] 金谷 | 石塚 [計七] 吉江 [計七] 藏増 [計七] | 谷口(裕) [計七] | 佐藤(勇) 八田 毛利 | | | |
| | 宇宙物理 | 梅村 [計七] | 森 [計七] | 吉川(耕) [計七] | 岡本 [計七] 川勝 | | | |
| | 原子核 | 矢花 [計七] | 丸山 [連携・物理] | 橋本 [計七] | | 船木 | | |
| | 物 性 | 非平衡統計物理 | 有光 | | | 吉田 | | |
| | | 量子物性理論 | 初貝 | | | 濱本 | | |
| | | ナノ量子物性 | | 谷口(伸) | | | | |
| | | ソフトマター理論 | | 宮崎 | | | | |
| | | 半導体ナノ物性 | 白石 [計七] | 河合 [連携・物質創成] | | 岩田 [計七] | | |
| ナノ構造物性 | | | 岡田 [計七] | | | | | |
| 生命物理 | | 舘野 [計七] | | 庄司 [計七] | | | | |
| 実 験 | 素粒子 | 受川 金 新井 [客員・物理] 浦川 [客員・物理] 幅 [客員・物理] | | 佐藤(構) 武内 原 | | | | |
| | 宇宙観測 | 中井 | | 瀬田 | | 宮本 | | |
| | 原子核 | 三明 新井 [客員・物理] 浦川 [客員・物理] 宮武 [客員・物理] | 新井(一) 江角 小沢 和田 [連携・物理] 田中 [客員・物理] | 小松原 [研究基盤七] 笹 [研究基盤七] Schury 中條 | 鈴木 | 長江 | 加藤 | |
| | 物 性 | 磁性物性 | | 小野田 | | | | |
| | | 半導体物性 | 舛本 蔡 [連携・物質創成] 西川 [連携・物質創成] 山下 [連携・物質創成] | 池沢 野村 後藤 [連携・物質創成] | | 富本 | | |
| | | 強相関物性 | 守友 | 川本 [連携・物理] | | 上岡 [学際七] 小林 | | |
| | | 表面物性 | | | 東山 | 久保 | | |
| | | 低温物性 | 大塚 [学際七] | 神田 | | 齋藤 [学際七] 森下 | | |
| | プラズマ | 今井 [フセ長] 坂本 坂本 [連携・物理] 藤田 [連携・物理] | 假家 中嶋 [フセ] 吉川(正) 濱松 [連携・物理] | 小波蔵 [フセ] 沼倉 [フセ] 平田 [フセ] 南 [フセ] | | | 大川 平田 | |
| | 事務室 | | 岡野, 中川, 中井 | | | | | |

年次研究報告 筑波大学物理学系

2010（平成22）年度

発行 2011年9月

発行者 筑波大学物理学系

〒305-8571 茨城県つくば市天王台1-1-1

TEL 029-853-4033

FAX 029-853-6618

ISSN 0915-5317