

ISSN 0915-5317

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2008 (平成20) 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	24
III	宇宙物理理論グループ	49
IV	宇宙観測グループ	69
V	原子核理論グループ	75
VI	原子核実験グループ	84
VII	物性理論グループ	
VII-1	凝縮系理論グループ	113
VII-2	計算物性グループ	137
VII-3	計算生命グループ	155
VIII	物性実験グループ	
VIII-1	磁性物性グループ	167
VIII-2	半導体物性グループ	173
VIII-3	強相関物性グループ	189
VIII-4	表面物性グループ	198
VIII-5	低温物性グループ	205
IX	プラズマ研究グループ	215

— 教育活動 —

X	物理教育および物理教育の研究	250
	【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	253
	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

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、八田 佳孝、毛利 健司

研究員 石井 理修、井上貴史、浮田 尚哉、梅田 貴士、加堂 大輔、滑川
祐介、松尾 俊寛

大学院生 (12名)

【人事異動】谷口 裕介氏が2008年11月に講師に昇格した。また、松尾俊寛氏(2008年4月)と井上貴史氏(2009年1月)が素粒子理論グループに研究員として加わり、加堂大輔氏が理化学研究所(2008年10月)に、梅田貴士氏が京都大学基礎物理学研究所(2008年12月)に、それぞれ研究員として転出した。

【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と超弦理論の研究に、2008年2月に加わった八田 佳孝氏を中心にした高エネルギー・ハドロン物理の研究を加えた、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では、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子 QCD の大型数値シミュレーションが推進された。

筑波大学の格子ゲージ理論の研究者は、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な研究グループとして立ち上げられたPACS-CS Collaborationに参加している。PACS-CS Collaborationでは、物理的なu, dクォーク質量での $N_f = 2+1$ QCDの大規模シミュレーションを目標にゲージ配位の生成を行ない、第1段階の計算を終了し、その研究成果の一部を発表した。また、物理的なu, dクォーク質量での $N_f = 2+1$ QCDの大規模シミュレーションを開始し、ゲージ配位生成を継続中である。一方、一部の研究者は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)のIBM BlueGene/Lと日立SR-11000を用いて研究を進めるJLQCD Collaborationに参加し、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力学的クォークの数値シミュレーションによる研究を展開した。

また、これらの大規模な研究と並行して、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、QCDの結合定数のスケール依存性の研究、繰り込み定数の非摂動的計算、カイラル摂動論を用いた研究、なども行われた。

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の構築に参画した。

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行列模型や、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たり、弦の場の理論におけるD-ブレーンの取り扱いが可能になったり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D-ブレーン、ゲージ重力対応のQCDへの応用等についての研究を行った。また、松尾俊寛氏は学外の共同研究者らと共にストリング理論に関する研究も行った。

八田 佳孝氏、松尾俊寛氏は、 $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論における電子陽電子消滅の終状態の研究、BK方程式の因子化の破れの研究、電子陽電子消滅と高エネルギー散乱の関係の研究、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、谷口 裕介、石井 理修、井上貴史、浮田 尚哉、梅田 貴士、加堂 大輔、滑川 祐介)

(1) PACS-CS Collaboration の活動

計算科学研究センターでは、平成17年度から3ヶ年計画で特別教育研究経費(拠点形成)を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機PACS-CS(計算ノード数2560、ピーク演算性能14.3Tflops)が平成18年7月から稼働を開始した。PACS-CS CollaborationはPACS-CSを主要な計算設備として格子QCDの研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学系メンバーを中心として組織されている。その目標は、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を目標としている。平成18年度は、PACS-CS稼働開始に伴うプログラム開発と比較的重いup-downクォーク質量でのシミュレーションを実行し、平成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のが主要課題であった。平成20年度は、これまでの課題を継続するとともに、いよいよ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に取り組んだ。また、平成20年6月からは新たな超並列クラスタ計算機T2K-Tsukuba(計算ノード数648、ピーク演算性能94.Tflops)が稼働を開始するとともに、それを利用した計算も始まった。以下に平成20年度における進展を述べる。

昨年度に引き続き、非摂動的に $O(a)$ 改良されたWilsonクォーク作用とIwasakiゲージ作用を用いて、格子サイズ $32^3 \times 64$ 、格子間隔 $a \approx 0.09\text{fm}$ のシミュレーションを行った。up-downクォーク質量に関しては、カイラル摂動論からの予言を検証するために $m_{\text{ud}} = 61, 41, 22, 19, 11, 3\text{MeV}$ という広範な値を採用した。strangeクォーク質量に関しては過去の計算によって推定された物理的

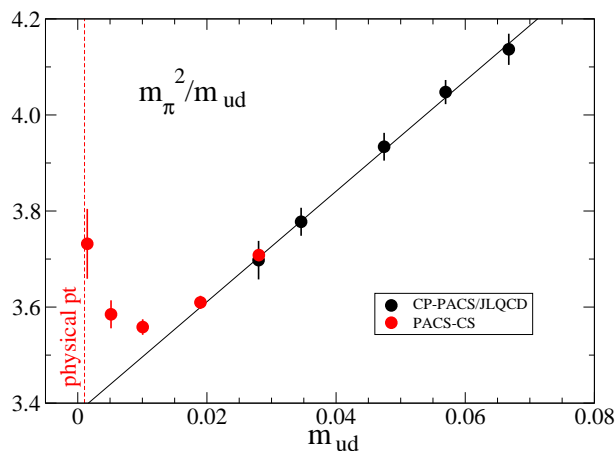


図 1: m_{π}^2/m_{ud} を m_{ud} の関数としてプロットしたもの。但し、両者は格子単位で与えられている。赤丸は PACS-CS 機を用いて得られた結果を表し、黒丸は CP-PACS 機等を用いて得られた以前の結果を表す。赤の垂直破線は物理的な up-down クォーク質量の位置を示している。黒線はクォーク質量依存性を明瞭にするために引いた直線である。

質量に固定したが、 $m_{ud} = 19\text{MeV}$ の点においては 20%程度軽い値も採用し、strange クォーク質量依存性を調べた。物理量のクォーク質量依存性としてパイ中間子質量の 2 乗を裸のクォーク質量で割ったものを図 1 に示した。赤丸は今回 PACS-CS 機において計算したものであり、黒丸は PACS-CS 機の前身である CP-PACS 機等を用いて計算したものである。物理的な up-down クォーク質量に近づくにつれて下に凸な曲率を確認することができるが、これはカイラル摂動論において予言される振舞いと一致している。このことは物理点あるいはそれに非常に近いクォーク質量でのシミュレーションが本質的に重要であることを示している。また、同じ配位を用いたハドロン質量の計算によって、物理点におけるハドロン質量が数%の範囲内で実験と一致していることを見出した (図 2)。以上の結果は論文 1 としてまとめ、すでに出版済みである。

平成 20 年度は新たに PACS-CS プロジェクトの目標である物理点直上におけるシミュレーションに取り組んだ (論文 2,3)。格子サイズおよび格子間隔はこれまで行ってきた重いクォーク質量でのシミュレーションと同じものを採用し、up-down および strange クォーク質量に関する物理点は、これまでの計算結果を外挿することによって推定した。シミュレーションの結果わかったことは、計算コストおよびアルゴリズムの安定性に関しては問題はないが、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点への微調整という課題を解決する必要があるということである。現在我々は Reweighting と呼ばれる方法による物理点への微調整が可能か否か調べている段階である。微調整の問題は別にして、アルゴリズム的に物理点直上のシミュレーションが可能になったことは疑いの余地がない。我々は物理点における体積効果を調べるために T2K-Tsukuba を用いて格子サイズ 64^4 、格子間隔 $a \approx 0.09\text{fm}$ のシミュレーションを開始した。この計算は平成 21 年度も継続実行の予定である。

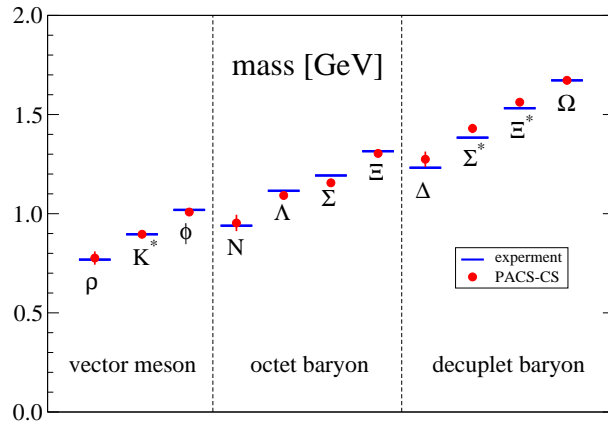


図 2: ハドロン質量の実験値との比較。横棒は実験値を表す。

(2) Wilson クォークによる有限温度・有限密度 QCD の状態方程式の計算

我々は、Wilson クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を推進している。Wilson クォークによる計算は世界的に見ても筑波の cp-pacs グループ以降ほとんど行われていなかった。そのため、まずは有限温度の相図が既に詳細に調べられている $N_f = 2$ QCD の場合について、Wilson クォークとして最初の有限密度 QCD 研究を実行した。有限密度に関しては、化学ポテンシャルに関する Taylor 展開の手法を用いた。従来の方法に加えて有限密度の複素位相部分をガウス関数で近似して reweighting 法を用いる新しい手法による状態方程式の有限密度効果の計算や、クォーク数密度揺らぎの計算なども行った。これらの計算で、従来 Staggered クォークの計算で見つけていた有限密度領域でクォーク数密度の揺らぎが増大する兆候が Wilson クォークによっても確認できた (図 3 参照)。

また、 $N_f = 2$ QCD の配位上での magnetic および electric デバイ遮蔽の詳細に関する研究を行った。Euclid 時間反転 と 荷電共役 の対称性を考えることによってあるゲージ固定条件のもとで、Polyakov loop 相関を対称性に依じて分類し、それぞれの遮蔽質量を導出する事ができる。その結果、有限温度摂動論からの予想の通り、magnetic 遮蔽質量 (m_M) は electric 遮蔽質量 (m_E) よりも大きくなる事などを示した。さらに両者の質量比 (m_E/m_M) が AdS/CFT 対応より求められる値に良く一致する事などを議論した。

これらの計算に関しては国際会議などで発表を行った。また現在投稿論文を準備中である (論文 9,10)。

(3) 有限温度・有限密度状態方程式の計算方法開発 (T -integral 法)

最終目標である $N_f = 2+1$ QCD での有限温度・有限密度研究は、極めて多くの計算時間を要求する。従来固定格子数 (N_t) で integral 法を用いる計算方法では、ゼロ温度格子のシミュレーションを大量に要求し、それが全体の計算コストの大きな部分を占めている。それを大きく削減する方法として、固定格子間隔アプローチを提案した。この方法では従来熱力学量の計算と異なり、

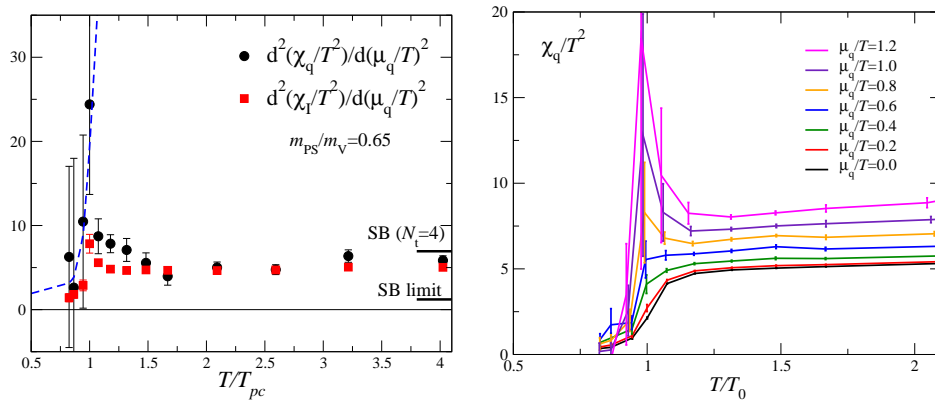


図 3: Wilson クォークによる有限温度・有限密度 QCD の研究。左図: $N_f = 2$ QCD における、クォーク数密度揺らぎ (黒) とアイソスピン数密度揺らぎ (赤) の化学ポテンシャルに関する 2 階微分。 $m_{PS}/m_V = 0.65$, $\mu_q = 0$ での結果。前者が相転移点で特異的なのに対し、後者は強い特異性を示さない。右図: テーラー展開法と、近似的改良を組み合わせた、 $\mu_q \neq 0$ でのクォーク数密度揺らぎの温度依存性。

ゲージ結合定数ではなく、時間方向の格子サイズによって温度を変えるという手法での有限温度の研究を行う。

我々は、固定格子間隔アプローチで状態方程式を計算するために、状態方程式の新しい非摂動的評価法 T-integral 法を開発した。従来の非摂動的評価法 integral 法は固定格子間隔では用いることは出来ないが、ある熱力学関係式を元に、状態方程式 (圧力) をトレースアノマリーの温度積分としてあらわすと、固定格子間隔でも状態方程式の計算が可能になる。このアイデアをまずクエンチ近似 QCD の場合でテストして、従来の方法で求めた状態方程式の結果と遜色の無い結果を再現した。

この研究では、等方格子と非等方格子の場合について計算を行った。非等方格子では空間方向に比べ時間方向の格子間隔のみを細かくできるので、固定格子間隔アプローチでも温度を細かくコントロールできる。図 4 (左) の結果は新しいアプローチで計算した等方、非等方格子でのトレースアノマリーの値と、従来の手法による結果との比較を行っている。図 4 (右) ではトレースアノマリーの温度積分で求められる状態方程式の結果である。これらは、ほぼ従来の大規模計算の結果を再現して、新しいアプローチの有効性を示した。T-integral 法は、従来の integral 法と相補的で、特に従来の方法で格子化誤差が出やすい相転移点近傍で精度の良い計算を行える可能性がある (論文 7,8)。

現在、固定格子間隔で $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度配位を生成しており、その成果の一部は国際会議でも発表した。

(4) クォーク・グルオン・プラズマ相におけるチャーモニウム消失の研究

チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウム (特に J/ψ , χ_c , ψ' 状態など) がクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 相中で

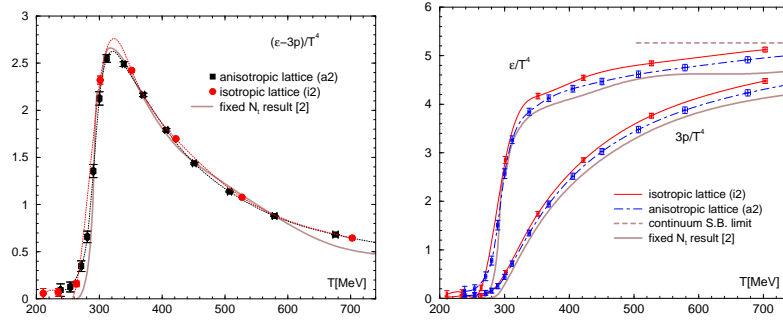


図 4: 固定格子間隔アプローチと T-integral 法による有限温度・有限密度 QCD の状態方程式の研究。クエンチ近似でのトレスアノマリー (左図) と状態方程式 (右図) の結果。

消失する温度や特性を格子 QCD による第一原理計算で研究した。これは、重イオン衝突実験で QGP 生成を示す重要なシグナルの一つである「 J/ψ 抑制」を判断する上で本質的な情報となる。先行研究では、最大エントロピー法により計算されたスペクトル関数を用いた解析が主流であったが、この方法には不定性があるため、異なる解析手法による検証が必要である。我々は、対角化の方法を用いて S 状態と P 状態の基底状態と励起状態に対する有効質量及び波動関数を計算し、有効質量の空間方向境界条件依存性及び波動関数の空間分布を調べることでチャーモニウムの消失の有無を確かめた。また、特に P 状態には不必要な定数モードの効果が大きく寄与していることが指摘されており、我々はこの影響を取り除いた解析も行った。シミュレーションは $O(a)$ 改良されたウィルソンクォーク作用とプラケットゲージ作用を使用し、クエンチ近似を用いて行った。その結果 (図 5 参照)、少なくとも臨界温度の 2.3 倍の温度まで 1S、2S、1P、2P 状態のチャーモニウムが消失することは確認できなかった (論文 6,11,12,13)。図 5 参照。

(5) ILDG の構築

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 プロジェクトに参画し、システムの改良に携わった。また、システム概要と利用状況を国際会議にて報告した (論文 14)。

(6) 格子 QCD によるバリオン間力の研究

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、石井らは昨年度、東京大学の初田との共同研究で、二核子系の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を用いて格子 QCD により計算したが、その方法のまとめを論文 23 として発表した。

今年度は、中心力以外の成分としてポテンシャルのテンソル力の計算を行った (論文 36)。さらに、力学的クォークの寄与を含むゲージ配位での計算も行った

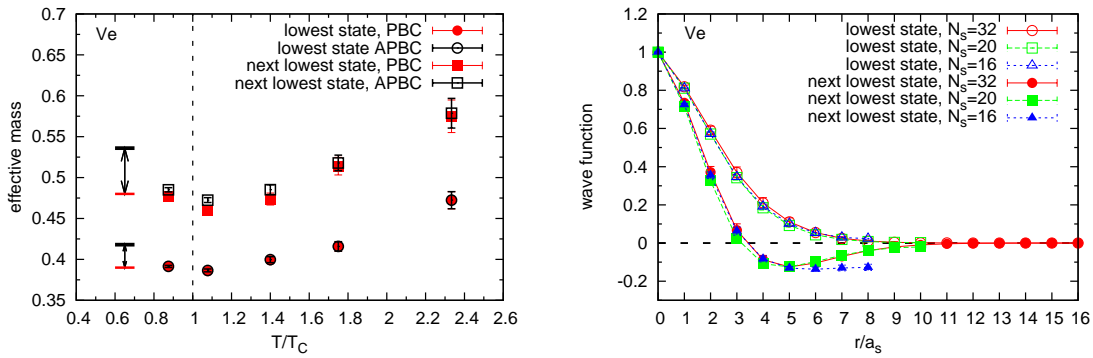


図 5: チャーモニウム消失の研究。ベクターチャンネルに対する結果。左図は有効質量の温度変化を表しており、色の違いは空間方向の境界条件の違いを表している。散乱状態の場合には矢印で表わされる程度の違いがみられるはずだが、そのような違いはみられない。一方、右図は臨界温度の 2.3 倍の温度における波動関数の空間分布を表しており、色の違いは空間方向の格子サイズの違いを表している。明らかに波動関数は空間的に局在していることがわかる。これらの結果は、束縛状態がまだ存在していることを示している。

(論文 36)。図 6 は、 π 中間子の質量が 700MeV に対応する PACS-CS Collaboration によって生成された 2+1 フレーバーの格子 QCD のゲージ配位を使って計算された核力ポテンシャルである。スピン一重項の中心力と、スピン三重項の中心力およびテンソル力の結果を示している。どちらの中心力も斥力芯を持っているが、テンソル力には中心力がないことが見てとれる。また、この研究を発展させ、ストレンジ・クォークを含むバリオンであるハイペロンと核子のポテンシャルの計算も行った (論文 26,35)。

波動関数からポテンシャルを定義する方法では、波動関数のエネルギーに対するポテンシャルの依存性が問題となる。今年度は、エネルギーを変えた波動関数からポテンシャルを計算し、そのエネルギー依存性を評価した (論文 34)。また、2次元の解けるモデルを使って、波動関数から定義されるポテンシャルの一般的性質を研究した (論文 24)。

(7) 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 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 (論文 22) と $N_f = 2+1$ 格子 QCD でゲージ配位を生成し、それを用いた研究を行った。

ゲージ場のトポロジーを固定した計算から理論的考察を用いてトポロジカル電荷の帯磁率を計算した (論文 18)。 ϵ 領域での有限体積の計算で、中間子の相関関数からカイラル摂動論のパラメタを決定し (論文 19)、また、中間子の質量や崩壊定数のクォーク質量依存性を詳細に調べた (論文 25)。さらに、K 中間子の B パラメタの決定 (論文 20) や QCD の結合定数の決定 (論文 27) などを行った。

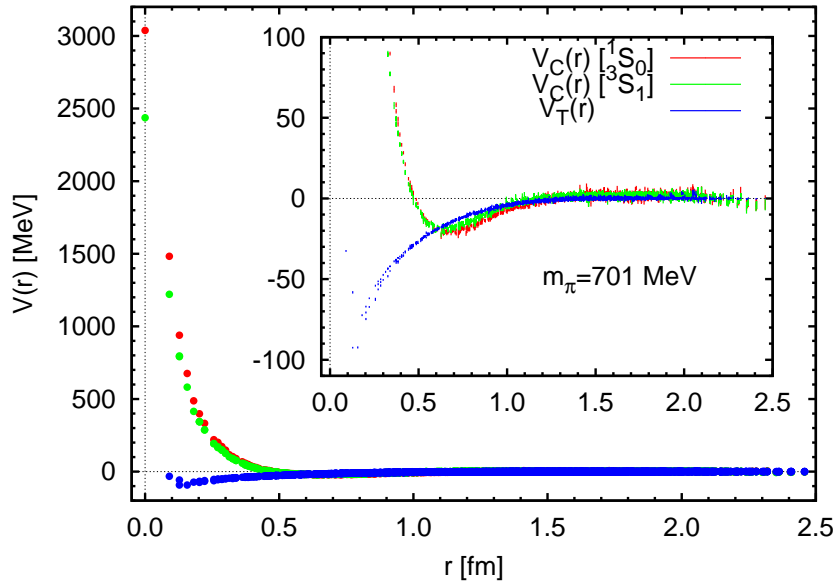


図 6: 2+1 フレーバー格子 QCD の計算で得られた 2 核子間のポテンシャル。 π 中間子の質量は約 700MeV である。赤がスピン一重項の中心力、緑がスピン三重項の中心力、青がスピン三重項のテンソル力である。

(8) π π 散乱の位相差の計算

石塚らは、格子 QCD のクエンチ近似の計算で π π 散乱の位相差を、ゼロで無い相対運動量を持つ 2 π 中間子系の波動関数から求めた (論文 15)。

(9) 格子 QCD による中性 K 中間子の B パラメタの非摂動的繰り込み定数の計算

orbifolding を用いた格子上の Schrödinger functional の定式化を domain-wall fermion に適用し、その具体的な応用として Kaon B-parameter 及び u, d, s quark 質量の非摂動的な繰り込みを行った。(論文 16)。

(10) QCD の結合定数のスケール依存性の研究

谷口らは、 $N_f = 2+1$ QCD の結合定数を 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 17, 国際会議 19, 学会発表 10)。

山崎らは結合定数が低エネルギー領域でエネルギースケールに依存しなくなる非自明赤外固定点探索のため、既存の方法よりも有限格子間隔に起因する系統誤差が小さなウィルソンループを用いたスキームを提案し、クエンチ近似 QCD を用いて試験的な計算を行なった (論文 40)。

村野らは、動的 u, d クォークの効果を取り入れた QCD の非摂動的な結合定数のスケール依存性をシュレディンガー汎関数法を用いて計算した。特に、格子間隔依存性をプラケットゲージ作用と岩崎ゲージ作用で比較した (論文 42)。

(11) 格子 QCD による核子形状因子の計算

山崎らは、格子上で良いカイラル対称性を持つドメインウォールクォーク作用を用いて u, d, s クォーク動的効果を含んだ核子形状因子を計算した。他グループのこれまでの結果との比較から、ベクトル流に関係する形状因子に比べ、軸性ベクトル流に関係する形状因子には非常に大きな有限体積効果が含まれる事を示した (論文 41)。

(12) カイラル摂動論に対する有限格子間隔の影響の研究

青木らは、Wilson fermion の場合に、 π π 散乱に対する有限格子間隔の影響をカイラル摂動論を用いて研究した (論文 28)。また、上田らは、twisted mass 格子 QCD の π 中間子の崩壊定数をカイラル摂動論の 1 ループで計算し、有限格子間隔の影響を評価した (国際会議 32)。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二、松尾 俊寛)

(1) 弦の場の理論と D-ブレーン

弦の理論は D-ブレーンと呼ばれるソリトンを使ってその非摂動的な振る舞いが調べられてきた。ところが、これまでこの D-ブレーンが本当に弦理論の運動方程式の解なのかということは問われてこなかった。弦理論を用いて素粒子の模型を構築する際、このような基本的な問題が非常に重要になる。

石橋は馬場・村上 (理研) とともに O_{sp} 不変な閉弦の場の理論においては D-ブレーンは BRS 不変な演算子として実現できるのではないかという提案をした。この提案を更に研究するため、この演算子を用いてシリンダー状のファインマングラフに対応する振幅を計算し、通常の結果を再現することを示した (論文 43)。また、この演算子を用いて複数個の D-ブレーンを表そうとすると、行列の自由度が現れてくることを示した (論文 44)。

(2) conformal interface を通したエンタングルメント

異なった共形場理論が共形不変性を保ったまま界面を通して接合している時、この界面を conformal interface と呼ぶ。このような、conformal interface を含む共形場理論は、境界を持つ物性系や弦理論のソリトンを記述する、境界を持つ共形場理論の自然な拡張になっており、物性理論・弦理論双方の観点から興味深い。しかしながら、conformal interface についての研究はまだ始まって間もなく、その基本的な性質も十分には明らかになっていない。

佐藤は酒井 (慶應義塾大学) と共に、 $c=1$ (1+1) 次元共形場理論において conformal interface を通したエンタングルメントを研究した。特に、界面で接した系のエンタングルメントの大きさを測る指標であるエンタングルメントエントロピーを厳密に求め、そこから巻き付き数などの系の大域的・位相的な情報が読み取れるという興味深い性質を見出した (論文 45)。

(3) ホログラフィック QCD

ゲージ/重力対応を用いて、重力側のモデルで QCD を解析する方法はホログラフィック QCD と呼ばれ、近年盛んに研究されている。齋藤は、0 型弦理論の中で、ある D ブレーン配位のもとでゲージ/重力対応を用いることで、QCD に近いモデルが得られることを議論し、ベクトルメソンの質量スペクトルなどの計算をした (論文 46)。

(4) 弦の場の理論と次元正則化

光円錐ゲージで超弦の場の理論を作ろうとすると、弦の相互作用項に世界面上の超対称生成子を入れる必要があり、この演算子のせいで摂動計算が発散することが知られている。この問題は超弦の場の理論一般に形を変えて存在しており、弦の場の理論における最大の問題である。

石橋は馬場・村上 (理研) とともに、この発散を次元正則化によって正則化することが出来ることを示した。この正則化を用いて 4 点振幅を計算し、発散を相殺するカウンタータームなしで通常の結果が再現されることを示した (論文 47)。

(5) ゲージ理論/重力理論双対性と可解構造

弦理論の主要なテーマの一つにゲージ理論/重力理論の双対性がある。特に、 $AdS_5 \times S^5$ 中の弦理論と $\mathcal{N} = 4 SU(N)$ 超対称ゲージ理論の対応は、AdS/CFT (共形場理論) 対応と呼ばれ、ゲージ理論の強結合領域の理解に向けた様々な応用もなされている。

近年、この対応の背後に可解構造があることが発見され、これを契機とした研究の進展により対応の全容が明らかになりつつある。佐藤は酒井 (慶應義塾大学) と共に、可解構造や関連する隠れた対称性に基づき、この対応およびその応用について研究した。

(6) Large N 行列量子力学における量子重力方程式の研究

松尾らは、Hanada-Kawai-Kimura によって提案された曲がった時空上の共変微分を行列で表現する方法を、行列量子力学に適用し、そこで得られるシュレーディンガー方程式から量子重力方程式を構成する手がかりを調べた。また、具体例として低次元のモデルを考察し、時空 (宇宙) の発展方程式を議論した (論文 48)。

(7) 高エネルギーストリング散乱とブラックホール生成の研究

松尾らは、弦の超高エネルギー散乱において終状態の角運動量を指定した完全非弾性散乱過程に着目し、回転弦の生成断面積を、摂動論的弦理論の枠組みで、閉じた形で求めた。とくに小さな衝突係数では断面積が幾何的にふるまい、弦/BH 対応原理の観点からみた (Kerr) BH 生成断面積と整合していること等、を議論した (論文 49)。

【3】 高エネルギーハドロン物理

(八田 佳孝、松尾俊寛)

(1) $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論における電子陽電子消滅の終状態の研究

パートン分布関数と破砕関数のスケール依存性を決める異常次元はある種の crossing symmetry によって関係していることが摂動論的 QCD において知られている。八田と松尾はこの関係式と AdS/CFT 対応を用いて強結合ヤンミルズ理論における時間的異常次元を導出し、電子陽電子消滅の終状態における粒子数のエネルギー依存性を決定した。さらに粒子のエネルギースペクトルの形に対して制限を与えた (論文 52)。続いて論文 53 においてこのエネルギー分布の関数形が指数関数的であることを示した。これはハドロン、原子核衝突において観測された粒子数分布、エネルギー分布とよく合っている。

(2) BK 方程式の因子化の破れ

高エネルギーハドロン中のグルオン数はラピディティとともに指数関数的に上昇し、いずれグルオン飽和効果によって抑えられる。この飽和現象は Balitsky-Kovchegov (BK) 方程式によってよく記述される。八田と Avsar は BK 方程式の非線形項に対して通常用いられる因子化近似が BFKL 発展からくるグルオン相関のために破れることを解析的、数値的に示した (論文 54)。

(3) 電子陽電子消滅と高エネルギー散乱の関係

電子陽電子消滅の終状態の 9 割は 2 つのジェットで特徴付けられる。八田は 2 つのジェットの間の領域における粒子数分布を調べ、これが高エネルギーハドロンの波動関数におけるグルオンの分布とある種の共形変換によって厳密に対応していることを発見した。さらにこの変換は QCD においても強結合超対称ヤンミルズ理論においても成り立つことが分かった (論文 55)。

<論文>

1. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, 2+1 flavor lattice QCD toward the physical point, Phys. Rev. D 79, No. 3 (2009) ref. 034503, pp.1-33
2. Yoshinobu Kuramashi for the PACS-CS Collaboration, PACS-CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point, Proceeding of Science (Lattice 2008) 018.
3. PACS-CS Collaboration: N. Ukita, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, 2+1 flavor lattice QCD simulation with $O(a)$ -improved Wilson quarks, PoS Lattice 2008 097.

4. PACS-CS Collaboration: D. Kadoh, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on meson and baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD, PoS Lattice 2008 092.
5. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, Charm quark system in 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS configurations, PoS Lattice 2008 121.
6. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, H. Ohno, and K. Kanaya, Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008) ref.104157, pp.1-5
7. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD, Phys. Rev. D 79, No.5 (2009) ref.051501(R), pp.1-5
8. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.174, pp.1-7
9. WHOT-QCD Collaboration: S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, N. Ukita, T. Umeda, Equation of state at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.189, pp.1-7
10. WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda, Magnetic and electric screening masses from Polyakov-loop correlations, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.194, pp.1-7
11. WHOT-QCD Collaboration: H. Ohno, T. Umeda, K. Kanaya, Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.203, pp.1-7
12. 大野浩史、梅田貴士、金谷和至 for WHOT-QCD Collaboration, 有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの解析, 素粒子論研究 116 No. 6 (2009) ref. 732, pp30-32.
13. H. Ohno, T. Umeda and K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36 (2009) ref. 064027.
14. T. Yoshie, Making use of the International Lattice Data Grid, Proceeding of Science (Lattice 2008) 019.

15. K. Sasaki and N. Ishizuka, I=2 Two-Pion Wave Function and Scattering Phase Shift, Phys. Rev. D78 :014511, 2008.
16. Y. Nakamura, S. Aoki, Y. Taniguchi and T. Yoshie [CP-PACS Collaboration], Precise determination of B_K and right quark masses in quenched domain-wall QCD, Phys. Rev. D **78**, 034502-1-29 (2008)
17. Y. Taniguchi [for PACS-CS collaboration], Non-perturbative renormalization of Nf=2+1 QCD with Schroedinger functional scheme, PoS **LATTICE** (2008) 229, 1-7
18. JLQCD Collaboration and TWQCD Collaboration: S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, T. Onogi, N. Yamada, Topological susceptibility in two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry, Physics Letters B 665 (2008) 294.
19. JLQCD Collaboration: H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, T. Onogi, N. Yamada, Lattice study of meson correlators in the epsilon-regime of two-flavor QCD, Physical Review D77 (2008) 074503.
20. S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, for the JLQCD Collaboration, B_K with two flavors of dynamical overlap fermions, Physical Review D77 (2008) 094503.
21. E. Shintani, S. Aoki and Y. Kuramashi, Full QCD calculation of neutron electric dipole moment with the external field method, Physical Review D78 (2008) 014503.
22. JLQCD Collaboration: S.Aoki, H.Fukaya, S.Hashimoto, K-I.Ishikawa, K.Kanaya, T.Kaneko, H.Matsufuru, M.Okamoto, M.Okawa, T.Onogi, A.Ukawa, N.Yamada, T.Yoshie, Two-flavor QCD simulation with exact chiral symmetry, Physical Review D78 (2008) 014508.
23. S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, The Nuclear Force from Monte Carlo Simulations of Lattice Quantum Chromodynamics, Comput. Sci. Disc. 1 (2008) 015009.
24. S. Aoki, J. Balog and P. Weisz, Bethe–Salpeter wave functions in integrable models, Progress of Theoretical Physics 121 (2009) 0812015.
25. J. Noaki, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, for the JLQCD, TWQCD Collaborations, Convergence of the chiral expansion in two-flavor lattice QCD, Physical Review Letters 101 (2008) 202004.
26. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon force from lattice QCD, Physics Letters B673 (2009) 136-141.

27. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, S-parameter and pseudo-Nambu-Goldstone boson mass from lattice QCD, *Physical Review Letters* 101 (2008) 242001.
28. S. Aoki, O. Bär, B. Biedermann, Pion scattering in Wilson ChPT, *Physical Review D* 78 (2008) 114501.
29. E. Shintani, S. Aoki, T. W. Chiu, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, for the JLQCD, TWQCD Collaboration, Lattice calculation of strong coupling constant from vacuum polarization functions, (arXiv:0807.0556[hep-lat])
30. Sinya Aoki, Oliver Bar, Benedikt Biedermann, Pion Scattering in Wilson Chiral Perturbation Theory, *PoS LAT2008* (2008) .
31. T.W. Chiu, S. Aoki, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD and TWQCD Collaborations), Topological susceptibility in (2+1)-flavor lattice QCD with overlap fermion, *PoS LAT2008* (2008) 072.
32. J.Noaki, S.Aoki, T.W.Chiu, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.H.Hsieh, T.Kaneko, H.Matsufuru, T.Onogi, E.Shintani, N.Yamada, Light meson spectrum with $N_f = 2 + 1$ dynamical overlap fermions, *PoS LAT2008* (2008).
33. T.Kaneko, S.Aoki, T.W.Chiu, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.H.Hsieh, H.Matsufuru, J.Noaki, T.Onogi, E.Shintani, N.Yamada (JLQCD, TWQCD collaborations), Pion vector and scalar form factors with dynamical overlap quarks, *PoS LAT2008* (2008) 158.
34. Sinya Aoki, Janos Balog, Tetsuo Hatsuda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Peter Weisz, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials *PoS LAT2008* (2008) 152.
35. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS-CS Collaboration, Lambda-nucleon force from lattice QCD, *PoS LAT2008* (2008) 156.
36. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS-CS Collaboration, Nuclear forces from quenched and $N_f = 2 + 1$ full QCD using the PACS-CS gauge configurations, *PoS LAT2008* (2008) 155.
37. T. Hatsuda, N. Ishii, S. Aoki, H. Nemura, From lattice QCD to nuclear force. *Mod.Phys.Lett.A*23:2265-2272,2008.
38. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD calculation of nuclear forces, *Mod.Phys.Lett.A*23:2281-2284,2008.

39. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential. *Mod.Phys.Lett.A*23:2285-2288,2008.
40. E. Bilgici, A. Flachi, E. Itou, M. Kurachi, C.-J D. Lin, H. Matsufuru, H. Ohki, T. Onogi, and T. Yamazaki, A new scheme for the running coupling constant in gauge theories using Wilson loops, *Phys. Rev. D*, submitted (arXiv:0902.3768[hep-lat])
41. T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H. W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. J. Tweedie, and J. M. Zanotti (RBC and UKQCD Collaborations), Nucleon form factors with 2+1 flavor dynamical domain-wall fermions, *Phys. Rev. D*, submitted (arXiv:0904.2039[hep-lat])
42. K.Murano, S.Aoki, Y.Taniguchi and S.Takeda, Universality of the Nf=2 Running Coupling, *Proceeding of Science (Lattice 2008)* 228.
43. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, D-brane States and Annulus Amplitudes in OSp Invariant Closed String Field Theory, *JHEP* **0807** (2008) 046
44. N. Ishibashi, Y. Baba and K. Murakami, D-branes and Closed String Field Theory, *Int. J. Mod. Phys. A* **23** (2008) 2220
45. K. Sakai and Y. Satoh, Entanglement through conformal interfaces, *JHEP* **0812** (2008) 001.
46. T. Saitou, AdS/QCD and Type 0 String Theory, arXiv:0807.1167
47. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone Gauge String Field Theory and Dimensional Regularization, *UTHEP-583*
48. Toshihiro Matsuo, Dan Tomino, Wen-Yu Wen and Syoji Zeze. Quantum gravity equation in large N Yang-Mills quantum mechanics. *JHEP* 0811:088, 2008. e-Print: arXiv:0807.1186 [hep-th].
49. Toshihiro Matsuo and Kin-ya Oda, Geometric cross sections of rotating strings and black holes. *Phys.Rev.D*79:26003, 2009. e-Print: arXiv:0808.3645 [hep-th].
50. Feng-Li Lin, Toshihiro Matsuo, Dan Tomino. Hagedorn strings in AdS(3). *Mod. Phys. Lett. A*23:1552-1564,2008
51. Toshihiro Matsuo. Hagedorn behavior of strings in AdS(3)/BTZ. *Int.J.Mod.Phys.A* Vol.23:2264-2266,2008.
52. Y. Hatta and T. Matsuo, Jet fragmentation and gauge/string duality, *Phys. Lett. B*670, No.2 (2008) pp.150-153

53. Y. Hatta and T. Matsuo, Thermal hadron spectrum in e^+e^- annihilation from gauge/string duality, Phys. Rev. Lett. 102, No.6 (2009) ref.062001, pp.1-4
54. E. Avsar and Y. Hatta, Quantitative study of the transverse correlation of soft gluons in high energy QCD, JHEP 0809 (2008) ref.102, pp.1-21
55. Y. Hatta, Relating e^+e^- annihilation to high energy scattering at weak and strong coupling, JHEP 0811 (2008) ref.057, pp.1-16
56. Y. Hatta, Small- x physics in QCD and in gauge/string duality, Prog. Theor. Phys. Suppl. No.174 (2008) pp.298-305

<著書・総説等>

1. 青木 慎也、2008 年度ノーベル物理学賞, 応用数理 77, No.12 (2008).
2. 青木慎也、特集：物理科学、この1年 「計算物理学の行方」、パリティ 24、No.1 (2009).

<学位論文>

[博士論文]

1. 齋藤卓
「Study of Higher Spin Gauge Theory using Matrix Models」

[修士論文]

1. 小川竜矢
「Marginal Deformation を用いた Open string Field Theory の一般的な解の構成とタキオン凝縮」

<集中講義>

1. 青木慎也 「基礎物理学特別講義 II」 (Field theories on the lattice) 千葉大学大学院理学研究科、2008 年 6 月 30 日ー7 月 2 日.
2. 青木慎也 「格子 QCD の進展」 京都大学基礎物理学研究所、2008 年 8 月 28 日ー29 日.
3. 八田佳孝、「Small- x physics in QCD and gauge/string duality」 京都大学基礎物理学研究所 2009 年 2 月 16 日ー17 日.

<研究成果発表（講演）>

[国際会議]

1. 藏増 嘉伸 「Current status toward the proton mass calculation」, Rencontres de Moriond, 招待講演 (La Thuile, Italy, Mar 14-21, 2009)
2. 藏増 嘉伸 「PACS-CS results for light quark physics in 2+1 flavor lattice QCD」, CCS Workshop on Perspectives on Light Quark Simulations through Machine, Algorithm and ILDG, (Tsukuba, Japan, Mar 10-12, 2009)
3. 藏増 嘉伸 「2+1 flavor lattice QCD simulations toward the physical point」, Workshop on Perspectives and challenges for full QCD lattice calculations, 招待講演 (Villazzano, Italy, May 5-9, 2008)
4. 滑川 裕介 「Charmonium in 2+1 flavor lattice QCD」, International Workshop on Heavy Quarkonia 2008 (Nara, Japan, Dec. 2-5, 2008)
5. 藏増 嘉伸 「PACS-CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, 招待講演 (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008)
6. 浮田 尚哉 「2+1 flavor lattice QCD simulation with $O(a)$ -improved Wilson quarks」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008)
7. 加堂 大輔 「SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on meson and baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008)
8. 滑川 裕介 「Charm quark system in 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS configurations」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008)
9. 梅田貴士 「Charmonium Wave Functions at Finite Temperature from Lattice QCD Calculations」, RIKEN BNL Research Center Workshop on "Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators" (BNL, Upton, USA, Apr.23-25, 2008)
10. 梅田貴士 「Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
11. 大野浩史 「Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)

12. 金谷和至 「Equation of state at finite Density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
13. 梅田貴士 「QCD Thermodynamics at fixed lattice scale」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008)
14. 金谷和至 「Lattice studies of QCD at finite temperature and finite density」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008)
15. 金谷和至 「Fixed scale approach to the equation of state on the lattice」, The 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) (Knoxville, TN, USA, Mar.30-Apr.4, 2009)
16. 大野浩史 「Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD」 (招待講演), International Conference on Strangeness in Quark Matter 2008 (Beijing, China, October 6-10, 2008)
17. 吉江 友照 「Updates to the QCDml and sharing quark propagators」, The 12th International Lattice Data Grid Workshop (TV workshop hosted by EPCC, Edinburgh, UK, May 23, 2008)
18. 吉江 友照 「Making use of the International Lattice Data Grid」 (plenary), The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
19. 谷口 裕介 「Non-perturbative renormalization of $N_f=2+1$ QCD with Schroedinger functional scheme」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2008), (College of William and Mary, Williamsburg, Virginia, USA)
20. 青木 慎也 「Strategy of fixed topology QCD」 (招待講演), “Perspectives and challenges for full QCD lattice calculations”, (European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas(ECT*), Trento, Italy, May 5-9, 2008)
21. 青木 慎也 「Energy dependence of nucleon-nucleon potentials」, “The XXVIth International Symposium on Lattice Field Theory”, (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
22. 青木 慎也 「Lattice QCD」 (基調講演), “The International Conference on Particle and Nuclei (PANIC08)”, (Eilat, Israel, November 9-14, 2008)

23. 青木 慎也 「Neutron EDM, muon g-2, E&M effect」 (招待講演), “Scientific Challenges for Understanding the Quantum Universe and the Role of Computing at Extreme Scale” (Menlo Park, CA,USA, December 9-11,2008)
24. 青木 慎也 「Some Topics on Chiral Perturbation Theories in Lattice QCD」 (招待講演), “International Workshop on Frontier Problems in Strong Interaction Physics”, (Poornaprajna Institute of Scientific Research,Bidalur, Bangalore, India, January 12-17, 2009)
25. 青木 慎也 Panel discussion 「Fundamental challenge of QCD」 , 47. Internationale Universitätswochen für Theoretical Physik Schladming, Stria, Austria, 28 February - 7 March, 2009.
26. 石井 理修 「Nuclear from quenched and $N_f=2+1$ full lattice QCD using the PACS-CS gauge configurations」 , The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, LATTICE2008 (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
27. 石井 理修 「Nuclear forces from lattice QCD」 (keynote talk), Korean Physical Society Meeting, (Gwangju, South Korea, Oct. 23-24, 2008)
28. 石井 理修 「Lattice QCD calculation of the nuclear force」 , The 3rd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Joint Institute for Heavy Ion Research, (Oak ridge National Laboratory, Feb. 23-25, 2009)
29. 山崎 剛 「Non-perturbative determination of running coupling constant with twisted Polyakov loop」 16th YKIS Conference, Progress in Particles Physics 2008 (Kyoto, Japan, Feb. 16-19, 2009)
30. 滑川 裕介 「Thermodynamics of $N_f = 2$ QCD on anisotropic lattices」 The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007)
31. 村野啓子 「Universality of the $N_f=2$ Running Coupling」 The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July.14-19,2008)
32. 上田悟 「Wilson Chiral Perturbation Theory for twisted mass QCD at NLO」 The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, 2008 July 14-19)
33. 八田佳孝 「High energy scattering in AdS」 Third Asian triangle heavy-ion conference 招待講演 (Tsukuba, Japan, Oct.13-15, 2008)
34. 八田佳孝 「DIS and e^+e^- annihilation at strong coupling」 ECT* workshop 「Structure of hadrons and nuclei at an electron-ion collider」 招待講演 (Trento, Italy, July 13-18, 2008)

35. 八田佳孝「Jet fragmentation and gauge/string duality」Low-x meeting (Crete, Greece, July 6-10, 2008)

[国内学会、研究会]

1. 藏増 嘉伸「PACS-CS および T2K オープンスパコン ～格子 QCD からの視点～」, 第八回 PC クラスタシンポジウム、招待講演 (秋葉原コンベンションホール、秋葉原、2008 年 12 月 11-12 日)
2. 藏増 嘉伸「格子 QCD の今後に向けて」, 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2008、招待講演 (丸の内 MY PLAZA ホールおよび MY PLAZA 会議室、千代田区、2008 年 9 月 16-17 日)
3. 藏増 嘉伸「T2K アプリケーション (格子 QCD)」, T2K シンポジウム 2008、招待講演 (筑波大学計算科学研究センター、つくば市、2008 年 4 月 24-25 日)
4. 浮田 尚哉「現実的なクォーク質量での $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD 計算」, 日本物理学会年会 (山形大学、山形、2008 年 9 月 20-23 日)
5. 浮田 尚哉「PACS-CS の取り組み」, ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会 (KKR ホテル熱海、熱海、2009 年 2 月 27-28 日)
6. 滑川 裕介「Charm quark system in 2+1 flavor lattice QCD」, 日本物理学会年会 (山形大学、2008 年 9 月 20-23 日)
7. 大野浩史「有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの研究」, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、京都、2008 年 9 月 3 日-5 日)
8. 大野浩史「有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの解析」, 日本物理学会秋季大会 (山形大学、山形, Sept. 20-23, 2008)
9. 梅田貴士「Thermodynamics at fixed lattice spacing」, 日本物理学会秋季大会 (山形大学、山形, Sept. 20-23, 2008)
10. 谷口裕介「 $N_f=2+1$ 格子 QCD における非摂動的な繰り込み」日本物理学会 2008 年秋季大会 (山形大学)
11. 青木 慎也パネルディスカッション「シミュレーションによる素粒子・原子核・宇宙物理の新展開」コーディネータ、計算基礎科学シンポジウム「シミュレーションでせまる宇宙の成り立ち～素粒子・原子核・宇宙物理の展望」(東京ステーションコンファレンス、東京、2008 年 6 月 16 日)

12. 青木慎也 分科会E 素粒子・原子核・天文学宇宙「次世代スパコンで物質と宇宙の進化を探る」モデレーターおよびパネルディスカッション「計算基礎科学における人材育成の現状と課題」コーディネーター および 全体討議「次世を担う世界水準の人材育成に向けて」次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2008 一次代を担う世界水準の人材育成に向けてー (MY PLAZA、東京、2008年9月16、17日)
13. 青木慎也 「本領域の基本方針」、ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」(筑波大学計算科学研究センター、2008年12月1日ー2日)
14. 青木 慎也 「計算基礎科学連携拠点」、シンポジウム「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」(つくば国際会議場 中ホール 300、2009年2月23日)
15. 石井 理修 「格子QCDによる核力」、基研研究会「原子核の分子的構造と低エネルギー核反応ー束縛系から散乱系へ閾値を越えてー」(京都大学基礎物理学研究所、2008年7月2日~4日)
16. 石井 理修 「Multi-Quarks and Nuclear Force in Lattice QCD」(招待講演), RCNP Workshop 「Challenge to New Exotic Hadrons」(RCNP, Osaka, Japan, July 30-31, 2008)
17. 石井 理修 「格子QCDからみたJ-PARC」(招待講演), KEK 研究会「J-PARCの物理：ハドロン・原子核研究の新しい局面」(KEK, 2008年8月7日~9日)
18. 石井 理修 「格子QCDとJ-PARCー核力プロジェクトの近未来の拡張形(私見)ー」(パネルディスカッション), RIKEN 研究会「J-PARCでのハドロン物理を考える研究会」(理化学研究所、2008年9月1~2日)
19. 石井 理修 「格子QCDによる核力(III)ークエンチQCDによるテンソル力とPACS-CS ゲージ配位を使ったフルQCDによる核力」, 日本物理学会 2008年 秋季大会(山形大学、2008年9月20~23日)
20. 石井 理修 「格子QCDからハドロン相互作用へ」、ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」(筑波大学計算科学研究センター、2008年12月1~2日)
21. 石井 理修 「Nuclear force from 2+1 flavor lattice QCD using PACS-CS gauge configurations」, 日本物理学会 第64回年次大会(立教大学、2009年3月27~30日)
22. 山崎 剛 「格子上での散乱・共鳴・束縛状態」「ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会招待講演 (KKRホテル熱海、熱海、2009年2月27ー28日)
23. 山崎 剛 「Two-particle wave function with lattice scalar QED」日本物理学会年 会(立教大学、東京、2009年3月27ー30日)

24. 村野啓子「Universality study of Step Scaling Function in QCD with two dynamical quarks」日本物理学会年会 (近畿大学、大阪、2008年3月22-26日)
25. 村野啓子「格子 QCD から計算された核力ポテンシャルのエネルギー依存性」日本物理学会 秋季大会 (山形大学、山形、2008年9月20-23日)
26. 村野啓子「格子 QCD から計算された核力ポテンシャルのエネルギー依存性 (2)」日本物理学会年会 (立教大学、東京、2009年3月27-30日)
27. 八田佳孝「高エネルギー散乱でのグルオンの横平面における相関」日本物理学会秋季大会 (山形大、山形、2008年9月20日～23日)
28. 松尾俊寛「Jet fragmentation and gauge/string duality」日本物理学会秋季大会 (山形大、山形、2008年9月20日～23日)
29. 八田佳孝「Relating e+e- annihilation to high energy scattering at weak and strong coupling」核子構造の新展開 2009 (KEK、つくば、2009年1月10日)

<受賞>

1. 青木慎也「格子 QCD の相構造の解明とクォークと核力の研究」第 25 回 井上 学術賞 (2009年2月)
2. 八田佳孝 日本物理学会若手奨励賞 (理論核物理分野)

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 「CCS Workshop on Perspectives on Light Quark Simulations through Machine, Algorithm and ILDG」、筑波大学計算科学研究センター、つくば市、2009年3月10ー12日、参加国数：5ヶ国、参加者数：36人主催者：吉江友照、藏増嘉伸

〈国内外の共同組織への参加、および顕著な学会の委員活動〉

1. 佐藤 勇二 日本物理学会会誌編集委員

II . 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
講師	原 和彦, 丸山 和純, 武内 勇司
研究科特別研究員	倉田 正和
科研費研究員	三宅 秀樹, 永野間 淳二, 戸村 友宣
大学院生	18 名
研究生	1 名
学群 4 年次生	2 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 はまもなく稼働, 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, 欧州の研究機関・大学からなる計 14ヶ国の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 $\mathcal{L} = 3.6 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されており (2008 年 12 月記録更新), 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} 程度, 全積分ルミノシティは 6.5 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 5.3 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

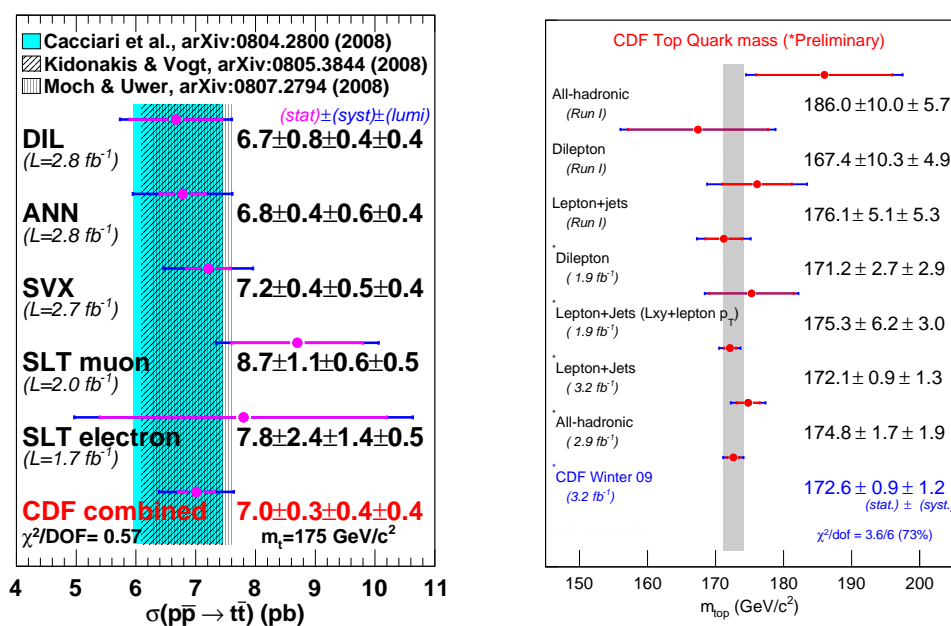


図 1: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積 (左) および質量 (右) の測定一覧 .

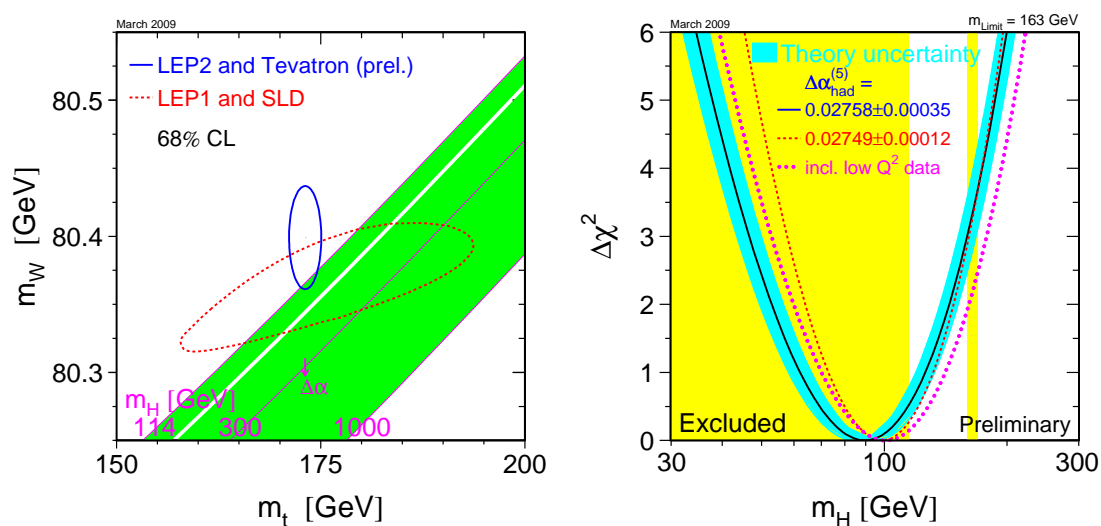


図 2: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定と, 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限 .

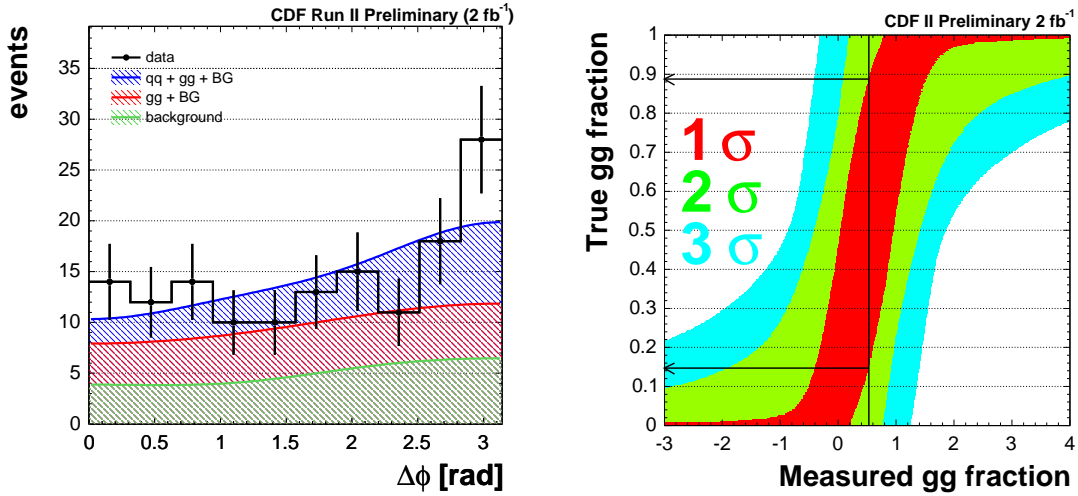


図 3: 左: $t\bar{t}$ 対生成における荷電レプトンの方位角の相関．右: 測定された gg 素過程の割合と真の値に対する制限．

トロンでのトップクォーク生成は、クォーク・反クォーク衝突を素過程とする対生成が主である．その生成断面積は多くの終状態を用いて測定されている（図 1 左）．すべてのチャンネルを総合すると、 2.8 fb^{-1} 相当のデータを用いて $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.0 \pm 0.3 \pm 0.4 \pm 0.4 \text{ pb}$ という結果を得た．これは、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（図 1 右）．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 $173.1 \pm 0.6 \pm 1.1 \text{ GeV}/c^2$ 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．図 2 にこれを示す．ヒッグス粒子の質量について $M_{\text{Higgs}} = 90_{-27}^{+36} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $M_{\text{Higgs}} < 163 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た．

その他、現在進行中の解析に、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とスピン偏極度相関の測定がある．トップクォーク対生成の素過程は、クォーク・反クォークを始状態とするものとグルオン・グルオンを始状態とするものがある．陽子のパートン分布関数から、テバトロンでの重心系エネルギー 1.96 TeV では、前者が 85%、後者が 15%との予言がなされる．この二つの素過程は、始状態粒子のスピンが異なるため、閾値近くの生成では $t\bar{t}$ 系の角運動量はそれぞれ $|1, \pm 1\rangle$ と $|0, 0\rangle$ となる．したがって、 t および \bar{t} も異なった角運動量状態にある．トップクォークは寿命が極めて短いため、ハドロン化前に崩壊し、そのスピン情報が失われることなく崩壊物 W および b に伝播される．よって、崩壊物 W および b を測定すると親粒子 t のスピン情報を得ることが可能である．特に、 W ボソンの崩壊で生じた荷電レプトン ℓ の方向はトップクォークのスピン方向と強い相関を持つ．実験的には、 $t\bar{t}$ 対の dilepton チャンネルを用いてレプトンの飛翔方向のビーム軸周りの方位角 ϕ の相関を観測するのが容易である．図 3 に二つの素過程の方位角相関分布および観測された分布を示す．Feldman-Cousins 法を用いて gg 素過程の割合を $f_{gg} = 0.53_{-0.37}^{+0.35}{}_{-0.08}^{+0.07}$ と決定した．これは予言値 0.15 と矛盾しない．また、 $t\bar{t}$ 間のスピン相関を直接に測定する解析が進行中である．

テバトロンでのトップクォークの生成は、前述の通り強い相互作用の素過程による $t\bar{t}$ 対生成が主である．これに加えて、電弱相互作用を素過程とするトップクォーク t と反ボトム

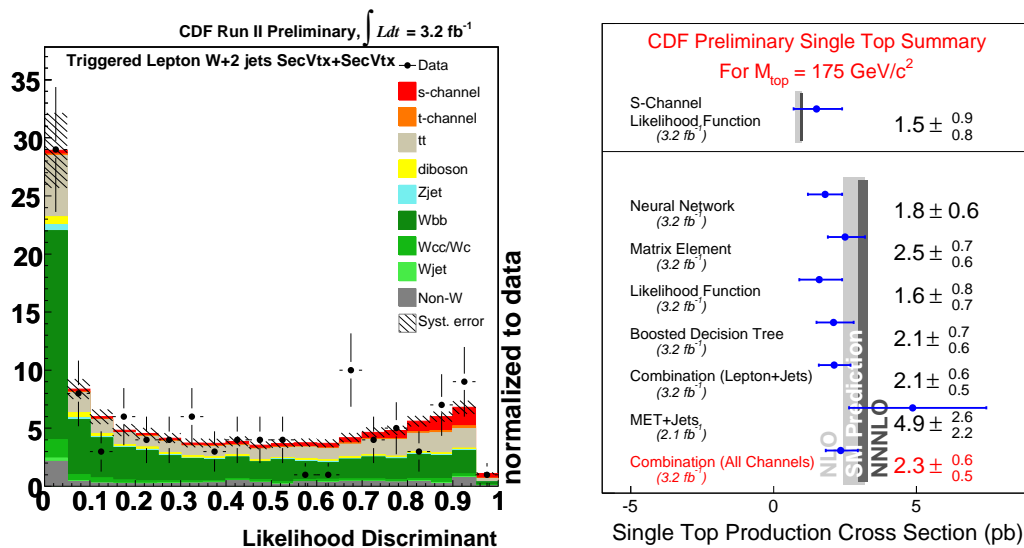


図 4: トップクォーク単一生成の観測。左: s -channel 過程探索における尤度分布。右: 生成断面積の一覧 (他チャンネルの解析も含む)。

クォーク \bar{b} 対の生成が可能である。これをトップクォークの単一生成と呼ぶ。この素過程は W - t - b 結合を含むため、その生成断面積は小林・益川行列の要素 $|V_{tb}|^2$ に比例する。トップクォークの関係する要素に対して $|V_{tb}| \gg |V_{ts}|, |V_{td}|$ であるため、 $|V_{tb}|$ をトップクォークの崩壊分岐比から測定するのは困難であり、単一生成断面積から求めるのが唯一の現実的な方法である。また、クォーク世代数を仮定しない決定が可能であり、第 4 世代クォークや荷電ヒッグス粒子の寄与などの標準理論を超える物理に対する感度を持つ。当グループでは、中間状態に W ボソンが時間方向に交換される素過程 (s -channel 過程) に特化した解析を行った。トップクォークは $t \rightarrow W^+b$ と崩壊するので、終状態は $W^+b\bar{b}$ となる。 W ボソンはレプトン-ニュートリノ対への崩壊を用いて観測した。終状態粒子の運動学的変数および b クォークジェットの識別のための人工ニューラルネットワーク出力を用いて尤度を構築し、背景事象との分離を図った。尤度分布を図 4 に示す。尤度の高い事象が予測される背景事象を超えて観測され、 s -channel 素過程によるトップクォーク単一生成断面積を $\sigma = 1.5^{+0.9}_{-0.7} \text{ pb}$ と決定した。また、行列要素に対して、 $|V_{tb}| = 1.32^{+0.27}_{-0.26}$ および $|V_{tb}| > 0.54$ (95% CL) を得た。もうひとつの素過程 (t -channel) の解析と総合して、両過程の生成断面積 $\sigma = 2.3^{+0.6}_{-0.5} \text{ pb}$ を得た。背景事象の揺らぎで説明される確率は 3.1×10^{-7} であり、信号の有意度は正規分布の 5.0σ に対応する。これによりトップクォークの単一生成が観測された。行列要素については、 $|V_{tb}| = 0.91 \pm 0.11 \pm 0.07$ および $|V_{tb}| > 0.71$ (95% CL) の制限を与えた。

(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

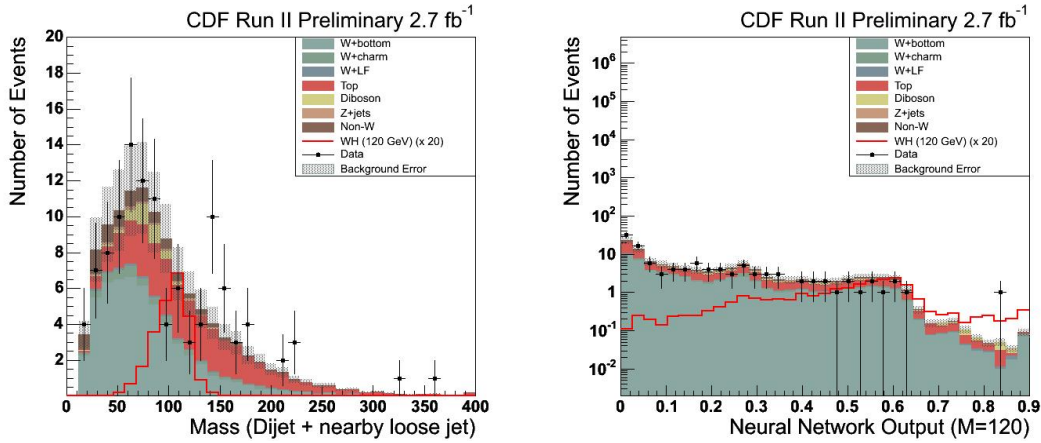


図 5: $\bar{p}p \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索．左：二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布．右：人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離．

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．

B_s^0 中間子の研究は，電子陽電子衝突による B ファクトリー実験では実行が難しく，CDF 実験での特徴となる．中性流による稀崩壊 $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ の探索， $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ 崩壊の観測および角分布の前後方非対称度の測定などの研究が進められている．

(3) 新粒子の探索

ヒッグス粒子の探索が種々の過程を用いてなされた．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 5（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 5（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

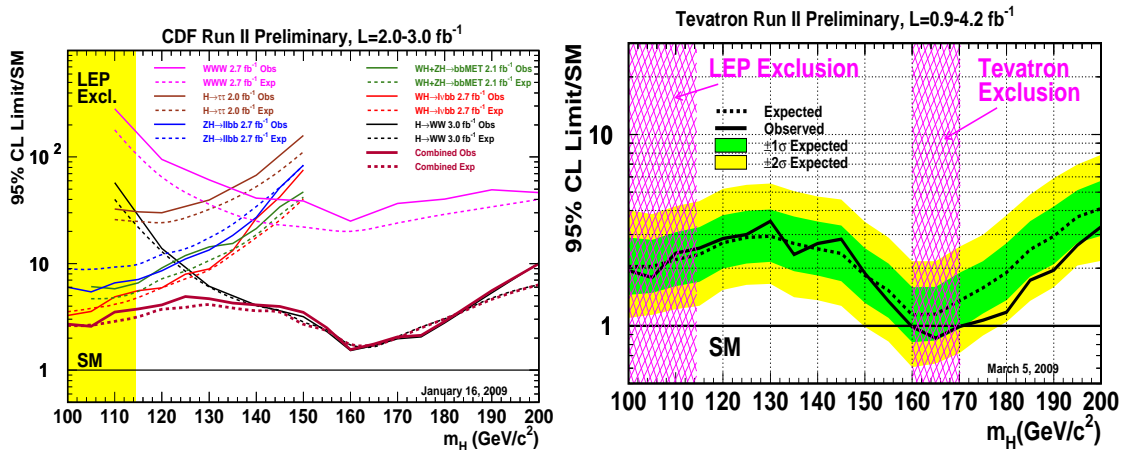


図 6: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限（観測値）の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．左：CDF 実験の結果，右：CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの．

6 (左) にこれらの上限値を標準理論による予言値で規格化したものを示す．低質量領域では実験値は予言値の数倍であり，質量 160 GeV/c² 近辺では 2 倍以下である．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 $160 < M_{\text{Higgs}} < 170$ GeV/c² の範囲では実験の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存在しないことが初めて示された．

以上は 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ものであるが，CDF 実験は，LHC 加速器が本格稼働し物理の結果を生みだし始める 2011 年頃までは，エネルギー最先端の実験であり続ける．CDF Run II 実験は，米国 2010 年度の運転が決定し，2011 年度も継続の可能性が検討されている．2010 年末には $8-9$ 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，穂湯准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陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) は，すべての加速器用電磁石の据え付け調整が終了し，2008 年 9 月 10 日に陽子ビームを周回させるイベントを成功させ，公式に LHC の完成を宣言した．前段加速器である SPS からの 450 GeV の陽子ビームを時計方向と反時計方向の両方向に安定に周回させることで，新しく設置した LHC 加速器システムの総合能力を実証できた．ATLAS 検出器は，直ちに，ビームを上流のダンプに衝突させることで発生するミュオン粒子等を実際に検出した．

予定していた 450 GeV の陽子ビームの衝突は，9 月 19 日に発生した大量のヘリウム漏れのために中止した．LHC では 8 分割したセクター毎に超伝導冷却の調整を行っている．ヘリウム漏れしたセクターは 4 TeV の加速エネルギー相当の温度までしか事前試験されていなかった．今回，5.2 TeV まで冷却した際に，超伝導電磁石間をつなぐバスバーの抵抗のた

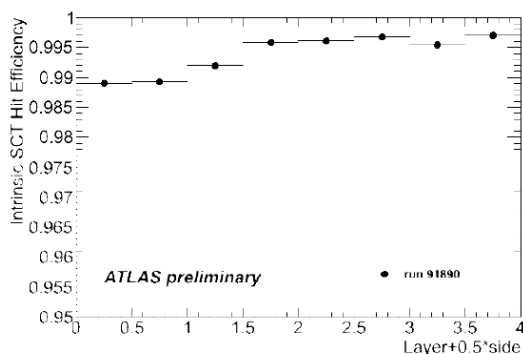


図 7: バレル部 SCT の 8 各面での飛跡検出効率.

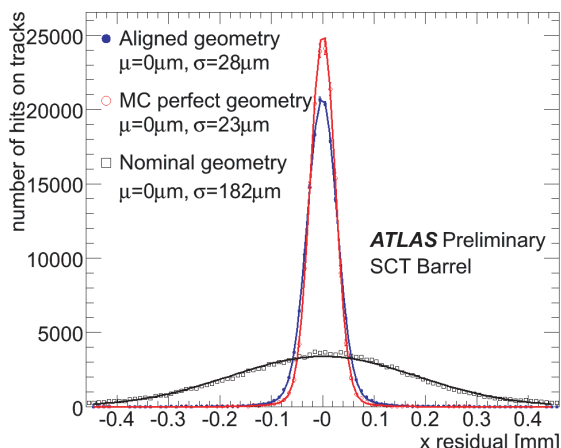


図 8: バレル部 SCT の各モジュール位置合せの結果.

めに電源がトリップし、その際に電気アークが発生しヘリウム容器内の圧力が上昇し真空隔壁が破壊された。バスバーの不良な接合 ($0.5 \text{ n}\Omega$ 以下が要求値) が原因であり、抵抗測定精度の改善、圧力上昇を抑制する安全弁の増設により同様な事故を防ぐ対処を行う。事故セクターは現在は復旧し、2009 年 10 月からの 10 TeV での衝突実験のための調整を再開している。

筑波大学のグループは、半導体を用いた中央部飛跡検出器 (SCT) の建設を担当してきた。SCT の運転調整を分担し、物理解析の準備を進めた。また、ビーム輝度を LHC 設計値の 10 倍にする SuperLHC 実験が検討されているが、そのような高放射線環境でも稼動する新しいシリコン検出器の開発と、SOI ピクセル検出器の開発を継続した。

(1) LHC での物理解析の準備

衝突実験初期のデータから、 W/Z 粒子やトップクォークの観測が可能であり、生成断面積などの物理結果が期待できるが、同時にこれらは検出器の調整に重要な事象でもある。

Z 粒子からの μ 粒子は、内部飛跡検出器とミュオン粒子検出器での運動量測定の直接比較に利用できる。後述の宇宙線飛跡の解析やシミュレーションにより、 Z 粒子の質量分解能の評価を行っている。

検出器の質量分布は、電子のエネルギー測定に直接影響するため、衝突データを用いて詳細に評価したい。シミュレーション事象で $\gamma \rightarrow e^+e^-$ を捉えることで、検出器の質量分布を評価する方法を検討している。

トップクォークからの W 粒子がジェットに崩壊する事象は、ジェットのエネルギー較正に用いることができる。そのバックグラウンドになる $W + \text{ジェット}$ 事象を新しいモンテカルロジェネレータで発生させ従来の方法と比較している。

(2) シリコン飛跡検出器 (SCT)

SCT 飛跡検出器は、2007 年 2 月に地下の ATLAS 検出器本体に組み込まれた。配線作業や冷却システムの調整を経て、2008 年 2 月に宇宙線の飛跡を初めて観測した。LHC 初ビーム事象の観測とともに、多くの宇宙線事象を収集し検出器の調整をすすめている。

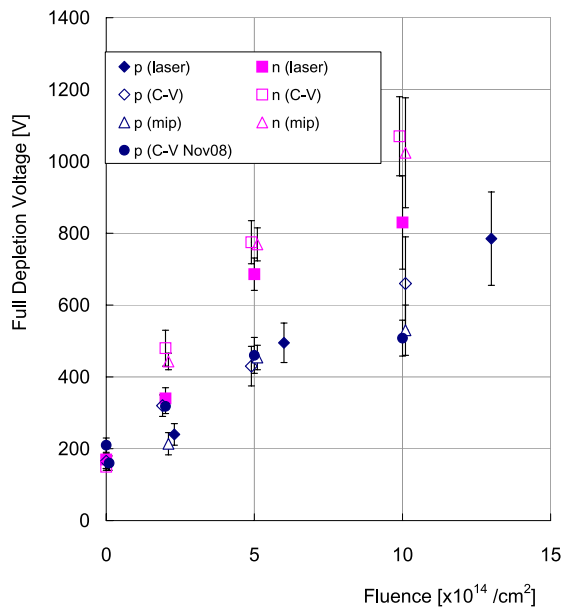


図 9: 全空乏化電圧の放射線量依存性 .

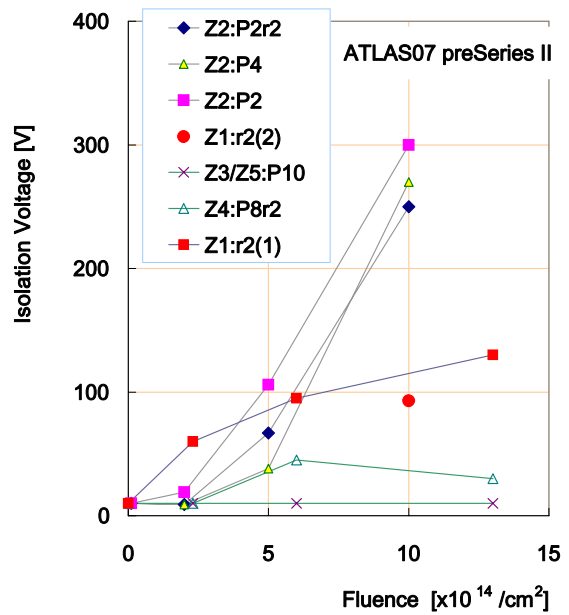


図 10: 電極間信号分離電圧の放射線量依存性 .

宇宙線ランでは、2 T のソレノイド磁場を加えた場合、加えない場合についてデータを集め、各々で約 100 万 SCTトラックを再構成できた。これらのデータを用いて、信号読み出しのタイミング調整、検出器の位置調整、検出効率評価、磁場のキャリア移動への影響 (Lorentz 効果) の評価などを行った。図 7 はバレル部 4 層計 8 面の検出効率を面毎に示している。センサー面に 40 度以内の角度で入射する飛跡に対して対応する信号が得られる割合は、ほぼ 99% 以上である。図 8 はバレル部のモジュールの位置合せの精度を示している。運動エネルギーの高い (2 GeV 以上) 宇宙線飛跡を基準とし、それからのヒット位置のずれを示している。測定で求めた位置に基づく位置分解能 $182 \mu\text{m}$ は、モジュール位置調整の結果 $28 \mu\text{m}$ に改善された。検出器が完全に位置合せできた場合の予想値は $23 \mu\text{m}$ であり、各モジュールは $16 \mu\text{m}$ の精度で位置調整できたことに対応する。

宇宙線が通過するのは SCT 検出器の一部であるので、実際の衝突ランでは全体に対して同様の調整を行う必要がある。宇宙線での実績から、調整方法の正当性および SCT 性能がほぼ設計値に近いことを実証できた。

(3) 放射線耐性に優れたシリコンセンサーの開発

LHC の設計最大輝度は $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。継続して物理の測定精度を向上させるために、2016 年までに新入射器の建設をし、輝度を一桁上げる SuperLHC 実験が計画されている。

現 SCT は、LHC 実験で 10 年分に相当する $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ の放射線耐性がある。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、全空乏化に要する電圧は次第に増大する。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。

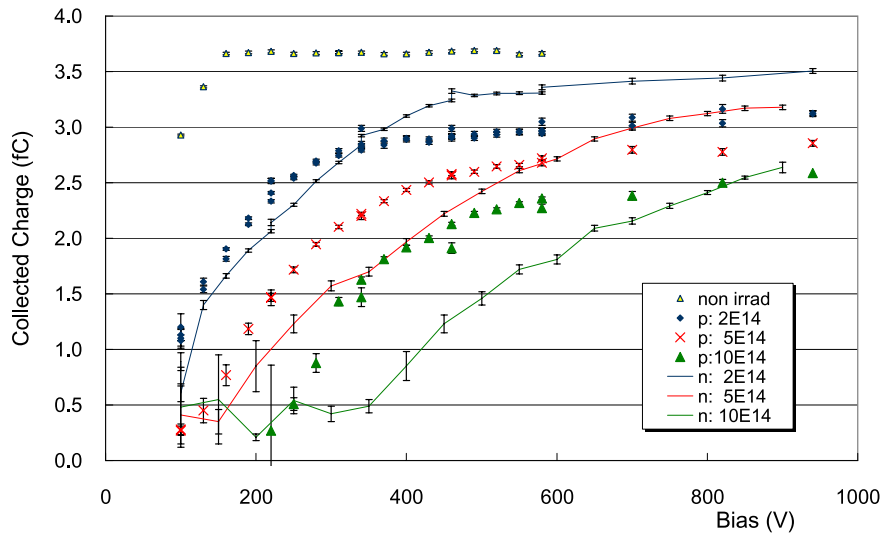


図 11: 収集電荷量のバイアス電圧依存性 .

SuperLHC 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 . 昨年度までに, FZ 法による高抵抗の p 型シリコンを候補に決定し, 電極分離の構造を様々に変えたセンサーを試作した . 陽子線, 中性子, Co ガンマ線を実際に照射し, 性能評価を行った .

図 9 は, 全空乏化電圧の照射量依存性を示す . センサー容量 (C-V) 測定, 赤外レーザーや β 線を用いた収集電荷量の測定の 3 方法で評価し, 互いに矛盾しない結果を得た . 系統的に中性子照射による変化が陽子照射よりも大きな結果が得られた . LHC では中性子と陽子による放射線量がほぼ等量である .

図 10 は電極分離に必要なバイアス電圧の放射線量依存性である . いずれもシステム耐圧の 500 V や全空乏化電圧よりも低いので, センサーとして充分使用可能である . Co 照射しながら測定した結果とも比較を行うことで, 最も適した電極分離方法を決定する必要がある .

図 11 は Sr β 線を用いた電荷収集量の測定値である . 未照射および 3 段階の照射量について, 陽子と中性子の場合で結果を比べている . 照射によりキャリアが捕獲され特に低バイアスで電荷収集量が減少するが, 中性子による減少量は少ないことが分かった .

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

Silicon-On-Insulator (SOI) は, エレクトロニクスを酸化膜上の薄いシリコン層に形成し, 高速動作などで優れた特性を示す . 酸化膜下のシリコン基板を高抵抗にすることで粒子検出部として, 読み出し回路一体型ピクセルセンサーの開発を行っている . 沖セミコンダクター社の $0.15 - 0.20 \mu\text{m}$ SOI プロセスを用いて, 32×32 および 128×128 ピクセルセンサーを KEK の先端検出器開発室と共同で試作した . 可視光や X 線に対する応答性能は良好であるが, センサーバイアスを印加するとエレクトロニクス部の動作領域が変わり (バックゲート効果) 読み出しができなくなる . センサー自体は暗電流発生を抑える電極形状の設計変更を

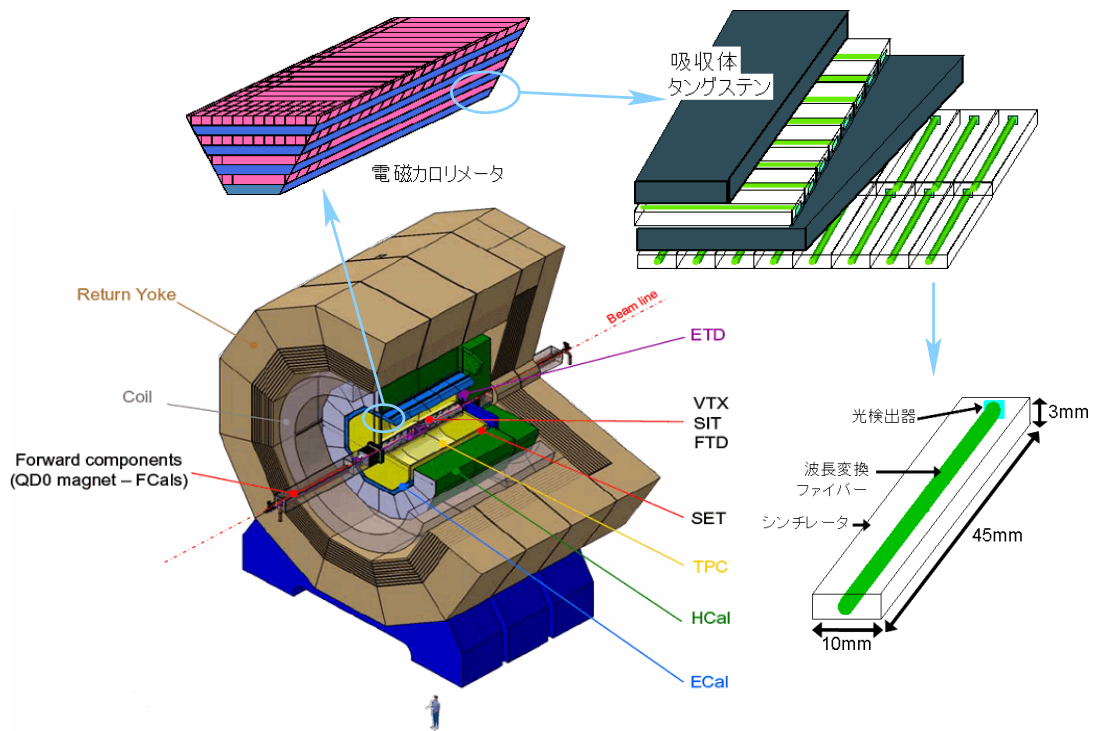


図 12: ILC(ILD) 検出器の構造, および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの. カロリメータは, 吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており, シンチレータ層は, ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている. またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ, 光検出器によって読み出される.

経てバイアスを 130 V まで印加できるものができたが, 荷電粒子の測定には, バックゲート効果の抑制と基板の薄化の両面の取り組みが必要である.

$\text{Co}\gamma$ や陽子線を照射することで, 検出器性能の放射線損傷を詳細に測定し, 国際学会で報告した. 放射線損傷は, トランジスタ閾値の変化に現れるが, TCAD シミュレーションにより, 電荷蓄積と閾値変化を定量的に理解する取り組みを開始した.

【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, 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 実験において使用される検出器 (図 12 左) のうち, 電磁カロリメータの研究開発を行なっている. 現在計画されている ILC カロリメータでは, シンチレータとタンゲステン板を積層構造にし

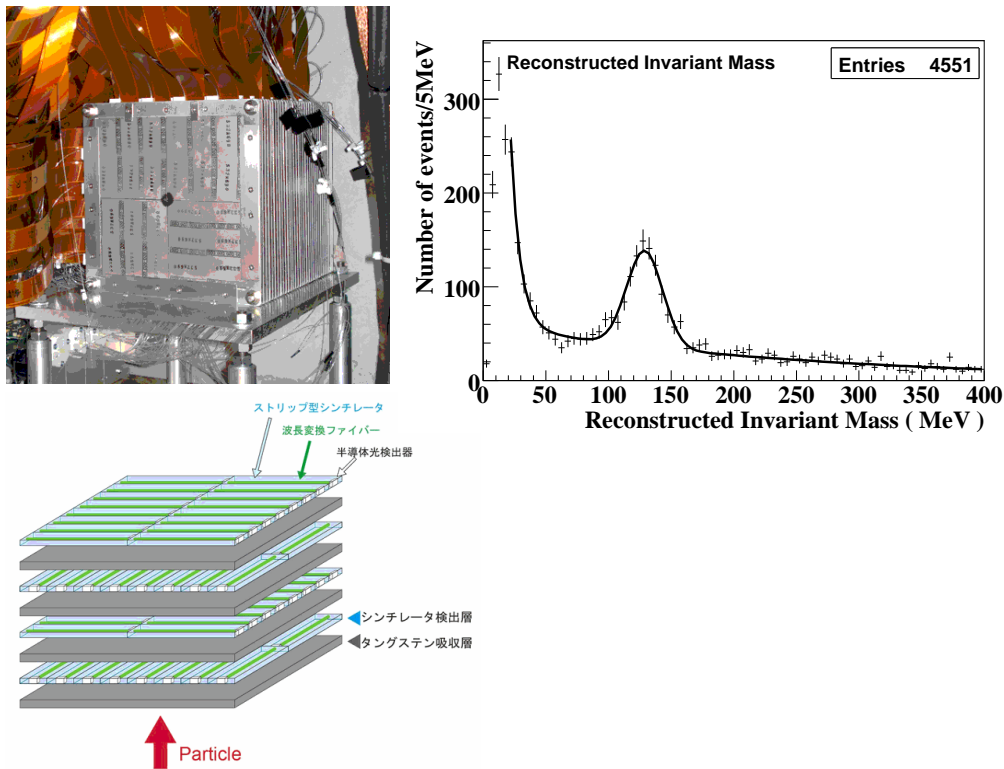


図 13: MPPC を用いた細分割電磁カロリメータの試作機の写真 (左上), 試作機の構造の模式図 (左下), および, 本試作機を用いビームテストにおいて実際に再構成された $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象候補の $M_{\gamma\gamma}$ 分布 (右) .

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ギーを精密に測定することが非常に重要であり, そのために ILC 実験では, ジェットに対するエネギー測定精度をより向上させるため, Particle Flow Algorithm と呼ばれるジェット再構成/エネギー測定方法が提唱されている . この方法では, ジェット中の粒子をカロリメータ中で一つ一つ区別し, 中性粒子についてはカロリメータでエネギーを測定し, 荷電粒子の運動量については, より優れた分解能を持つ飛跡検出器で測定することにより, ジェットに対するエネギー分解能の向上を図るものである . このような方法を用いるには, カロリメータは単一の入射粒子に対する優れたエネギー分解能に加え, 非常に細かいセルに分割された構造を有することが要求される . 我々は, このような細分割を実現するために, 図 12 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、ストリップ構造を持ったカロリメータのテストモジュールを作成し、電子、パイ中間子等のビームによって得られたデータの解析、およびシミュレーションを用いたカロリメータのセル(分割)サイズの最適化、その際の性能等の評価などを行ってきた。

また浜松ホトニクス、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目指して 1600 ピクセルの 1 mm× 1 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、信号頻度依存性の測定などの研究開発を行ってきた。

昨年度(2008 年度)においては、主にカロリメータの光信号読み出しのための、MPPC の研究開発と並行して、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、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た。

図 13 は、MPPC を用いた細分割電磁カロリメータの試作機の写真、構造、および、本試作機を用いビームテストにおいて得られた $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象候補の $M_{\gamma\gamma}$ 分布を示している。

分布のピークは、 π^0 から来たものであり、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 事象において、従来のカロリメータの分割度では不可能であった二つの光子が作る電磁シャワーの分離が、本試作機において可能であることを示している。

今後、長期安定性、多数のサンプルにおける個体差の測定など、引き続き MPPC の基礎研究を進めつつ、新たな試作機による実証試験等も計画している。

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

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

本開発研究では、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) の開発を目指したものである。

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的としている。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^{36} 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高い端として急に落ちるスペクトルの分布として観測される。

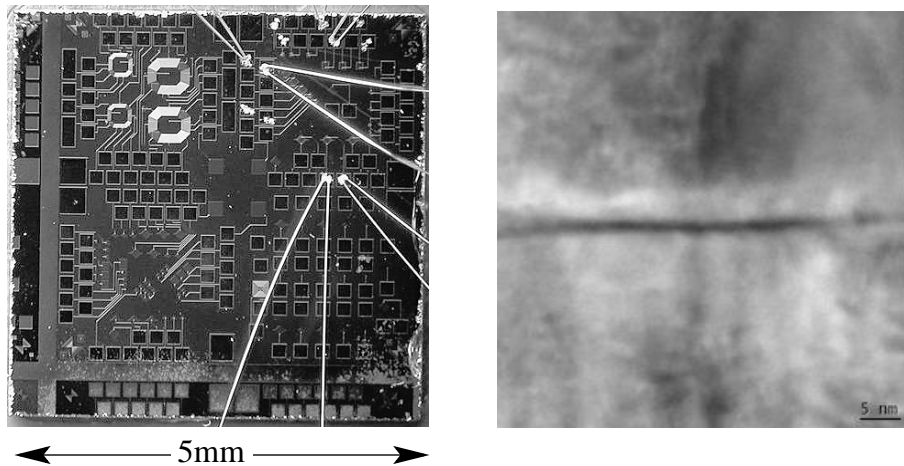


図 14: 試作した Hf-STJ のチップ (左), および透過型電子顕微鏡 (TEM) による Hf 膜の断面図 (右) . 5mm×5mm のサイズの基板の上に様々なサイズ・形状の Hf-HfO_x-Hf 膜が成膜・加工されている . 断面図では, およそ 2nm 程度の酸化膜が形成されていることが分かる .

我々は, これまでに, 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い, 検出器に要求される性能は, 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わかった .

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されれば, Hf 膜のパターン加工例としては, 世界初である .

図 14 は, 試作した Hf-STJ のチップ, および透過型電子顕微鏡 (TEM) によって観察された成膜された Hf-HfO_x-Hf の酸化膜付近の断面の様子である . およそ 2nm 程度の酸化膜が形成されていることが分かる .

2009 年度は, 試作した, Hf-STJ の低温における測定を行う . 測定には, 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測定準備を進めている . 更に, ファイバーを用いて実際に赤外線を試料に当て応答を見るところも目標としている .

今後は, Hf-STJ 製作に向けた技術的問題は, ほぼクリアしたので, 今後 3 年あまりの期間に 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を開発する . また, 超伝導体検出器技術をさらに発展させて, 遠赤外線領域で一光子ごとに数% の分解能でエネルギーを測定できる検出器の実現を目指す . この検出器はニュートリノ崩壊探索, 宇宙赤外線背景放射の観測などの素粒子実験, 宇宙観測のみならずさまざまな分野における実用にも供する .

【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: 受川 史彦)
校費: 60,000 千円, 旅費: 14,000 千円
2. 科学研究費補助金「陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理」
共同研究 (研究代表者: 金 信弘) 特定領域研究 35,800 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) 1,900 千円
4. 科学研究費補助金「スピン偏極度相関を用いたトップクォーク対生成機構の解明」
武内 勇司: 若手研究 (B) 1,200 千円
5. 科学研究費補助金「CDF 実験におけるベクトルボソン融合事象に関する研究」
丸山 和純: 若手研究 (B) 900 千円
6. 科学研究費補助金「中性 B 中間子の $\eta/\eta'/K_S$ 崩壊の探索と CP 非保存現象の研究」
三宅 秀樹: 若手研究 (B) 900 千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “First Observation of the Decay $B_s^0 \rightarrow D_s^- D_s^+$ and Measurement of Its Branching Ratio,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 021803 (2008).
2. “Search for Standard Model Higgs Bosons Produced in Association with W Bosons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 041801 (2008).
3. “Cross Section Constrained Top Quark Mass Measurement from Dilepton Events at the Tevatron,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 062005 (2008).
4. “Direct Measurement of the W Boson Width in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 071801 (2008).
5. “Observation of Orbitally Excited B_s Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 082001 (2008).

6. “First Measurement of the Production of a W Boson in Association with a Single Charm Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 091803 (2008).
7. “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ Decays with 2 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 101802 (2008).
8. “Measurement of Inclusive Jet Cross Sections in $Z/\gamma^*(\rightarrow e^+e^-)+\text{Jets}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 102001 (2008).
9. “Measurement of Lifetime and Decay Width Difference in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 121803 (2008).
10. “Evidence for $D^0-\bar{D}^0$ Mixing Using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 121802 (2008).
11. “First Flavor-Tagged Determination of Bounds on Mixing-Induced CP Violation in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 161802 (2008).
12. “Search for Heavy Top-like Quarks Using Lepton Plus Jets Events in 1.96 TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 161803 (2008).
13. “Observation of the Decay $B_c^\pm \rightarrow J/\psi\pi^\pm$ and Measurement of the B_c^\pm Mass,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 182002 (2008).
14. “Strong Evidence for ZZ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 201801 (2008).
15. “Search for the Higgs Boson in Events with Missing Transverse Energy and b Quark Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 211801 (2008).
16. “Search for Resonant $t\bar{t}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100**, 231801 (2008).
17. “Measurement of the Cross Section for W -boson Production in Association with Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 011108 (2008).
18. “Limits on the Production of Narrow $t\bar{t}$ Resonances in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 051102 (2008).
19. “Search for Chargino-Neutralino Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV with high- p_T Leptons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 052002 (2008).

20. “Observation of Exclusive Dijet Production at the Fermilab Tevatron $p\bar{p}$ Collider,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 052004 (2008).
21. “Measurement of Ratios of Fragmentation Fractions for Bottom Hadrons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 072003 (2008).
22. “Measurement of Correlated $b\bar{b}$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 072004 (2008).
23. “Search for Third Generation Vector Leptoquarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 091105 (2008).
24. “Two-particle Momentum Correlations in Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 092001 (2008).
25. “First Run II Measurement of the W Boson Mass,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **77**, 112001 (2008).
26. “Search for Pair Production of Scalar Top Quarks Decaying to a τ Lepton and a b Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 071802 (2008).
27. “Search for Doubly Charged Higgs Bosons with Lepton-Flavor-Violating Decays involving Tau Leptons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 121801 (2008).
28. “Search for Large Extra Dimensions in Final States Containing One Photon or Jet and Large Missing Transverse Energy Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 181602 (2008).
29. “Search for the Flavor-Changing Neutral-Current Decay $t \rightarrow Zq$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 192002 (2008).
30. “Forward-Backward Asymmetry in Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 202001 (2008).
31. “Search for Supersymmetry in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV Using the Trilepton Signature for Chargino-Neutralino Production,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 251801 (2008).
32. “Search for the 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. **101**, 251803 (2008).
33. “Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101**, 252001 (2008).

34. “Model-Independent and Quasi-Model-Independent Search for New Physics at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012002 (2008).
35. “Cross Section Measurements of High- p_T Dilepton Final-State Processes Using a
Global Fitting Method,”
A. Abulencia *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012003 (2008).
36. “Search for New Heavy Particles Decaying to $Z^0 Z^0 \rightarrow eeee$ in $p\bar{p}$ Collisions at
 $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 012008 (2008).
37. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson
at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 032008 (2008).
38. “Search for Heavy, Long-Lived Neutralinos that Decay to Photons at CDF II Using
Photon Timing,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 032015 (2008).
39. “Measurement of b -jet Shapes in Inclusive Jet Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} =$
 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboraton], Phys. Rev. D **78**, 072005 (2008).
40. “Measurement of the Inclusive Jet Cross Section at the Fermilab Tevatron $p\bar{p}$ Collider
Using a Cone-Based Jet Algorithm,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 052006 (2008).
41. “First Measurement of the Fraction of Top Quark Pair Production Through Gluon-
Gluon Fusion,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **78**, 111101 (2008).
42. “Search for a Higgs Boson Decaying to Two W Bosons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 021802 (2009).
43. “Search for High-Mass e^+e^- Resonances in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 031801 (2009).
44. “Search for Maximal Flavor Violating Scalars in Same-Charge Lepton Pairs in $p\bar{p}$
Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 041801 (2009).
45. “First Bound on the total Width of the Top Quark in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} =$
 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 042001 (2009).
46. “Measurement of Resonance Parameters of Orbitally Excited Narrow B^0 Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 102003 (2009).

47. “Measurement of the Top Quark Mass with Dilepton Events Selected Using Neuroevolution at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 152001 (2009).
48. “Global Search for New Physics with 2.0 fb⁻¹ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 011101 (2009).
49. “Search for the Rare Decays $B^+ \rightarrow \mu^+\mu^-K^+$, $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-K^*(892)^0$, and $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-\phi$ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 011104(R) (2009).
50. “First Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu)/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-)$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 032001 (2009).
51. “Search for New Physics in the $\mu\mu + e/\mu + \cancel{E}_T$ Channel with a low- p_T Lepton Threshold at the Collider Detector at Fermilab,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 052004 (2009).
52. “A Search for High-Mass Resonances Decaying to Dimuons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 091805 (2009).
53. “Measurement of W -Boson Helicity Fractions in Top-Quark Decays Using $\cos\theta^*$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Lett. B **674**, 160 (2009).
54. “Search for Hadronic Decays of W and Z Bosons in Photon Events in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ GeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0803.4264 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
55. “Measurement of the Fraction of $t\bar{t}$ Production via Gluon-Gluon Fusion in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0807.4262 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
56. “First Observation of $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp$ and Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp)/\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm \pi^-)$,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0809.0080 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
57. “The First Measurement of the Top Quark Mass at CDF II in the Lepton+Jets and Dilepton Channels Simultaneously,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0809.4808 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
58. “Top Quark Mass Measurement in the $t\bar{t}$ All Hadronic Channel using a Matrix Element Technique in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.1062 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)

59. “Inclusive Search for Squark and Gluino Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.2512 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
60. “Measurement of the k_T Distribution of Particles in Jets Produced in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0811.2820 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
61. “Search for New Particles Decaying into Dijets in Proton-Antiproton Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4036 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
62. “Observation of the New Charmless Decays of Bottom Hadrons,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4271 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
63. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton plus Jets Channel Using a Modified Matrix Element Method,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4469 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
64. “Measurement of Cross Sections for b Jet Production in Events with a Z Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.4458 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
65. “Direct Measurement of the W Production Charge Asymmetry in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.2169 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
66. “Search for Top-Quark Production via Flavor-Changing Neutral Currents in $W+1$ Jet Events at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0812.3400 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
67. “Measurement of the Top Quark Mass at CDF Using the “Neutrino ϕ Weighting” Template Method on a Lepton Plus Isolated Track Sample,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.3773 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
68. “Search for the Decays $B_{(s)}^0 \rightarrow e^+\mu^-$ and $B_{(s)}^0 \rightarrow e^+e^-$ in CDF Run II,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.3803 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)

69. “Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross section in 2 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions at 1.96 TeV Using Lepton Plus Jets Events with Soft Muon b -Tagging,”
T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:0901.4142 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
70. “Energy calibration of b -quark jets with $Z \rightarrow b\bar{b}$ decays at the Tevatron collider,”
J. Donini, T. Tomura *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **596**, 354 (2008).
71. “Comparison of charge collection efficiency of segmented silicon detectors made with FZ and MCz p-type silicon substrates”,
G. Casse, K. Hara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **A591**, 178-180 (2008).
72. “Combined performance tests before installation of the ATLAS Semiconductor and Transition Radiation Tracking Detectors ”,
E. Adat, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, J. of Instrumentation (JINST) **3**, P08003 (2008).
73. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”,
G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, JINST **3**, S08003 (2008).
74. “The integration and engineering of the ATLAS SemiConductor Tracker barrel”,
A. Abdesselam, K. Hara, S.H. Kim, F. Ukegawa, *et al.*, INST **3**, 10006 (2008).
75. “Alignment of the Pixel and SCT Modules for the 2004 ATLAS Combined Test-Beam”,
A. Ahmad, K. Hara, *et al.*, JINST **3**, P09004 (2008).
76. “Engineering for the ATLAS SemiConductor Tracker (SCT) End-cap”,
A. Abdesselam, K. Hara *et al.*, JINST **3**, P05002 (2008).

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 永野間 淳二: CDF 実験におけるトップクォーク対共鳴状態の探索,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
2. 木村 直樹: CDF 実験におけるトップクォーク対生成でのグルーオン融合の割合の測定,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
3. 深見 智代: CDF-TOF 用光電子増倍管の時間分解能の長期的変動,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
4. 林 隆康: LHC-ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器のコミッショニング - I ,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.
5. 秦野 博光: SLHC のためのシリコンマイクロストリップ検出器の開発 ,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-23 日), 山形大学.

6. 埴 慶太：FTBL を用いた ATLAS-SCT モジュールの試験とビームパラメータの測定結果，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
7. 瀬賀 智子：SOI 技術を用いた pixel 検出器の開発（放射線損傷試験），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
8. 高橋 優介：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の性能評価，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
9. 武政 健一：Hf-STJ（超伝導トンネル接合素子）光検出器の開発，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月 20 日-23 日），山形大学.
10. 武内 勇司：CDF の最近の結果，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会（2009 年 3 月 9 日-10 日），
愛知県額田郡.
11. 永野間 淳二：CDF での B の物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会（2009 年 3 月 9 日-10 日），
愛知県額田郡.
12. 中村 浩二：CDF でのトップの物理，
科研費特定領域「フレーバー物理の新展開」第三回研究会（2009 年 3 月 9 日-10 日），
愛知県額田郡.
13. 武内 勇司：CDF 実験の最新結果（招待講演），
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
14. 中村 浩二：Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-
TeV Proton-Antiproton Collisions，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
15. 河内山 真美：SOI 技術を用いた読みだし一体型ピクセル検出器の開発（ENEXSS を
用いた放射線損傷シミュレーション），
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
16. 山田 美帆：SLHC に用いる p 型マイクロストリップセンサーの放射線耐性，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
17. 三井 真吾：SLHC 用 P 型シリコン飛跡検出器のレーザーを用いた性能評価，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
18. 松隈 恭子： γ コンバージョン事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の物質質量評価，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
19. 目黒 立真：ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器での精密飛跡再構成，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.
20. 生野 利典：ILC 実験のためのシンチレータストリップによる細分割電磁カロリメータ
試作機のビームテスト結果報告 1，
日本物理学会 第 64 回年次大会（2009 年 3 月 27 日-30 日），立教大学.

21. 須藤 裕司：ILC 実験のためのシンチレータストリップによる細分割電磁カロリメータ試作機のビームテスト結果報告 2，
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日–30 日)，立教大学。
22. 武政 健一：ハフニウムを用いた超伝導体トンネル接合素子 (STJ) 検出器の開発研究
日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日–30 日)，立教大学。

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Junji Naganoma, “Tevatron Searches in Top Decays,”
XVI International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects,
April 7–11, 2008, University College London, London, UK.
2. Koji Nakamura, “Search for Single Top Quark Production Optimized for s -channel
Production at CDF,”
American Physical Society April Meeting, April 11–15, 2008, St. Louis, Missouri,
USA.
3. Yoshikazu Nagai, “Search for Technicolor Particles Produced in Association with a
 W Boson at CDF,”
American Physical Society April Meeting, April 11–15, 2008, St. Louis, Missouri,
USA.
4. Koji Nakamura, “Measurement of the Single Top Production Cross Section at CDF,”
PHENO 2008 Symposium, April 28–30, 2008, University of Wisconsin-Madison, Wis-
consin, USA.
5. Kazuhiko Hara, “Characteristics of the Irradiated Hamamatsu P-Bulk Silicon Mi-
crostrip Sensors”
IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
6. Kazuhiko Hara, “Radiation Resistance of SOI Pixel Sensors Fabricated with OKI
0.15 μm FD-SOI Technology”
IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
7. Yuji Takeuchi, “Recent Results from Tevatron,”
16th YKIS Conference “Progress in Particle Physics 2008,” February 16–19, 2009,
Kyoto University, Kyoto, Japan.
8. Tomonobu Tomura, “Recent Results from Tevatron,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH09),” March 3–6,
2009, KEK, Tsukuba, Japan.
9. Naoki Kimura, “Measurement of the Gluon Fusion Fraction in the $t\bar{t}$ Production
Mechanism using the Dilepton Channel at CDF,”
XLIV Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theories, March
7–14, 2009, La Thuile, Italy.

10. Yoshikazu Nagai, “Search for technicolor particles produced in association with W boson at CDF,” (poster presentation)
19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, May 27–31, 2008, Galena, Illinois, USA.
11. Koji Nakamura, “Search for Single Top Quark Production at CDF \sim Optimized for s -Channel Production \sim ,” (poster presentation)
19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, May 27–31, 2008, Galena, Illinois, USA.
12. Koji Nakamura, “Search for Single Top Quark Production at CDF \sim Optimized for s -Channel Production \sim ,” (poster presentation)
Fermilab Users’ Meeting, June 4–5, 2008, Batavia, Illinois, USA.
13. Yuji Sudo, “Study of the Multi-pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-strip Calorimeter,” (poster presentation)
TIPP09 Conference, Tsukuba, March 12–17, 2009.
14. Miho Yamada, “Surface damages in P-Bulk Silicon Microstrip Sensors,” (poster presentation)
TIPP09 Conference, Tsukuba, March 12–17, 2009.

(4) 会議・研究会報告書

1. T. Masubuchi, “Search for SM Higgs in the $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ Channel using $\sim 2 \text{ fb}^{-1}$,”
Proceedings of the XLIII Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, March 2008. (arXiv:0805.2803 [hep-ex])
2. J. Naganoma, “Tevatron Searches in Top Decays,”
Proc. of XVI Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Topics, London, UK, April 2008. (<http://dx.doi.org/10.3360/dis.2008.132>)
3. Y. Nagai, “Search for Technicolor Particles Produced in Association with W boson at CDF,”
Proceedings of the 19th Hadron Collider Physics Symposium 2008, Galena, Illinois, USA, May 2008. (arXiv:0808.0226 [hep-ex])
4. K. Hara, H. Miyake, *et al.*, “Radiation Resistance of SOI Pixel Sensors Fabricated with OKI 0.15 μm FD-SOI Technology”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N04-5, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
5. K. Hara, *et al.*, “Characteristics of the Irradiated Hamamatsu P-Bulk Silicon Microstrip Sensors”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N19-2, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.

6. S. Terada, K. Hara, *et al.*, “ Thermal Runaway Characteristics of Silicon Microstrip Module Designed for ATLAS Upgrade Inner Tracker at Super LHC”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-136, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
7. Y. Unno, K. Hara, *et al.*, “ P-Stop Designs for Reducing Electric Field Strength at Implant Edges”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-378, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.
8. Y. Ikegami, K. Hara, *et al.*, “ A Control and Monitor System for Serial Powering of Silicon Strip Detectors at SLHC”,
IEEE Nuclear Science Symposium CR N30-454, Dresden, Germany, October 19–25, 2008.

(5) 学位論文

博士論文

1. 木村 直樹: Study of the Top Quark Production Mechanism in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions. (重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク生成機構の研究),
筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009 年 2 月.
2. 中村 浩二: Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions. (重心系エネルギー 1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク単一生成断面積の測定),
筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009 年 2 月.

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科, 2009 年 2 月 .

1. 生野 利典: リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータのビームテストによるエネルギー較正と基本性能評価
2. 須藤 裕司: リニアコライダー実験用細分割電磁カロリメータのビームテストによる性能試験と π^0 中間子生成事象の再構成
3. 武政 健一: ニュートリノ崩壊探索実験のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の開発研究
4. 秦野 博光: Super-LHC 用 P 型シリコンマイクロストリップセンサーの放射線耐性の評価
5. 目黒 立真: ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器による精密飛跡再構成

(6) 研究会の主催

1. CDF 実験日本グループ研究会
筑波大学，2008 年 12 月 13 - 14 日．

【構成員の異動】

1. 2008 年 5 月に永野間淳二が研究員として着任．
2. 2008 年 6 月に丸山和純講師が高エネルギー加速器研究機構准教授へ転出．

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	岡本 崇
研究員	諏訪 多聞, 赤堀 卓也, 清水 一紘, 長谷川 賢二
大学院生	4名
4年生	5名

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, これを用いた宇宙第一世代天体, 銀河形成・進化, 銀河団の研究を行った。また, 宇宙構造形成, 宇宙再電離, 銀河形成, 銀河進化, 銀河中心核, 並びに星・惑星系形成の研究を展開した。

【1】 FIRST プロジェクト

(1) 概要

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。

(2) 宇宙シミュレータ FIRST

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, 2 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 2 台で合計 4.5TB 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 22TB 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。

(3) ダークマター・カスプが第一世代天体形成に与える影響

宇宙で最初に生まれた天体 (第一世代天体) は重元素を含まないガス雲から生まれる。従来の計算では $\approx 10^6 M_{\odot}$ のダークマターハローに $10^5 M_{\odot}$ 程度のバリオンガスが蓄積された後, 重力不安定を起こし, その中に第一世代星が形成されるとされてきた。

しかしながら, 従来の研究では, ダークマターの小スケールでの振る舞い, 特にダークマター・カスプの成長についてはあまり注目されてこなかった。そこで, 我々は計算領域の全体を可能な限り高解像度にした数値計算で, ダークマター・カスプの成長を分解できるようにし, 第一世代天体の形成と進化を調べた。計算には宇宙シミュレータ FIRST を用い, N 体/流体粒子

(SPH) 法によって第一世代天体形成過程の超高分解能シミュレーションを行った。この計算では、ダークマターと流体粒子をそれぞれ約 1 億体 (512^3 体) 使い、計算領域の全体にわたってバリオンとダークマター質量解像度としてそれぞれ $0.046 M_{\odot}$ と $0.22 M_{\odot}$ を実現した。その結果、第一世代天体の形成に対してダークマター・カスプが影響を与えている可能性があることがわかった。

宇宙初期の密度揺らぎが成長して生まれるダークハローの中心部では、密度が半径の-1.5 乗程度に比例するカスプが形成される。計算分解能が上がるほど、カスプの成長は中心部での重力場を発散に向かわせる。その結果ダークマターハロー中心近くに存在するバリオンガスが強く中心部に引かれることになり、そこで密度が早く上昇する。カスプはダークマターハローの最中心部で密度一定のコア構造に切り替わるため、ガス密度の上昇はカスプとコアの切り替わるスケールに依存することになる。このことから、ダークハロー中心部における小スケールの構造を正しく解くことが第一世代天体形成過程において重要であることが明らかになった。

(4) 第一世代星紫外線フィードバックの星質量依存性

第一世代星は非常に大質量であったと考えられており、強い紫外線を放射する。そのため、第一世代星近傍のガスは光電離や水素分子の光解離などの紫外線フィードバックがかかる事が期待される。Susa and Umemura (2006) は、輻射流体シミュレーションを行う事で第一世代星近傍でのさらなる星形成可能性について調べた。その結果、電離波面後方に水素分子のシェルが形成され、そのシェルが解離光子を遮蔽することで近傍星形成の障害を緩和する事を見いだした。しかし、このシミュレーションは第一世代星質量が 120 太陽質量の場合のみの計算であり、星質量依存性については調べられていなかった。

そこで我々は、輻射流体シミュレーションを行う事で、フィードバックの星質量依存性を調査し、星質量が 25-40 太陽質量以下では、電離光子が解離光子による星形成障害を緩和できない事を明らかにした。この結果は、低質量星は大質量星に比べて電離光子数の解離光子数に対する割合が小さいという事実から定性的には説明可能であるが、これらの違いはたかだか二倍以下でしかなく、なぜこの程度の違いによって、光解離の負のフィードバックを緩和できるかどうかが変わるかは明らかでなかった。

我々は解析的見積もりと輻射流体シミュレーションの結果を用いる事で、上で述べた結果のより定量的な理解を試みた。その結果、電離波面前方に形成されるシェルの水素分子柱密度が、電離光子数と解離光子数の比に強く依存する事を見いだした。さらに、この解析的見積もりにより第一世代星近傍で星形成が可能となる臨界距離を定式化した。

(5) Ly α 輝線天体と他波長観測天体との対応関係について

近年 Ly α 輝線で非常に明るい Ly α 輝線天体 (LAEs) と呼ばれる原始天体が様々な赤方偏移で観測されている。LAEs の正体は良く分っていないが、最近になって銀河進化の非常に極初期のフェーズの天体である事が分かってきた (Mori & Umemura 2006, Shimizu et al. 2007)。しかしながら LAEs は Ly α 輝線の放射機構など依然として良く分っていない天体である。

現在様々な領域において、narrow band survey による Ly α 輝線天体観測の他、光学、赤外、Sub-mm といった波長による遠方銀河観測が盛んに行われている。しかしながら、LAEs と様々な波長帯で観測される銀河がどのように関係しているのかはよくわかっていない。

そこで我々は、宇宙論的 N 体計算と化学進化モデルを組み合わせ、LAE となる天体と他の波長帯で観測される銀河との関係を調べた。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、evolutionary spectral synthesis code 'PEGASE' を用いて SED の計算を行った。Ly α 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、LAEs は銀河進化の極初期のフェーズにあるような天体だけでなく、一度 LAEs としての寿命を終えたものにガスが降着して星形成を誘起するような天体も LAEs として観測される可能性がある事が分かった。そして、前者を Type 1 LAE, 後者を Type 2 LAE と名づけた。さらに、Type 2 LAE は MOIRCS 等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分かった。

(6) ライマンアルファエミッタの光学的特性と宇宙再電離との関係

近年 WMAP の観測等により、宇宙再電離史への大きな制限が与えられた。しかし、宇宙再電離を引き起こした電離源については依然謎のままである。ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河はその電離源の有力な候補である。我々はこれまで 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、3次元輻射輸送計算を行うことによりこれらの高赤方偏移天体の光学的特性について理論的に調べ、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を見積もった。さらに、この結果と観測により得られている星形成密度を用いて、ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河の銀河間ガスの電離への寄与を見積もった。結果としてライマンアルファエミッタは銀河間ガスの電離にはほとんど寄与せず、ライマンブレイク銀河は $z = 3 - 5$ において主要な電離源である可能性を指摘した。また、現在までに観測されているライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河のみでは $z > 6$ において銀河間ガスを電離することが困難であることが分かった。

(7) 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 FIRST シミュレータ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、最近すざく衛星で観測された Abell 399/401 連銀河団の連結領域においては、24 階電離鉄の割合が平衡値より 10-20 % 多いことや電子温度がガスの平均温度より数% 低いことを明らかにした。また観測される X 線のスペクトルを計算し、鉄の K 輝線の強度が数% 増強されていることも示した。更に、連結領域の周縁部においてマッハ数が 1.5 程度の衝撃波が存在することが予言された。この領域では電子・イオンの 2 温度構造や鉄イオンの電離状態の電離平衡からのずれが大きいことが予想され、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、様々な衝突条件下(質量比・インパクトパラメータ)での衝突銀河団ガスの非平衡電離状態・2 温度プラズマのシミュレーションを行い、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。

【2】宇宙論・銀河形成

(1) Baryon Acoustic Oscillation の非線形成長

Baryon Acoustic Oscillation (BAO) は宇宙晴れ上がり以前のバリオン・光子混合流体の音波振動が、晴れ上がり以後にバリオンとダークマターの重力相互作用によって現在の宇宙大規模構造に伝搬したものである。このBAOの振動スケールは宇宙晴れ上がり時のサウンドホライズンの大きさで決まるため理論的に計算可能である。従って、宇宙の大規模構造の観測によってBAOの振動スケールを観測することができれば、それを物差しとして大規模構造のスケールを測定することが可能になる。また、様々な赤方偏移でのBAOの観測から宇宙の膨張の履歴を測定することが可能になり、宇宙論パラメータ、特に暗黒エネルギーの状態方程式への制限が可能になると考えられている。

BAOの振動スケールは $100h^{-1}\text{Mpc}$ 程度であるので、その時間的な成長は線形理論が適用可能な範囲ではあるが、宇宙論パラメータや暗黒エネルギーの状態方程式のパラメータを高い精度で決定するためには、非線形な効果を取り入れたモデル化が必要となる。一般に、摂動論による弱非線形成長の取扱いが行われるがその適用範囲については必ずしも明らかでは無かった。我々は宇宙論的なN体シミュレーションを用いてBAOの非線形成長のシミュレーションを行い、様々な摂動論的な取扱いの適用可能範囲を明らかにした。

(2) 銀河の角運動量問題の物理的起源

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の下で、銀河形成シミュレーションを行うと殆どの銀河がバルジ成分が卓越した銀河となり、我々の天の川銀河のような渦巻き銀河が形成されないことが知られている(角運動量問題)。この原因を探るため、星形成等の仮定を変更した宇宙論的シミュレーションを行うことにより、同一の初期条件から渦巻き銀河と楕円銀河を形成することに成功した。この二つのシミュレーションを解析することにより、角運動量問題の原因は、小さなダークマターハローがまず形成され、それらが合体しながらより大きなダークマターハローへと成長していくというコールドダークマターモデルの特徴そのものにあること、観測されるような渦巻き銀河が存在するためには、宇宙の初期において超新星爆発によるエネルギー供給等によってガスの分布がダークマターハローのそれよりもずっと広がったものにならなければならないことを明らかにした。

(3) 紫外背景放射が銀河形成に与える影響の定量的評価法

準解析的モデル等で紫外背景放射の銀河形成への影響を評価するために長い間 Gnedin (2000) によるフィルタリング質量が使われてきた。我々は高解像度の宇宙論的シミュレーションを行うことにより、このフィルタリング質量が紫外背景放射による銀河形成阻害の影響を一桁ほど大きく見積もることを明らかにした。また、簡単な準解析的モデルを構築することにより、紫外背景放射は主に、ダークマターハローへと降着してくるガスの温度を上昇させることによりその温度よりも低いビリアル温度を持つダークマターハローへのガスの降着を禁じることにより銀河形成を抑制することを明らかにし、この影響を準解析的モデルで正しく取り扱う方法を提示した。

(4) 高分解能シミュレーションによる、銀河内での星形成シミュレーション

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 $n_{\text{H}} \sim 0.1 \text{ cc}^{-1}$ 程度の温かいガスで星形成が起こると仮定していた。そこで、 100 度以下、密度 n_{H} が 100 cc^{-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った。その結果、このようなシミュレーションでは観測的に

知られるガスの表面密度と星形成率密度の関係が自動的に再現されること、それはガスが低温高密度の星形成領域へと供給されるタイムスケールが、どの密度のガスでも力学的時間の約5倍になっているためであることが原因であることを明らかにした。

また、銀河合体の高解像シミュレーションを行うことにより、このような低温高密度ガスでの星形成を仮定すると、従来のシミュレーションでは再現されなかった、銀河と銀河の衝突面での爆発的星形成が自然に生じることが分かった。この爆発的星形成ではダークマターハローを持たない星団も多数形成されることが明らかになった。

【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(C)「高精度ハイブリッドシミュレーションで探る銀河の発生学」(平成18年度~平成20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。その研究成果の一部としてライマンアルファエミッタが数億年の時間尺度でライマンブレイク銀河へ進化し、最終的には近傍の楕円銀河へ進化する様を理論的に示した。また、ライマンアルファエミッタで放射されるランマンアルファエミッションの光度は、原始銀河の質量と生の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以外に、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) ライマンアルファエミッタとサブミリ銀河との関係

近年、ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河の観測研究の分野では、従来からの可視光波長のみならずX線、サブミリ等の多波長観測が行われはじめている。我々はMori & Umemura(2006)における銀河風によるライマンアルファエミッタの理論モデルが現実的であるか検証すべく、星間ダストによる紫外線の吸収を詳細に扱うことで、赤外線特性を調べた。その結果、銀河進化と共にダストの温度分布、赤外線分布、赤外線光度の時間的変化が分かった。この結果を用いて、ALMA等に代表される将来の大型観測装置による高赤方偏移天体のサブミリ波観測に対する理論的な示唆を与えた。

(4) 銀河衝突における銀河構造の力学進化

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。そこで最も基本的な力学過程である小質量銀河が大質量銀河に衝突合体していく過程を、これまでにない高精度シミュレーションにより調べた。

特に最近の宇宙望遠鏡や大望遠鏡による高精度観測により、アンドロメダ銀河のハロー部分に存在する大規模な星構造（アンドロメダストリーム）や、貝殻状の恒星の空間分布といった謎の大規模構造がぞくぞくと発見され始めている。アンドロメダを取り囲むこのような大規模構造はどのようにして出来上がったのか？2008年6月から運用が開始された新しいスーパーコンピュータ“T2K-TSUKUBA”を用いて、この大規模構造に関する大規模数値シミュレーション解析を行った。今から10億年前にアンドロメダの1/400程度の質量しかない小さな銀河が、アンドロメダの強い重力に捕まり、バラバラに引き裂かれる様子がシミュレーションされた。この銀河の残骸は約40万光年にも渡って夜空を流れる”アンドロメダの涙”を作り上げ、幾重にも重なる貝殻状の星の群れを産み出すことになった。さらに、遡ること10億年前にも同程度の質量をもつ別の矮小銀河が、同様にアンドロメダと衝突していた可能性を見出した。アンドロメダとその彼方に位置するM33との間の広大な銀河間空間には、その衝突によって出来上がった矮小銀河の残骸が周期的なシェル構造を作り上げていることを示した。近傍銀河ではこのような矮小銀河の衝突過程が詳細に観測でき、原始銀河の衝突合体過程を理解する上で有意義なものとなった。

（5）銀河系中心部の高速分子雲の衝撃波模型

銀河系中心部の分子ガスが集中している領域に、他には見られない非常に大きな速度幅を持つコンパクトな分子雲（HVCC）が電波の大規模サーベイ観測より大量に発見されている。詳細な観測データの解析から、HVCCが膨張するガスの殻構造を持つことが示唆され、その膨張エネルギーは $10^{49} - 10^{52}$ ergにも及ぶ大きな運動エネルギーを持つことが報告されている。しかしながら、そのエネルギー源に関する詳細な理論モデルは未だ報告されておらず、その起源が謎のままとなっている。本研究では、HVCCの特性とその内部で誕生した星団の活動性が密接に関係していると考え、星団からの質量放出過程とHVCCとの流体力学的相互作用について調べた。HVCCの中心に星団が形成され、その星団にある複数のOB型星から放出される恒星風とII型超新星爆発によって発生する衝撃波によって、HVCC内の星間ガスがかき集められ、圧縮・加熱されて膨張する殻を生成することを見出した。

（6）ブラックホール降着・噴出流の大局的2次元輻射磁気流体シミュレーション

ブラックホールへのガス降着流の理解は、1970年代に登場した標準円盤モデルと、それに引き続き提案されたスリム円盤モデル、ADAF(RIAF)モデルといった1次元モデルを中心に大きく発展してきた。これらのモデルでは、肝心のエネルギーおよび粘性の起源を現象論的モデル（所謂モデル）で扱っている。近年、それらが磁場起源であることがわかり、MHD計算で詳細な研究が行われるようになった。しかしながら、より現時的な描像を得るためには、輻射冷却や輻射圧も考慮する必要がある。即ち、MHD計算に輻射輸送を取り入れた輻射磁気流体(RMHD)計算を行わなければならない。

そこで我々は、ブラックホール降着流の大局的2次元RMHDシミュレーションを実行した。その結果、スリム円盤、標準円盤、RIAFに対応する3種の降着流を再現することに成功した。質量降着率が臨界値以上の場合、輻射圧優勢で分厚い円盤が形成され、輻射圧加速型のアウトフローが発生することがわかった(Model A)。質量降着率が臨界値の1%程度のときには輻射冷却の効いた薄い円盤(Model B)が、0.01%程度の場合には輻射冷却が効かず、高温プラズマから成る分厚い円盤(Model C)が形成されることがわかった。Model BとCの円盤からは、磁気圧で加速されたアウトフローが発生する。磁場のエネルギーはガスのエネルギーの2倍(Model A)、30%(Model B)、20%(Model C)まで増幅される。また、粘性トルクがおおよそ圧力に比例することがわかった。このようなブラックホール降着流の基礎物理過程の詳細を調べることは、

銀河中心の巨大ブラックホールと銀河バルジの共進化を考える上で、重要な示唆を与えることになる。

【4】星・惑星系形成過程の研究

(1) 複合コンドリュール形成

コンドリュールはコンドライト隕石に含まれる 1mm 程度の球形のシリケート構成物であり、原始太陽系星雲中で急激な加熱を受け、溶融し、急冷することで形成されたと考えられており、原始太陽系星雲の物理的、化学的情報を保持していると期待されている。多くのコンドリュールは単体で含まれているが、2つ以上のコンドリュールが付着した、複合コンドリュールが全体の5%程度存在する。多くの複合コンドリュールは独立なコンドリュールが溶融中に衝突することにより形成されたと考えられているが、原始太陽系最小質量モデルでダスト同士の衝突確率を見積ると、複合コンドリュールの存在割合に遠く及ばず、これまで理論的な説明はなされていなかった。

本研究では、2つのフォルステライト (Mg_2SiO_4) 液滴の衝突を様々なパラメータ（衝突速度、衝突角度、液滴の粘性、液滴の直径）のもとで、3次元流体シミュレーションにより模擬し、複合コンドリュール形成のための衝突条件を定量的に調べた。様々なパラメータで計算を行った結果、衝突後に2つの液滴が付着する「合体」、衝突角度が大きく、いったん付着するが、最終的には二つの液滴に分離する「伸張分離」、衝突速度が速く最終的に多くの液滴に分裂する「破壊」の3つのカテゴリーに分類できる事がわかった。そして、複合コンドリュール形成の有力なモデルの一つである分裂・衝突モデルの検証を衝突条件の観点から行った。コンドリュール形成の有力なモデルの一つである衝撃波加熱モデルでは、ダストはガス摩擦加熱を受けるため、ダスト表面から溶融し始める。溶融部分は高速のガス流にさらされるため、その動圧で溶融部は分裂する。この分裂片同士の衝突を考えたのが、分裂・衝突モデル (Miura et al. 2008) である。分裂片同士の衝突のパラメータを求めるため、部分的に溶融したダストの溶融部の分裂現象と分裂片の運動を3次元流体シミュレーションにより調べた。数値計算の結果、32個の分裂片を同定し、12回の衝突を確認した。さらに分裂片の位置、速度、サイズの時間進化を追うことで、12回の衝突の衝突パラメータを調べ、衝突条件を満たすかどうか調べた。その結果、11回の衝突に関しては合体条件をクリアする。しかし、これらの衝突での液滴の変形は動圧支配であり、形状保持条件を満たさない。これは、分裂、衝突の時間スケールに比べて、冷却の時間スケールが長いこと、粘性の低い状態で衝突するためである。したがって、Miura et al. (2008) で考えられていたような、分裂直後の分裂片同士の衝突では、複合コンドリュールの形成は難しいことがわかった。一方、異なる分裂現象（複数回の分裂現象）による分裂片同士の衝突によって形成されるというシナリオでは、分裂片が十分に冷却されてから衝突するため、有力なモデルとなることがわかった。

(2) 輻射輸送計算を用いた大質量星周円盤のスペクトル・エネルギー分布の研究

大質量星の形成メカニズムは、宇宙物理学における重要な未解決問題の一つになっている。最近の観測で、大質量星の周りに円盤状の構造の証拠が見つかってきており、これは大質量星が小質量星と同様にガス円盤からの降着によって形成されたことを示唆している。よって、ガス円盤が大質量星周りでどのような構造となっているかを知ることは、大質量星の形成メカニズムを解明する上で、極めて重要である。

本研究では、大質量星周円盤の構造を理論解析によって求め、これを使って輻射輸送計算を行うことで、ガス円盤のエネルギー・スペクトル分布から円盤についてどのような物理情報を引き

出すことができるかについて解析した。この解析では、大質量星からの輻射伝播について、輻射流速制限拡散近似法を採用し、2次元軸対称の輻射輸送を解くことによって星周ガス円盤の静水圧平衡密度分布と温度を決定した。そして、求められたガス円盤の密度分布と温度分布を用いて、光の伝播をレートレーシングし、ガス円盤からのエネルギースペクトル分布を求めた。その結果、輻射の大部分は円盤表面から逃げ出し、円盤内部の高密度領域が、短波長の輻射を吸収して、赤外線放射として再放出することがわかった。また、星周円盤の半径の大きい所では、遮蔽効果が効いて低温になることがわかった。

上記の計算を、現実的にとりうる様々なパラメータについて計算した結果、中心星の光度は、エネルギースペクトル分布におけるピーク光度と10ミクロンでのシリケート光度の比で決定できることがわかった。これは、中心星の光度が高いほど、星周円盤の多くの領域が高温に加熱されることになり、その結果エネルギースペクトル分布のピーク値が高くなるからである。また、表面密度分布が変わると、波長毎の光学的厚さの半径依存性が変わり、各波長でのエネルギースペクトル分布が変わる。計算の結果、特に300ミクロンの光度は、表面密度分布の勾配に敏感であり、300ミクロン光度によって表面密度勾配をよく決定できることがわかった。結論として、エネルギースペクトル分布を見ることにより、大質量星形成の物理状態について、多くの重要な情報を得ることができることが明らかとなった。

<受賞>

保田 誠司

数理物質科学研究科長博士論文表彰，2009年3月

Theoretical Study on Compound Chondrule Formation

(複合コンドリュール形成に関する理論的研究)

<科研費採択状況>

基盤研究(S): 梅村 雅之(代表者)(新規)

「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(1,090万円)

基盤研究(C): 森 正夫(代表者)(継続)

「高精度ハイブリッドシミュレーションで探る銀河の発生学」(104万円)

若手研究(スタートアップ): 吉川 耕司(代表者)(継続)

「宇宙論的バリオン進化の理論的研究」(135万円)

基盤研究(B): 吉川 耕司(研究分担者)(新規)

「バリオン宇宙の理論的探求と次世代X線衛星」(研究代表者: 須藤靖)(50万円)

日本学術振興会特別研究員奨励費: 秋月 千鶴(代表者)(継続)

「相対論的輻射輸送から探る活動天体と宇宙ジェットの構造」(90万円)

日本学術振興会特別研究員奨励費: 小泉 貴之(代表者)(新規)

「相対論的輻射流体力学によるブラックホール降着円盤とアウトフローの研究」(90万円)

<非常勤講師(集中講義)>

1. 梅村 雅之: 東京工業大学「宇宙輻射流体力学」, 2008年7月16日~17日
2. 森 正夫: 千葉大学「計算物理学IV」, 2008年12月22日

< 学位論文 >

博士論文

1. 保田 誠司
Theoretical Study on Compound Chondrule Formation
(複合コンドリュール形成に関する理論的研究)
2. Rogel Mari Dionisio Sese
The Study on Spectral Energy Distribution of Massive Circumstellar Disks Using Radiative Transfer Calculations
(輻射輸送計算を用いた大質量星周円盤のスペクトル・エネルギー分布の研究)

修士論文

1. 市川 知宏
銀河の遠赤外放射輸送モデルの構築と星形成矮小銀河への応用
2. 成田 亮太
銀河団を用いたバリオン音響振動検出の可能性
3. 和田 崇之
大質量星周りのダストガス円盤の電離構造

学士論文

1. 石崎 友規
初期宇宙の水素分子形成と初代星の誕生
2. 井上 源基
銀河系中心で発見された High Velocity Compact Cloud の衝撃波模型
3. 中村 繁幸
非一様密度場中における衝撃波の伝播過程の解析
4. 三木 洋平
銀河衝突の数値実験によるアンドロメダストリーム形成過程の探究
5. 柳沼 えり
無衝突ポルツマン方程式による自己重力系の数値計算

< 論文 >

Refereed Papers

1. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., 2009, Radiative regulation of Population III star formation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, in press.
2. Hasegawa, K., Umemura, M., Kitayama, T., 2009, Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, in press.
3. Ohsuga, K., Mineshige, S., Mori, M., Kato, Y., 2009, Global Radiation-Magnetohydrodynamic

- Simulations of Black Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three States, Publications of the Astronomical Society of Japan, in press
4. Nishimichi, T., Shirata, A., Taruya, A., Yahata, K., Saito, S., Suto, Y., Takahashi, R., Yoshida, N., Matsubara, T., Sugiyama, N., Kayo, I., Jing, Y.P., Yoshikawa, K., 2009, Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models, Publications of the Astronomical Society of Japan, in press.
 5. Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2008, Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: II. Shock-Induced Starburst at a Collision Interface During the First Encounter of Interacting Galaxies, Publications of the Astronomical Society of Japan, in press.
 6. Sakuma, M., Susa, H., 2009, Feedback Effects of First Supernovae on the Neighboring Dark Matter Halos, *Astrophysical Journal*, in press.
 7. Susa, H., Umemura, M., Hasegawa, K., 2009, Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, *Astrophysical Journal*, submitted.
 8. Kawata, D., Okamoto, T. Cen, R., Gibson, B. K., 2008, Non-Radiative Test of a New SPH Scheme, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted.
 9. Suwa, T., Hirashita, H., Tamura, Y., 2009, A Simple Understanding of the High-Redshift Luminous Infrared Populations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted.
 10. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., 2009, The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, submitted.
 11. Sato, J., Umemura, M., Sawada, K., 2008, The impact of a supernova explosion in a very massive binary, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 387, 1517-1524.
 12. Koch, A., Rich, R. M., Reitzel, David B., Martin, Nicolas F., Ibata, Rodrigo A., Chapman, Scott C., Majewski, Steven R., Mori, M., Loh, Yeong-Shang, Ostheimer, James C., Tanaka, M., 2008, Kinematic and Chemical Constraints on the Formation of M31's Inner and Outer Halo, *Astrophysical Journal*, 689, 958-982.
 13. Mori, M., Rich, R. M., 2008, The Once and Future Andromeda Stream, *Astrophysical Journal*, 674, L77-L80.
 14. Akahori, T., Yoshikawa, K., 2008, Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Linked Region of Abell 399/401, Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, L19-L22
 15. Ota, N., Murase, K., Kitayama, T., Komatsu, E., Hattori, M., Matsuo, H., Oshima, T., Suto, Y., Yoshikawa, K., 2008 Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145: constraints on the extremely hot gas and non-thermal emission, *Astronomy & Astrophysics*, 491, 363-377

16. Okamoto, T., Gao, L., Theuns, T., 2008, Mass loss of galaxies due to an ultraviolet background, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 390, 920-928.
17. Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2008, Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: I. How Should We Choose Star-Formation Criteria in High-Resolution Simulations of Disk Galaxies?, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 60, 667.
18. Zavala, J., Okamoto, T., Frenk, C. S., 2008, Bulges versus discs: the evolution of angular momentum in cosmological simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 387, 364-370.
19. Okamoto, T., Nemmen, R. S., Bower, R. G., 2008, The impact of radio feedback from active galactic nuclei in cosmological simulations: formation of disc galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385, 161-180.
20. Miura, H., Yasuda, S., Nakamoto, T., 2008, Fragment-collision model for compound chondrule formation: Estimation of collision probability, *Icarus*, 194, 811-821.
21. Akizuki, C., Fukue, J., 2008, Spherical Relativistic Radiation Flows with Variable Eddington Factor *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 337-343

Non-Refereed Papers

22. Umemura, M., 2008, Coevolution and Downsizing of Supermassive Black Holes and Galactic Bulges, *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, 283-289.
23. Watabe, Y., Umemura, M., 2008, Beyond the Unified Theory: Evolution of Active Galactic Nuclei Driven by Starburst Events, *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, 384.
24. Saitoh, T. R., Koda, J., Okamoto, T., Wada, K., Habe, A., 2008, Tidal Disruption of Dark Matter Halos Around Proto-globular Cluster, *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, 373.
25. Okamoto, T., 2008, Simulations of Coevolving Galaxies and Supermassive Black Holes, *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, 367.
26. Umemura, M., Susa, H., Suwa, T., Sato, D., 2008, FIRST Project: Formation and Feedback of the First Stars, *First Stars III*, 990, 386-389.
27. Suwa, T., Umemura, M., Sato, D., Susa, H., 2008, High Resolution P³M-GRAPE-SPH Simulations of PopIII Star Formation, *First Stars III*, 990, 390-392.
28. Sato, D., Umemura, M., Susa, H., Suwa, T., 2008, Radiative Transfer SPH Simulations of UV Feedback on Pop III Star Formation, *First Stars III*, 990, 393-394.
29. Mori, M., Umemura, M., 2008, Evolution of Lyman- α Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 399, 288.
30. Nakamura, Y., Hayashino, T., Yamada, T., Matsuda, Y., Yamauchi, R., Kousai, K., Morimoto, N., Umemura, M., 2008, Large Scale Structure of Lyman-Alpha Absorbers in the SSA22 Region at $z=3.1$, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 399,

135.

31. Shimizu, I., Umemura, M., 2008, Novel Picture for Lyman-Alpha Emitters, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 129.
32. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., 2008, Escape Fraction of Ionizing Photons from High-z Proto-Galaxy, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 70.
33. Nagashima, M., Okamoto, T., 2008, Chemical Abundance Patterns in the Local Dwarf Galaxies in the CDM Universe, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 399, 475.
34. Okamoto, T., 2008, Galaxy Formation, New Horizons in Astronomy, 393, 111.
35. Yasuda, S., Nakamoto, T., 2008, Conditions for Compound Chondrule Formation, Meteoritics and Planetary Science Supplement 43, 5145.
36. Miura, H., Yasuda, S., Nakamoto, T., 2008, Fragment-Collision Model for Compound Chondrule Formation: Size Ratio of Secondary to Primary, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts 39, 1215.

< 解説記事 >

1. 国際研究会「East Asian Young Astronomers Meeting 2008」報告
赤堀 卓也, 花山 秀和
日本天文学会 天文月報 2009年1月号

< 研究会開催 >

1. 初代星・銀河形成研究会
2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸
世話人: 梅村 雅之, 大向 一行, 須佐 元, 森 正夫, 吉田 直紀
2. Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies
Jan. 14-16, 2009, Univ. of Tsukuba, Tsukuba
世話人: 梅村 雅之, 大向 一行

< 座長 >

1. 梅村 雅之
日本天文学会秋季年会「銀河」セッション, 2008年9月13日, 岡山理科大学, 岡山

< 国際会議発表・海外講演 >

1. Umemura, M. Suwa, T., Susa, H.
First Star Simulations down to CDM Damping Scales
IAU Symposium 255: Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies (June 16-20, 2008, Rapallo, Genova - Liguria, Italy)

2. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H.
Secondary star formation in a Pop III object: Dependence of UV feedback on the mass of source star
IAU Symposium 255: Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies (June 16-20, 2008, Rapallo, Genova - Liguria, Italy)
3. Yasuda, S., Nakamoto, T.
Collision Condition for Compound Chondrule and Compound Cosmic Spherule Formation I : Condition for Coalescence
5th Annual Meeting AOGS (June 16-20, 2008, Busan, Korea)
4. Okamoto, T.
Modelling the suppression of galaxy formation due to a UV-background
The 11th Nottingham-Birmingham Extragalactic Workshop: Semi-analytic models - Are we kidding ourselves? (June 24-25, 2008, Birmingham, UK)
5. Yasuda, S., Nakamoto, T.
Conditions for Compound Chondrule Formation
71st Annual Meeting of the Meteoritical Society (July 26-27, 2008, Kunibiki Messe, Matsue, Japan)
6. Akahori, T., Yoshikawa, K.
Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Linked Region of Abell 399/401
The East Asian Young Astronomers Meeting 2008 (EAYAM2008) (July 27-Aug. 1, 2008, Jiayuguan, China)
7. Sese, R. M., Nakamoto, T., Umemura, M.
Radiative Transfer in Massive Circumstellar Disks
The East Asian Young Astronomers Meeting 2008 (EAYAM2008) (July 27-Aug. 1, 2008, Jiayuguan, China)
8. Umemura, M.
Computational Astrophysics with a Novel Hybrid Simulator "FIRST" (Invited)
International Workshop on Hybrid Architecture Computing 2008 (Oct 1, 2008, Tsukuba, Japan)
9. Mori, M.
Evolution in Lyman-alpha Emitters and Lyman-Break Galaxies
Understanding Lyman-alpha Emitters (Oct. 6-10, 2008, MPIA, Heidelberg, Germany)
10. Shimizu, I., Umemura, M.
Theoretical Model of Lyman alpha Emitters and the Relation to Multi-Wavelength Observations
Understanding Lyman-alpha Emitters (Oct. 6-10, 2008, MPIA, Heidelberg, Germany)
11. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T.
Escape fraction of ionizing photons from high-z Lyman alpha emitters and Lyman break

- galaxies
Understanding Lyman-alpha Emitters (Oct. 6-10, 2008, MPIA, Heidelberg, Germany)
12. Yoshikawa, Y.
Warm-Hot Intergalactic Medium
The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
 13. Akahori, T., Yoshikawa, K.
Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in Merging Galaxy Clusters
The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
 14. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H.
Secondary star formation in a PopIII object: Dependence of UV feedback on the mass of source star
The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
 15. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T.
Escape fraction of ionizing photons from a LAE and LBG
The third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2008) (Nov. 10-13, 2008, Nanjing, China)
 16. Yasuda, S., Nakamoto, T.
Collision condition for Compound Chondrule Formation
Crystallization in The Early Solar Nebula 4.6 Billion Years Ago (Nov. 19-20, 2008, Tohoku University, Miyagi, Japan)
 17. Umemura, M.
Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator "FIRST" (Invited)
Special Astronomy Colloquium, The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
 18. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H.
Application of 3D-RSPH Scheme to the Radiative Feedback by Population III Stars
The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
 19. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T.
3D RT Calculation on the Escape of Ionizing Photons from Forming Galaxies
The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
 20. Sato, D., Umemura, M., Chiba, M.
The Effect of Partial Redistribution on Lyman alpha Photons Escaping from a Primordial Galaxy

- The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
21. Akizuki, C., Umemura, M., Kato, Y.
Three-Dimensional Radiation Transfer Calculation for Magnetic Jets
The Third Cosmological Radiative Transfer Comparison Project Workshop (Dec. 8-10, 2008, Austin, USA)
 22. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H.
"The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps"
Astrophysics Colloquium, Univ. of Texas, Austin (Dec. 11, 2008, Austin, USA)
 23. Mori, M.
Evolution in Lyman-alpha Emitters and Lyman break galaxies
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 24. Okamoto, T.
The baryon fraction of Λ CDM halos in reionized universe
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 25. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H.
Radiative Regulation of Population III Star Formation
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 26. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T.
The Contribution of Lyman alpha Emitters and Lyman Break Galaxies to the IGM Ionization at High Redshifts
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 27. Shimizu, I., Umemura, M.
Theoretical Model of Lyman Alpha Emitters and the Relation to Multi-Wavelength Observations
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 28. Akahori, T., Yoshikawa, K.
Merging Galaxy Clusters Abell 399/401: Dynamical, Thermal, and Chemical Properties
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)
 29. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H.
The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps
Japan-Italy Mini-Workshop on First Stars and First Galaxies (Jan. 14-16, 2009, University of Tsukuba, Japan)

30. Mori, M.
Chemodynamic simulations of galaxy formation and evolution - Model of Lyman alpha emitters -
University Observatory Munich Colloquium, (Jan. 20, 2009, Universitats-Sternwarte Munchen, Ludwig Maximilians Universitat, Germany)
31. Mori, M.
Theoretical model of Lyman alpha emitters
Carnegie observatory morning seminar, (March 16, 2009, Carnegie observatory, USA)
32. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T.
The Contribution of Lyman alpha Emitters and Lyman Break Galaxies to the IGM Ionization at High Redshifts
The Cosmic Evolution of Helium and Hydrogen (March 24-27, 2009, Ringberg Castle, Germany)

< 国内講演 >

招待講演

1. 梅村 雅之
「宇宙最初の星」
科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第二回領域シンポジウム
(2008年11月27日～29日, 国立天文台, 三鷹)
2. 梅村 雅之
「次世代計算宇宙物理学」
第21回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008年12月15日～17日, 国立天文台, 三鷹)
3. Umemura, M.
”Cosmic Voyage — The latest picture of the Universe —”
80th Ninomiya House, Evening Forum (Nov. 21, Tsukuba)
4. 梅村 雅之
「宇宙の旅をして宇宙の大きさを知ろう」
竹園東小学校講演会(2008年12月2日, 竹園東小学校, つくば)
5. 梅村 雅之
「銀河の形成と進化」
研究会「R プロセス元素組成の統合的理解 - 宇宙の中の不安定核物理 - 」(2009年3月9日～10日, 筑波大学, つくば)
6. 森 正夫
「ALMA への期待: 銀河の形成」
日本天文学会 2009 年春季年会「ALMA 特別セッション」(2009年3月26日, 大阪府立大学, 大阪)

一般講演

7. 梅村 雅之
「FIRST プロジェクトによる計算宇宙物理学の展開」
第4回「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウムー PACS-CS システムと計算科学ー (2008年4月24日~25日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば)
8. 保田 誠司, 中本 泰史
「複合コンドリュール形成のための衝突条件」
地球惑星科学連合大会 (2008年5月25日~30日, 幕張メッセ, 千葉)
9. 保田 誠司, 中本 泰史
「複合コンドリュール形成のための溶融ダスト衝突条件」
第三回コンドリュール研究会「実験と理論の融合」(7月14日~15日, 東北大学, 宮城)
10. 梅村 雅之
「FIRST プロジェクトによる計算宇宙物理学の展開」
先駆的科学計算に関するフォーラム 2008~天文科学~ (2008年7月21日~22日, 九州大学情報基盤研究開発センター, 福岡)
11. 森 正夫, Rich, R. M.
「アンドロメダの涙」
先駆的科学計算に関するフォーラム 2008~天文科学~ (2008年7月21日~22日, 九州大学情報基盤研究開発センター, 福岡)
12. 諏訪 多聞, 梅村 雅之, 須佐 元, 他 FIRST プロジェクトチーム
「ダークマター・カスプが第一世代天体形成に与える影響」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
13. 長谷川 賢二, 梅村 雅之, 須佐 元, 他 FIRST プロジェクトチーム
「初代星からの紫外線フィードバックについて」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
14. 森 正夫
「原始銀河の進化とライマンアルファエミッターの関係」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
15. 清水 一紘, 梅村 雅之
「Lyman alpha 輝線天体と他波長観測天体との対応関係について」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
16. 矢島 秀伸, 梅村 雅之, 森 正夫, 中本 泰史
「ライマンアルファ・ブロップの電離光子脱出確率と赤外線の性質」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
17. 斎藤 貴之, 馬場 淳一, 松井 秀典, 小久保 英一郎, 和田 桂一, 牧野 淳一郎, 富阪 幸治, 台坂 博, 吉田 直紀, 岡本 崇
「相互作用銀河の初期遭遇時におけるスターバーストと星団形成」
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)

18. 梅村 雅之
Summary 講演
初代星・銀河形成研究会 (2008年, 9月8日~10日, 甲南大学, 神戸)
19. 森 正夫, Michael Rich
「アンドロメダの涙, その昔」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
20. 森 正夫, 矢島 秀伸, 梅村 雅之
「原始銀河の進化とライマンアルファエミッターの関係」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
21. 諏訪 多聞, 梅村 雅之, 須佐 元, 他 FIRST プロジェクトチーム
「ダークマター・カスプが第一世代天体形成に与える影響」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
22. 赤堀 卓也, 吉川 耕司
「Suzaku 衛星で探る衝突銀河団の非平衡電離・2温度プラズマ状態」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
23. 清水 一紘, 梅村 雅之
「Ly α 輝線天体と他波長観測天体との対応関係について」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
24. 矢島 秀伸, 梅村 雅之, 森 正夫, 中本 泰史
「ライマンアルファ・プロップの赤外線特性」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
25. 大須賀 健, 加藤 成晃, 森 正夫, 嶺重 慎
「ブラックホール降着・噴出流の大局的2次元輻射磁気流体シミュレーション」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
26. 加藤 成晃, 大須賀 健, 梅村 雅之, 嶺重 慎
「磁気降着円盤の多波長偏波特性とその観測的検証の可能性」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
27. 秋月 千鶴, 福江 純
「輻射圧優勢ブラックホール風の球対称定常解」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
28. 香西 克紀, 林野 友紀, 中村 有希, 森本 奈々, 中村 江里, 堀江 光典, 山田 亨, 松田 有一,
梅村 雅之
「VIMOS による SSA22z \sim 3 LBG 分光探査」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)
29. 森本 奈々, 林野 友紀, 中村 有希, 香西 克紀, 中村 江里, 堀江 光典, 山田 亨, 松田 有
一, 梅村 雅之
「SSA22 z \sim 3 における形成期銀河の変光探索 II」
日本天文学会秋季年会 (2008年9月11日~13日, 岡山理科大学, 岡山)

30. 齋藤 貴之, 小久保 英一郎, 和田 桂一, 牧野 淳一郎, 富阪 幸治, 岡本 崇, 台坂 博, 吉田 直紀
「相互作用銀河の初期遭遇時におけるスターバーストと星団形成」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 11 日 ~ 13 日, 岡山理科大学, 岡山)
31. 保田 誠司, 中本 泰史
「複合コンドリュール形成のための衝突条件 II: 形状保持条件」
日本惑星科学会 (2008 年 11 月 1 ~ 3 日, 九州大学, 福岡)
32. 長谷川 賢二, 梅村 雅之, 須佐 元
「Radiative Regulation of Population III star formation」
第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008 年 12 月 15 日 ~ 17 日, 国立天文台, 三鷹)
33. 赤堀 卓也, 吉川 耕司
「衝突銀河団の非平衡電離・2 温度プラズマ状態」
第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008 年 12 月 15 日 ~ 17 日, 国立天文台, 三鷹)
34. 矢島 秀伸, 梅村 雅之, 森 正夫, 中本 泰史
「ライマンアルファブロップの赤外線特性」
第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008 年 12 月 15 日 ~ 17 日, 国立天文台, 三鷹)
35. 諏訪 多聞, 梅村 雅之, 須佐 元, 他 FIRST プロジェクトチーム
「ダークマター・カスプが第一世代天体形成に与える影響」
第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008 年 12 月 15 日 ~ 17 日, 国立天文台, 三鷹)
36. 加藤 成晃, 大須賀 健, 梅村 雅之, 嶺重 慎
「多波長偏波特性の輻射輸送計算による磁気流体降着円盤の検証」
第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」(2008 年 12 月 15 日 ~ 17 日, 国立天文台, 三鷹)
37. 梅村 雅之
「銀河と巨大ブラックホールの共進化: Overview」
研究会「巨大ブラックホール天文学: 最新の動向と課題」(2009 年 1 月 20 日 ~ 22 日, 京都大学基礎物理研究所, 京都)
38. 岡本 崇
「The cosmological simulations of co-evolving supermassive black holes and galaxies」
研究会「巨大ブラックホール天文学: 最新の動向と課題」(2009 年 1 月 20 日 ~ 22 日, 京都大学基礎物理研究所, 京都)
39. 森 正夫, 矢島 秀伸, 梅村 雅之
「ライマンアルファエミッターの化学力学進化モデル」
日本天文学会春季年会 (2009 年 3 月 24 日 ~ 27 日, 大阪府立大学, 大阪)
40. 岡本 崇

- 「紫外背景放射が銀河形成に与える影響の定量的評価」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
41. 斎藤 貴之，馬場 淳一，松井 秀典，小久保 英一郎，和田 桂一，牧野 淳一郎，富阪 幸治，
台坂 博，吉田 直紀，岡本 崇
「ASURA による銀河シミュレーション」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
42. 赤堀 卓也，吉川 耕司
「衝突銀河団 1E0657-56 における非平衡電離・2 温度状態の数値実験」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
43. 長谷川 賢二，梅村 雅之，須佐 元，他 FIRST プロジェクトチーム
「第一世代星紫外線フィードバックの星質量依存性 II」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
44. 矢島 秀伸，梅村 雅之，森 正夫
「ライマンアルファエミッターの光学的特性と宇宙再電離との関係」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
45. 三木 洋平，森 正夫
「アンドロメダ・ストリーム」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）
46. 大須賀 健，嶺重慎，森 正夫，加藤 成晃
「大局的輻射磁気流体計算によるブラックホール降着・噴出流の構造の解明」
日本天文学会春季年会（2009年3月24日～27日，大阪府立大学，大阪）

IV. 宇宙観測グループ

教授 中井 直正
 講師 瀬田 益道
 準研究員 永井 誠
 大学院生 15名（数理物質科学研究科後期課程5名、前期課程8名；教育研究科2名）

研究室が発足して5年目となった。国土地理院32m鏡の20GHz帯電波望遠鏡化の整備を引き続き行い、単一鏡として本格的な観測を継続した。また南極ドームふじ基地における天文観測の計画を国立極地研究所と協力しつつ推進し、同時にプロトタイプとして30cmサブミリ波望遠鏡の開発と試験を開始した。準研究員永井誠が着任した。

【1】国土地理院つくば32m鏡の電波望遠鏡の整備と観測

昨年度に雨避けカバーを交換することによって20GHz帯の雑音が数十分の1というほぼ理論値の値になった。それによって天体に向けて観測を行い、アンテナや受信機等の性能測定を初めて行うことができるようになった。本年はそのような性能測定の精密化と観測装置の安定化を行い、オリオン分子雲や銀河面の本格的な観測を開始した。

アンテナのビームパターンを測定するとともに(図1)、惑星を用いた主ビーム能率の値の仰角依存性(図2)、開口能率の値の仰角依存性をより精密に行い、ゲインの仰角毎の補正値の決定なども行った。また開口能率の周波数依存性(図3)から、全鏡面の誤差が $\epsilon = 0.82 \pm 0.03$ mmであり、副鏡や斜鏡の誤差を差し引くと $\epsilon = 0.77$ mm程度となった。

図1. つくば32mアンテナの22.23GHzにおける2次元ビームパターン。横軸が方位角で、縦軸が仰角。

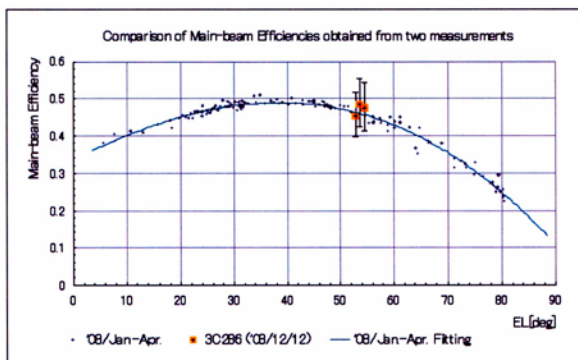
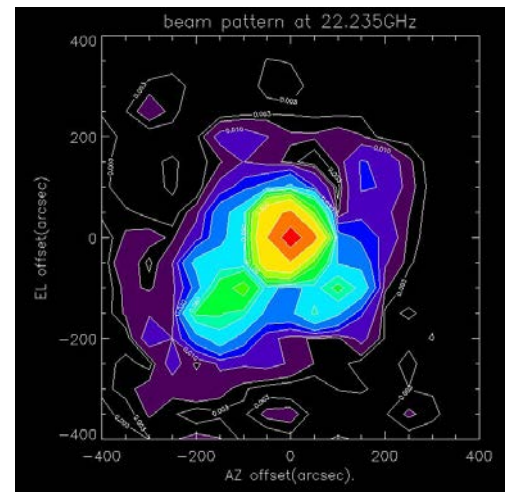


図2. 木星を用いた主ビーム能率の仰角依存性。EL~54度付近の値は連続波源3C286による開口能率から求めたもの。

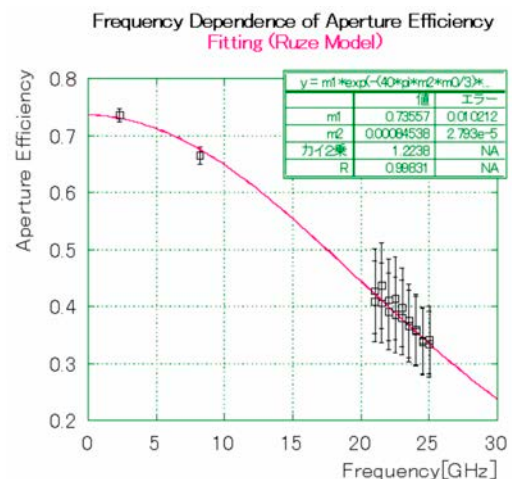


図3. 開口能率の周波数依存性

受信機系の安定化を図った。受信機室（シールド）の空調を性能の良いものに代えて室内温度を安定にし、第2中間変換部を観測局舎の観測室に下ろして温度安定化を図ることで増幅器等のゲインの安定化を実施した。またデジタル電波分光計を既存の空冷から水冷に変えて、安定化した。

観測はアンモニア観測を中心とし、近傍の爆発的星形成銀河 NGC253 と IC342 でアンモニアの複数の遷移を検出して、その強度比から、励起温度、光学的厚み、柱密度、オルソ・パラ比などの物理量を求め、中心部の星形成との関係を調べた。また、オリオン分子雲全体やいて座 B2 を含む銀河面掃天観測を開始した。また銀河系内の大質量星形成領域である W3 のアンモニアマッピングを行い、大質量形成との関係を明らかにした。

銀河系内の多数のコンパクト電離領域を連続波電波と再結合線で観測し、電離領域の温度を求め、銀河系中心からの距離の関数として求めたところ、銀河の内側に近いほど温度が低いことがわかった。これは内側ほど重元素が多いので、それによる冷却がより強く効いているためと考えられる。

【2】南極望遠鏡計画の推進

南極大陸の昭和基地から約 1000 km 内陸側の高原地帯にある日本のドームふじ基地において南極天文学の開拓を目指している。10 m 級の望遠鏡設置に先駆け、現在、プロトタイプとして 30 cm サーベイ望遠鏡を開発している。30 cm 望遠鏡は、星間物質の主要なプローブである CO 及び[CII]輝線、また、星間塵の放射する 500 GHz 帯の連続波を観測する装置であり、天の川の掃天観測及び近傍銀河の観測を目指している。30 cm 鏡は 500 GHz 帯の高感度受信機を搭載し、既存サーベイデータを有効に活用できるように 9 分角の空間分解能を有している。南極への運搬と現地人力での組み立てを考慮して、全システムは、60 kg 以下に分割できる構成を特長としている。今年度は、望遠鏡システムを完成させ、スイスにて動作試験を行った。

昨年度までに、高い観測感度の性能実証を終えていた超伝導素子を用いた冷却受信機部に引き続き、今年度は、アンテナ光学系、及び受信機バックエンド系を完成させ、望遠鏡全システムを完成させた。筑波大学構内において、望遠鏡の動作試験を行い、各種機器の正常動作、星の追尾性能に問題が無いことを確認した。その後、2009 年 1 月にスイスアルプスのユングフラウヨッホにあるスフィンクス天文台に望遠鏡を持ち込み試験観測を行った。試験観測においては、4 人の人力による望遠鏡の組み立て、寒冷 (-20°C) な高地 (3600 m) における望遠鏡の動作、角度分解能 9 分角に対する十分な指向精度を星の追尾観測で確認した。さらに、大気の透過率の測定も行い、500 GHz 帯の電波を受信することに成功した。特に、高い標高の地において、冷却効率の低下が懸念されていた電波分光計が、冷媒冷却装置の採用により安定動作したことは南極高地での運用に向けての一步前進である。しかしながら、スイスでの一ヶ月程の試験観測期間の大半は悪天候による観測不能日であり、500 GHz 帯の天体観測を行うことはできなかった。今後は、今年度の試験で判明した、不要雑音の低減、冷却性能の改善、及び組み立て調整作業の改良に取り組み、平成 21 年度に予定されている、南米チリでの本格的な試験観測に備える。



図 4. 完成した 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡

また、南極天文学の推進組織として発足させた南極天文コンソーシアムの活動を、東北大学等と

協力して継続している。国立極地研究所への申請協議の結果、南極天文学は、国立極地研究所の次期（第 VIII 期）の課題として採択された。資金確保やドームふじ基地拡充の規模の協議等の課題は残るが、正式課題に採択された意義は大きく、平成 21 年 1 1 月出発予定の第 5 1 次南極観測隊の同行者枠に続き、次期計画初年度の第 5 2 次南極観測隊では天文関係者 2 名程度の観測隊員としての人員派遣が見込まれている。いよいよ南極天文学が現実化した。

【3】銀河の観測的研究

距離約 79Mpc にある円盤銀河 IC1481 の活動的銀河中心核(AGN)から出ている超強力水メーザーを VLBA で観測した結果、半径が $r=2.8-14.0$ pc、厚さが $2H=1.5-4.1$ pc、回転速度が $V_{\text{rot}}=124-168$ km/s、速度分散が $\Delta V=31$ km/s である分子ガス円盤を発見した。この円盤の回転曲線は式

$$V_{\text{rot}} \propto r^{-(0.19 \pm 0.04)}$$

で表わされ、中心から離れるほどケプラー回転よりも有意にゆっくりと速度が減少している。この回転曲線を円盤の質量と中心にあるブラックホールの質量によるものとするモデルで計算すると、それぞれの質量は $M_{\text{disk}}=(4.3 \pm 0.3) \times 10^7 M_{\odot}$ と $M_{\text{BH}} < 10^7 M_{\odot}$ となり、円盤の質量だけで説明できるとともにブラックホールの質量の上限値を与えることができた。この結果はガス円盤が静水圧平衡よりもはるかに厚いことも合致している。また円盤に垂直方向にその片側に連続波電波のジェットも検出した。

< 論 文 >

(査読論文)

1. Sorai, K., Habe, A., Nishitani, H., Hosaka, K., Watanabe, Y., Miwa, S., Ohishi, Y., Motogi, K., Minamidani, T., Awano, J., Sumida, S., Fukuya, Y., Uchida, R., Kaneko, N., Fujimoto, M. Y., Koyama, Y., Kimura, M., Nakai, N.
“Large-scale NH₃ Observations toward the Galactic Star Forming Regions I. W51 Molecular Clouds Complex”
Publ. of Astron. Soc. Japan, 60, 1285-1296 (2008).
2. Tanaka, K., Kamagai, K., Nagai, M., Oka, T.
“A Large Expanding Molecular Arc in the Sagittarius B1 Complex”
Publ. of Astron. Soc. Japan, 61, 461-469 (2009)
3. Mamyoda, K., Nakai, N., Yamauchi, A., Diamond, H., Hure, J. M.
“Detection of a Sub-Keplerian Water Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of the Galaxy IC 1481”
Publ. of Astron. Soc. Japan, in press.

(国際研究会集録等)

1. Combes, F., Davies, R. L., Sadler, E. M., Dekel, A., Franx, M., Gallagher, J. S., Karachentseva, V., Knapp, G. R., Kraan-Korteweg, R. C., Leibundgut, B., Nakai, N., Narlikar, J. V., Rubio, M. 2008
“Commission 28: Galaxies”, in *Transactions IAU*, Vol. 4, Issue 27A, *Reports on Astronomy 2006-2009*, ed. Karel van der Hucht (Cambridge University Press, Cambridge), p. 286-294.

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 萩原健三郎

「Development of a Wideband Software Spectrometer and a Study of the Ammonia Absorption Line of the Galaxy NGC 3079」

(修士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 荒井 均

「広帯域デジタル電波分光計の安定化」

2. 扇野光俊

「つくば 32m 電波望遠鏡によるオリオン KL 天体のアンモニア観測」

3. 平井克明

「つくば 32m 電波望遠鏡の連続波観測システムの開発」

4. 丸山理樹

「つくば 32m アンテナの性能評価と天体電波強度較正」

(修士論文) 教育学研究科・教科教育専攻

1. 大城 航

「大質量星形成領域 W3 のアンモニア観測」

2. 永井 里

「大質量星形成に伴う電離領域の再結合線観測」

(卒業論文)

1. 榎原崇雄

「銀河 NGC253 中心部の NH₃分子ガスの観測的研究」

2. 石崎剛史

「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の光学ポインティング法の開発」

3. 佐藤皓紀

「渦状銀河における回転曲線の質量に関する考察」

4. 末永拓也

「アンモニア観測によるおうし座星形成分子雲の進化の研究」

5. 高柳星佳

「つくば 32m 電波望遠鏡による銀河 IC342 中心部のアンモニア観測」

6. 中野将義

「南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡光学系の性能評価」

<学会発表>

1. 中井直正、瀬田益道、田口真

「南極ドームふじ基地における電波天文観測」

日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (2008 年 5 月 29 日)

2. 瀬田益道、中井直正、田口真

「南極天文学開拓のための可搬型 30cm サブミリ波望遠鏡の開発」

- 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (2008 年 5 月 29 日)
3. 岡朋治、性全謙仁、永井誠、亀谷和久、田中邦彦
「ASTE による銀河系中心領域 CO J=3-2 広域観測 (II)」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 11 日)
 4. 永井誠、平畑武文、岡朋治、亀谷和久、田中邦彦
「銀河系中心領域内の高速度コンパクト雲の物理状態」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 11 日)
 5. 田中邦彦、岡朋治、永井誠、亀谷和久
「Sagittarius B1 領域の膨張 CO Expanding Arc と X 線中性鉄輝線ソース周囲の SiO シェル」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 11 日)
 6. 山本智、新保謙、芝祥一、Ling Jiang、坂井南美、杉村美佳、森田将、椎野竜哉、山倉鉄矢、
前澤裕之、入交芳久、Ananthasubramanian Palani
「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ボロメータミクサ受信機の開発」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 12 日)
 7. 山倉鉄矢、中井直正、瀬田益道、前澤裕之、水野亮、長濱智生、芝祥一、新保謙、山本智
「準光学的ホットエレクトロンボロメータミクサの開発」
日本天文学会秋季年会 (2008 年 9 月 12 日)
 8. 山本智、Ling Jiang、椎野竜哉、芝祥一、新保謙、杉村美佳、坂井南美、山倉鉄矢、前澤裕之、
入交芳久、PalaniAnanthasubramanian
「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ボロメータミクサ受信機の開発(II)」
日本天文学会春季年会 (2009 年 3 月 26 日)
 9. 前澤裕之、水野亮、長濱智生、小林和宏、森部那由多、山本智、Li Jiang、芝祥一、山倉鉄也、
入交芳久
「パルスチューブ冷凍機をもちいた HEBM/QCL 受信機システムの開発」
日本天文学会春季年会 (2009 年 3 月 26 日)
 10. 藤健健太、ほか大学 VLBI 連携観測グループ
「大学 VLBI 連携観測の現状について」
日本天文学会春季年会 (2009 年 3 月 26 日)

<外部資金>

(学 内)

1. 学内プロジェクト研究 (特別助成研究): 瀬田益道 (研究代表者)、中井直正、山内彩
「南極天文学開拓に向けてのサーベイ望遠鏡の開発」
(交付額 150 万円) (3/3 年)

(学 外)

1. 科学研究費補助金 (基盤研究 A): 瀬田益道 (研究代表者)、中井直正、山内彩
「南極天文学を切り開くサブミリ波サーベイ望遠鏡の開発」
(交付額 910 万円) (2/3 年)
2. 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、山内彩
「天の川のアンモニア掃天観測」

- (交付額 2070 万円) (1/5 年)
3. 国立極地研究所共同研究：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大気構造の研究」
(交付額 9 万 9 千円) (1/3 年)
 4. 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—先端的天文学研究の推進—」
(交付額 565 万 8 千円) (1/1 年)
 5. 自然科学研究機構国立天文台共同研究：中井直正（研究代表者）
「南極プロトタイプ望遠鏡によるサブミリ波銀河面サーベイ」
(交付額 112 万円) (1/1 年)
 6. 東レ科学技術研究助成金：瀬田益道（研究代表者）、中井直正、山内彩
「南極天文学の開拓」
(交付額 347 万 1 千円) (2/2 年)

<共同研究・受託研究>

1. 「南極プロトタイプ望遠鏡によるサブミリ波銀河面サーベイ」
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2008年8月29日～2009年3月31日）

<受賞>

1. 2008 年度日本学士院賞（2008 年 6 月 9 日）、中井直正
「水メーザー源の VLBI 観測による活動的銀河中心核と巨大質量ブラックホールの研究」

V. 原子核理論グループ

教授 矢花 浩
講師 橋本幸男
準研究員 稲倉 恒夫
大学院生 6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)

原子核を系統的に計算する為には、対相関と変形の効果を取り入れる事が重要である。我々は超伝導の理論としてよく知られた BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論を時間依存の方法へ拡張し、三次元座標空間のメッシュ表示を用いた実時間発展のプログラム開発を行なった。重い原子核に重要な核子超流動性を取り入れた記述を可能にし、線形応答の実時間計算や重イオン反応計算などに利用する事を目的とする。昨年度には簡単なエネルギー汎関数によるテスト計算を実行したが、今年度は現実的な Skyrme 有効相互作用を導入し、そのプログラムがほぼ完成した。Z=10~20 の安定核のアイソベクター型双極子の強度分布関数をそのテストとして計算し、対相関の効果などを確かめた。現在はより重い核種の計算を可能とし、本格的な系統的計算への準備を行なっている。

(2) 時間依存密度汎関数理論による原子核の応答関数の系統的計算

(稲倉、中務(理研)、矢花)

安定核、不安定核を分け隔てる事なく広範囲に亘って原子核の光核反応の断面積を求める系統的計算を質量数 100 領域まで進めた。光核反応は、元素組成が起きていると考えられている超新星爆発の r 課程に深く関係しており、また放射性廃棄物をクリーンな核に効果的に変換するのに重要な役割を果たす物理量である。微視的な観点から見ると、光核反応は電気双極子モードと呼ばれる、最も単純な集団励起モードで表現される。最も単純な集団励起モードなので、このモードから多くの原子核の性質を引き出せるのだが、実験で観測されているのは安定核の一部だけであり、不安定核では皆無である。このモードを系統的に計算する事で、今後の実験の指針を与えるだけでなく、まだよく分かっていない核力の解明にフィードバックを提供する事も、この計算の目的である。これまでの計算で、幾つかの興味深い結果が得られた。以下にその幾つかを列挙する。不安定核では、巨大共鳴のピークエネルギーが安定核の実験から得られた半経験則からずれ、そのズレには特定の一粒子軌道が関係している事が分かった。また、原子核が変形すると振動方向が長軸方向と短軸方向の二つに分かれるのだが、それぞれの巨大共鳴のピークエネルギーの差が、基底状態の変形度と深く関係している。これは過去に簡単なモデルで、示されていた事であるが、微視的な理論計算で、この事を確認した。現在、この系統的計算を実行している計算コードに、超流動性(対相関)の効果を取り入れるべく、計算コードを拡張している。

(3) 原子核の三次元的回転運動の理論

(橋本、堀端 (青森大))

有限量子系である原子核は様々な集団運動のモードを持っている。回転運動は、その中でも最も顕著な集団運動の例である。原子核平均場は密度分布と緊密に関係している (nuclear

self-consistency) ので、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行われてきた。クランキング模型に基づくこの考え方は、原子核の回転スペクトルの構造とその背景にある力学について説明する上で、定性的にも定量的にも成功してきた。一方、理論的な立場からは、主軸のまわりの回転運動だけではなく、より一般的な回転運動の存在が期待されている。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。ウォブリング(wobbling)と呼ばれるこの揺動運動は回転軸が平均場の主軸から離れて才差運動のように動き出すことを意味している。本研究では、ウォブリング運動のような三次元的な回転運動が原子核において生じる力学的機構を微視的に理解することを目的としている。

今年度は特にオスミウム ^{182}Os の傾斜角回転 (tilted axis rotation; TAR) と呼ばれるモードを中心に一粒子構造を調べた。角運動量を $J = 1\ 2$ から $J = 3\ 0$ までの範囲で TAR モードの系統性を確認し、P. M. Walker らの実験で得られた K 量子数が 8 のバンドに相当するモードであると期待される。この TAR モードは、主軸回転運動を仮定した計算では出てこないモードであり、主軸 (x 軸) まわりの回転運動に対応するイラスト線に対して、新しいタイプのイラスト線になっている。一粒子構造では、我々の現在のモデルでは陽子の負パリティに属する準粒子が主として TAR モードに寄与していると考えられるが、P. M. Walker らのモデルでは主たる寄与は中性子側から来ていることになる。この相違点は、モデルの refinement を今後行う中で明らかにしていく。一方、対称軸 (z 軸) まわりの励起モードである歳差運動では、TAR モードと異なり、中性子側の準粒子が支配的な寄与をすることになる。今後、チルト角に対する一連の内部構造の変化をまとめていく。

(4) Gogny 力を用いた時間依存 HFB コードの開発 (橋本、笹倉)

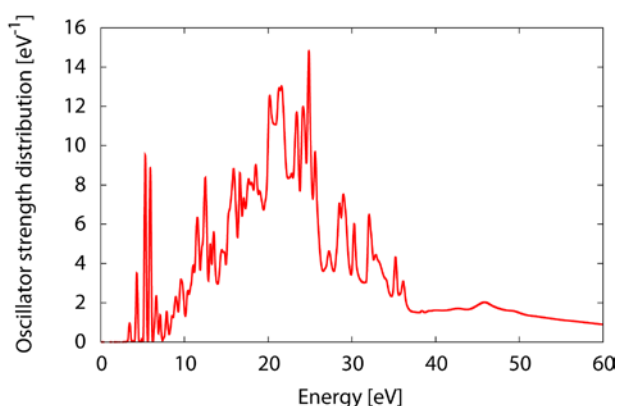
我々は、Gogny 力を用いた時間依存 HFB (TDHFB) 方程式を微小振幅の場合に解くことにより、QRPA に相当する計算を行うコードを開発している。目的は、Skyrme 力+ゼロレンジ対相関の計算と比較しつつ軽い不安定核から始めて不安定核の系統的な励起状態の情報を蓄積することである。酸素などの球形核の場合から始め、今年度はマグネシウムの同位体について四重極型および双極型振動運動を対象に TDHFB 方程式を解いて強度関数などを求めた。Gogny 力を用いた場合、マグネシウムは質量数 $A = 3\ 4$ より大きい場合はプロレート型に変形するので、今回の計算は変形状態の上で QRPA に相当する。四重極型振動 ($2+$) の場合、低励起エネルギー部分のピークは 0.9 MeV に現れる。一方、実験値は 0.685 MeV であり、計算値は若干大きく出ている。他の同位体についても同様な傾向があり、これは基底状態の空間が狭いままであることからきていると思われる。数値的に重くなるクーロン力の適切な取り扱いとともに、基底状態の空間を広げた効率の良いコードに改良を行っている。また、今までは考慮していなかった変形核の回転運動の影響を取り入れられるように枠組みを広げる方向を検討している。

【2】時間依存密度汎関数理論による物質の光応答

(1) フラレーンの光応答計算

(川下、矢花、中務(理研)、野田(分子研)、信定(分子研))

原子から固体に至る中間相とみなせる物質である C_{60} に対して、時間依存密度汎関数理論による振動子強度計算を行った。超並列計算機を用い、広大な空間領域で応答を計算することにより、可視から軟 X 線領域に至る振動子強度の全体像を明らかにした。その結果、原子の位置を固定した計算では 35eV 程度の高い励起エネルギー領域まで幅の狭い共鳴状態が現れることが明らかになった。分子振動に関する平均化を考慮するものとして、得られたスペクトルをエネルギーについて平滑化することにより、実験で測定されている振動子強度分布を高い精度で再現することを示した。



(2) 強レーザー場中で起こる分子のクーロン爆発 (川下、矢花、中務(理研))

これまで調べてきた N_2 分子に加え、 H_2S 分子、及びフラーレン C_{60} 分子に対するクーロン爆発を調べた。 H_2S 分子のクーロン爆発過程に対する実験研究では、分解後のイオンの運動量と運動エネルギーの分布から、クーロン爆発メカニズムに関する情報が得られている。この分子に対して、時間依存密度汎関数理論に基づく計算を行った。実験では、ある強度のパルスレーザーを照射した場合の分解の様子を調べているが、計算では同じ強度のパルスレーザーを照射した場合、分子軸とレーザーの偏光方向によって、異なる個数の電子が放出されてしまう。このため、我々の計算では、分子軸と、イオン化の荷数、例えば3個の電子が放出する場合を考え、そのような終状態となるようレーザー強度を固定し、その上でイオンの運動量や運動エネルギーを調べ、実験との比較を行った。その結果、分子軸とイオン化の起こりやすさの関係については、計算と測定結果は良い相関を示した。また、爆発後のイオンの運動エネルギーと分子軸の角度についても計算と測定結果は良い相関を示している。しかし、爆発後の分子軸の角度と、レーザーの偏光方向の相関については、実験と逆の相関を持つことがわかり、今後さらに検討が必要である。

高強度超短パルスレーザーによる C_{60} 分子のクーロン爆発に至るダイナミクスについても、予備的な計算を行った。実験研究から分子振動の四重極モードの重要性が指摘されていたが、計算によれば四重極モードに加え、1重、2重結合の原子間距離が振動するモードも強く励起されることが見出された。

(3) コヒーレントフォノン生成メカニズムの解明 (篠原、川下、岩田、矢花)

結晶と高強度超短パルスレーザーの相互作用で起こる現象の一つに、コヒーレントフォノンがある。これは、光の波長程度の空間領域にわたりイオンが位相をそろえて振動をする現象である。我々は時間依存密度汎関数理論を用い、電子とイオンのダイナミクスを同時に記述し、このコヒーレントフォノン生成メカニズムに関する第一原理計算による記述を試みた。最初の例として、ダイヤモンドをとり計算を行った。実験では、結晶軸とレーザーの偏光方向について、ラマン散乱と同じ選択則が現れることが知られており、計算でも同様の選択則が得られることを確認した。また、計算では、レーザーパルスの照射中に限りイオンに力が働く瞬間誘導ラマン散乱のメカニズムを示しており、これは実験で得られているコヒーレントフォノンの位相の情報と一致している。さらに計算から得られる情報に、加えたレーザーパルスに対するコヒーレントフォノンの振幅の絶対値、レーザーから電子へのエネルギー移行(これは最終的に多くが熱的な

フォンのエネルギーとなると考えられる)と、コヒーレントフォノンへのエネルギー移行の割合などがある。後者に関しては、計算値は1:2000という結果であった。

今後の課題として、今回の計算が対象とした瞬間誘導ラマン散乱のメカニズムに加え、電子の実励起を伴う生成メカニズムを調べること、コヒーレントフォノンの振幅の絶対値が測定されている物質で、計算値を比較することなどを行う予定である。

<学位>

1. 理学修士:

並木翔平

「時間依存密度汎関数理論による強レーザー場と表面の相互作用に関する研究」

<発表論文>

1. Oscillator strength distribution of C60 in the time-dependent density functional theory
Y. Kawashita, K. Yabana, M. Noda, K. Nobusada, T. Nakatsukasa
J. Mol. Struct. THEOCHEM, in press
2. Time-dependent density-functional theory simulation for electron-ion dynamics in molecules under intense laser pulses
Y. Kawashita, T. Nakatsukasa, K. Yabana
J. Phys. Cond. Matter 21 (6) 064222 (2009/Feb/11)
3. First-principles calculation of the electron dynamics in crystalline SiO₂
T. Otobe, K. Yabana, J.-I. Iwata
J. Phys. Cond. Matter 21 (6) 064224 (2009/Feb/11)
4. Time-dependent description for nuclear reaction dynamics in the continuum
K. Yabana, T. Nakatsukasa, M. Ito
Few-Body Systems 43 (1-4) 247-253 (2008/Dec)
5. First-principles electron dynamics simulation for optical breakdown of dielectrics under and intense laser field
T. Otobe, M. Yamagiwa, J.-I. Iwata, K. Yabana, T. Nakatsukasa, G.F. Bertsch
Phys. Rev. B 77 (16) 165104 (2008/Apr)
6. Time-dependent approaches for reaction and response in unstable nuclei
T. Nakatsukasa, K. Yabana, and M. Ito,
Eur. Phys. J. Special Topics 156 (2008) 249-256.
7. TDDFT approach to photoabsorption in even-even nuclei
T. Nakatsukasa, T. Inakura, and K. Yabana,

Int. J. Mod. Phys. A24, 2159–2167 (2009).

8. Stochastic approach to correlation beyond the mean field with the Skyrme interaction
T. Nakatsukasa, S. Shinohara, H. Ohta, and K. Yabana,
Proceedings of the international nuclear physics conference (INPC2007);
Nucl. Phys. A805, 347–349 (2008).
9. Systematic Study of Electric Dipole Excitations with Fully Self-consistent HF plus RPA from Light to Medium-Mass Deformed Nuclei
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Proceedings of the Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atom Masses (EANM08),
to be published in Eur. Phys. J. A

<国際会議発表>

1. TDDFT for fermionic dynamics: Coulomb vs nuclear systems
K. Yabana
JUSTIPEN-EFES-Hokudai-UNEDF meeting, July 21–25, 2008, Onuma, Japan.
2. Dynamics in dielectrics induced by ultrashort laser pulses
K. Yabana
Time-dependent density-functional theory: prospects and applications,
Benasque, Spain, Aug. 31–Sept. 15, 2008.
3. Time-dependent mean-field theory in nuclear and electronic systems
K. Yabana
6th Japan-Italy Symposium on Heavy-Ion Physics, Nov. 11–14, 2008, Tokai, Japan.
4. First-principles simulation for electron-ion dynamics in molecules and dielectrics under an Intense laser pulse
K. Yabana
COAST/CORAL Symposium on Ultrafast Intense Laser Science in Karuizawa, March 12–14, 2009, Karuizawa, Japan.
5. TDDFT simulation for electron-ion dynamics in molecules under intense laser pulse
Y. Kawashita, T. Nakatsukasa, K. Yabana
International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, May 31 – June 3, 2008
National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo
6. Response functions in the continuum of deformed nuclei studied with the time-dependent density-functional calculations
T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yabana

- Talk at Franco-Japanese Symposium "New Paradigms of Nuclear Physics"
(Paris, France, September 29-October 2, 2008).
7. Finite amplitude method and systematic studies of photoresponse in deformed nuclei
T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yabana
Talk at Arctic FIDIPRO-EFES Workshop: Future Prospects of Nuclear
Structure Physics
(Saariselka, Finland, April 20-24, 2009).
 8. Finite amplitude method and systematic studies of photoresponse in deformed nuclei
T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yabana
Talk at International Conference on "Nuclear Structure and Dynamics"
(Dubrovnik, Croatia, May 4-8, 2009).
 9. Systematic study of electric dipole responses from Oxygen to Nickel isotopes with
self-consistent Skyrme-HF plus RPA
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Hokudai-TORIJJIN-JUSTIPEN-EFES workshop and JUSTIPEN-EFES-Hokudai UNEDF meeting (Onuma
Park, Hokkaido, 2008. 7. 21-25)
 10. Systematic Study of Electric Dipole Excitations with Fully Self-consistent HF plus RPA
from Light to Medium-Mass Deformed Nuclei
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
ENAM08, The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atom Masses (Ryn, Poland,
2008. 9. 7-13)
 11. Systematic Study of Electric Dipole Excitations with Fully Self-Consistent Skyrme HF plus
RPA from Light to Medium-Mass Deformed Nuclei
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
CNS-RIKEN Joint International Symposium on "Frontier of gamma-ray spectroscopy and
Perspectives for Nuclear Structure Studies (gamma08)" (RIKEN, 2008. 4. 3-5)
 12. Systematic Study of Electric Dipole Excitations with Fully Self-Consistent Skyrme HF+RPA
from Light to Medium-Mass Deformed Nuclei
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
Nuclear Structure 2008 (MSU, Michigan, USA, 2008. 6. 3-6)
 13. Nuclear mean-field dynamics and three-dimensional nuclear rotation
Y. Hashimoto,
The sixth China-Japan Crossover Science Symposium (中国鄭州, Oct. 24-28)
 14. GCM description of rotational motions in 1820s (poster),
Y. Hashimoto and T. Horibata,
Nuclear structure 2008 (Jun. 3-6, Michigan state university, USA)

15. Some noticeable aspects of tilted axis rotation in 1820s (poster),
Y. Hashimoto and T. Horibata,
The fifth international conference on exotic nuclei and atomic masses (ENAM)
(Sept. 7-13, 2008, Ryn, Poland)
16. 「Real-time calculations of response function with TDHF+BCS」
江幡修一郎
GAMMA08 (理研 仁科ホール, 2008.04.03 - 04.05)

<国内研究会・学会等>

1. 密度汎関数理論の多彩なフロンティア
矢花一浩
「原子核物理学の展望」研究会、2008年11月26-27日、理研
2. フェムト・アト秒ダイナミクスの計算科学
矢花一浩
第2回極限コヒーレント光科学ワークショップ「極限波長 領域における光科学の新展開」、
2009年3月2-3日、東大物性研
3. TDDFT：電子の動きを記述する量子シミュレータ
矢花一浩
ナノ統合拠点物性科学WG連続研究会「TDDFT：光応答計算の基礎、応用と展開」、
2009年3月18日キャンパスイノベーションセンター東京
4. 光に起因する電子・イオンダイナミクスに対する実時間シミュレーション法の開発
矢花一浩
特定領域研究「次世代量子シミュレータ・量子デザイン手法の開発と応用」
平成20年度成果報告会、2009年3月23-25日、大阪大学銀杏会館
5. フェルミ粒子系ダイナミクスの量子シミュレーション
—時間依存密度汎関数理論の最近の発展—
矢花一浩
早稲田大学武田研究室セミナー、2008年10月31日
6. フェルミ粒子系ダイナミクスの量子シミュレーション
矢花一浩
東京理科大学鈴木研究室セミナー、2008年10月8日
7. 時間依存密度汎関数理論による光応答計算
矢花一浩
第4回「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム「PACS-CS システムと計算科学」2008年4月24-25日、筑波大学計算科学研究センター

8. Electron dynamics simulation in dielectrics induced by intense and ultrashort laser pulses
K. Yabana
次世代ナノ情報機能・材料グループ成果発表会、2008年12月10-11日、
東北大学金属材料研究所

9. 時間依存密度汎関数法によるクーロン爆発過程の第一原理シミュレーション
川下洋輔、中務孝、矢花一浩
第2回分子科学討論会2008 福岡、福岡国際会議場 2008.9.24-27

10. 強レーザーパルスによる分子のクーロン爆発過程に対する第一原理シミュレーション
川下洋輔、中務孝、矢花一浩
日本物理学会第64回年次大会 立教大学、立教池袋中学・高校 2009.3.27-30

11. 実時間-実空間法による分子ダイナミクスの第一原理シミュレーション
—大規模並列計算へ向けてのアプローチ—
川下洋輔、中務孝、矢花一浩
次世代スーパーコンピューティングシンポジウム2008 MY PLAZA ホール 2008.9.16-17

12. 時間依存密度汎関数理論によるコヒーレントフォノン生成の記述
篠原康 矢花一浩 川下洋輔 岩田潤一 乙部智仁
日本物理学会第64回年次大会 (立教大学、立教池袋中学・高校 2009.3.27 - 3.30)

13. 時間依存密度汎関数理論によるコヒーレントフォノン生成の記述
篠原康 矢花一浩 川下洋輔 岩田潤一 乙部智仁
第56回応用物理学関係連合講演会 (筑波大学 2009.3.30 - 4.2)

14. Systematic study of electric dipole strength with self-consistent Skyrme-RPA calculation
稲倉恒法, 中務孝, 矢花一浩 (日本物理学会、山形大学、2008.9.20-23)

15. Gogny 力を用いた TDHFB 法による軽い核の微小振幅応答
橋本幸男
千葉大学理学部原子核理論研究室セミナー 2008年7月16日

16. 182O s における傾斜角回転状態の一粒子構造
橋本幸男、堀端孝俊 (日本物理学会、山形大学、2008.9.20-23)

17. 182O s における TAR 状態と t バンド
橋本幸男、堀端孝俊 (日本物理学会、立教大学、2009.3.27 - 3.30)

18. 軽い核における回転運動を含めた時間依存HF B 計算
笹倉啓介、橋本幸男、稲倉恒法、矢花一浩 (日本物理学会、立教大学、2009.3.27 - 3.30)

19. TDHF+"BCS" approach to response functions in deformed nuclei
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
JUSTIPEN Presymposium (北海道大学, 2008.07.18 - 07.25)
20. TDHF+"BCS" を用いた線形応答計算
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
原子核三者若手夏の学校 (国立オリンピック記念青少年総合センター 2008.08.19 - 08.24)
21. TDHF+"BCS" approach to response functions in deformed nuclei
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
CNS International Summer School (理研 仁科ホール, 2008.8.26 - 9.1)
22. Skyrme-TDHF+BCS を用いた線形応答計算
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 2008 年秋季大会 (山形大学, 2008.9.20 - 9.23)
23. Skyrme-TDHF+BCS を用いた線形応答計算 II
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 第 64 回年次大会 (立教大学, 2009.3.27 - 3.30)
24. Real-time calculations of response function with TDHF+BCS
江幡修一郎
原子核三者若手夏の学校 (国立オリンピック記念青少年総合センター 2008.08.19 - 08.24)

VII – 1. 凝縮系理論グループ

教授	有光 敏彦, 初貝 安弘
准教授	谷口 伸彦, 宮崎 州正
助教	吉田 恭
研究科特別研究員	有川 晃弘
学振ポスドク	池田 昌司
博士前期課程大学院生	3名
博士後期課程大学院生	5名
社会人早期修了プログラム	1名
学群生(卒業研究)	3名
研究留学生	1名

【1】 間欠性を呈する流動系の非平衡統計物理

- (1) マルティフラクタル確率密度関数理論 (MPDFT) (有光) 著書 [1],
 解説・紀要 [1], 講演 [1, 4, 5, 8, 10, 11]

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ティ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。

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 $l_{in} \delta^{-n}$, $n = 1, 2, 3, \dots$) 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。

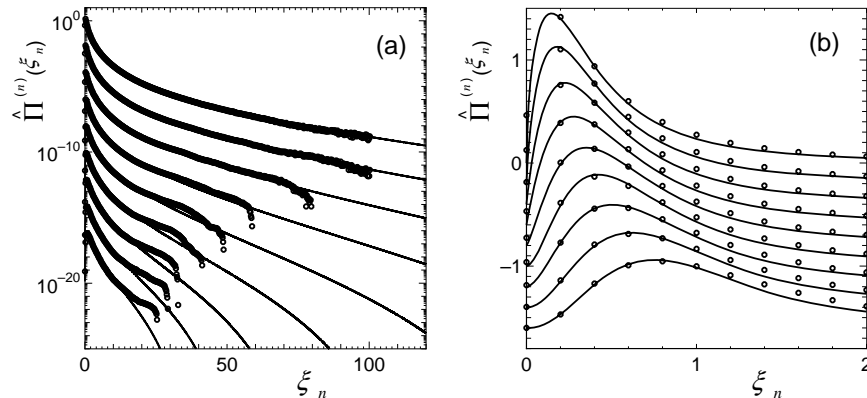


図 1: The PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 2^{1/2}$ on (a) log and (b) linear scale. Open circles are the DNS data points. Solid lines represent the curves given by the present theory with $\mu = 0.345$. Note that $q = 0.068$. For better visibility, each PDF is shifted by -2 unit along the vertical axis in (a) and by -0.2 unit along the vertical axis in (b).

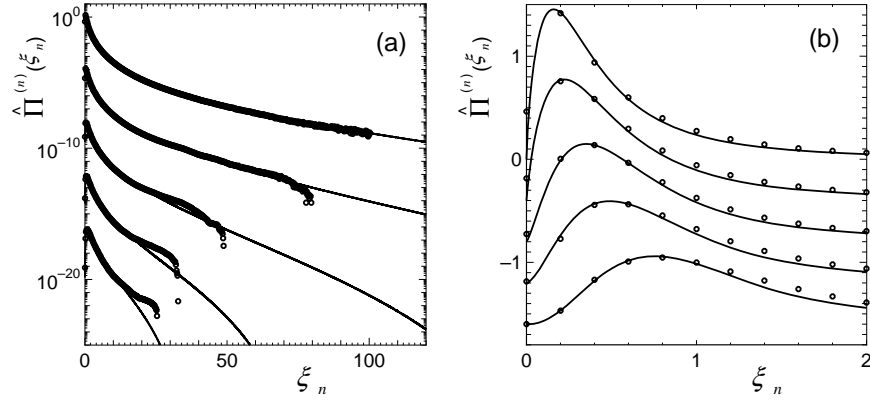


図 2: The PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 2$ on (a) log and (b) linear scale. Open circles are the DNS data points. Solid lines represent the curves given by the present theory with $\mu = 0.345$. Note that $q = 0.568$. For better visibility, each PDF is shifted by -4 unit along the vertical axis in (a) and by -0.4 unit along the vertical axis in (b).

乱流の時系列データやある時刻における乱流のスナップショットより、特異性を示す物理量（速度差，圧力差，エネルギー散逸率，エネルギー輸送率など）の確率密度関数（PDF）を抽出する。その際，抽出 2 点間距離（時間的，空間的）や粗視化領域の直径をズーム率 δ で変化させて一連の PDF を得て解析を行う。ところで，ズーム率を決めるのは観測者である。従って，ひとつの乱流系データからズーム率を変えて PDF を抽出した場合，その乱流系の物理量は同じ値を示すべきである。

従来は $\delta = 2$ の PDF シリーズしか提供されなかったが，最近では高 Reynolds 数での風洞実験データや大規模サイズの乱流の直接数値実験（DNS）がなされ，ズーム率 δ の異なる PDF 列が得られるようになった。そこで，MPDFT の理論体系におけるズーム率 δ が物理量の値に顕に依らない形で理論体系が構成できるか否かを再検討したところ，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を

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

の形に拡張すべきであることが判明した。MPDFT 理論体系自身がそれを指し示していたのである。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。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・石原グループからエネルギー散逸率 PDF とエネルギー輸送率 PDF の提供を受け，新しいスケーリング関係式が上記の物理的要請を満たしているかについて検証を行い，ポジティブな結果を得た。図 1 と図 2 に，それぞれ， $\delta = 2^{1/2}$ と $\delta = 2$ の場合におけるエネルギー散逸率 PDF の解析結果を載せてある。この乱流 DNS 系の間欠性指数が $\mu = 0.345$ であることが，何れの解析からも得られ，新しいスケーリング関係式の検証に成功した。

新しいスケーリング関係式 (1) は、『十分発達した乱流は，可能な値 δ を有する δ スケール・カントール集合の集合体である』という新しい解釈を提供している。この解釈に関しては，次項で触る。

(2) n^∞ 周期軌道のベキ的不安定性と特異性スペクトルの解析 (院生: 本池巧, 有光)
 学位論文 (博士) [1], 解説・紀要 [3], 講演 [2, 6, 9, 10, 12]

n^∞ 周期軌道は, これまでは, Feigenbaum 普遍則の解析という抽象的な視点以外では取り扱われる機会がほとんどなかった。 n^∞ 周期軌道の構造を解析するためには, 非常に長い周期 ($\sim 10^7$) の周期軌道を求める厳密計算方法の開発が必要であった。まず, その方法とそれに基づいた数値計算手法を考案し, 抽象的な n^K 周期軌道 ($K \gg 1$) を具体的に扱えるようにした。これにより, 「 n^∞ 不安定周期軌道の階層構造解析」, 「間欠性を特徴付ける新たなスケーリング関係式」の導出が可能となった。

次に, n^∞ 不安定周期軌道の持つ階層構造が n スケール・コントロール集合となることを示した。さらに, この周期軌道の不安定性が有するベキ的構造が, $n = 2$ と $n > 2$ では異なることを明らかにした。Lyra-Tsallis のスケーリング関係式

$$\frac{1}{1-q} = \frac{1}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{\alpha_{\max}} \quad (2)$$

は, 「軌道拡大率の生の時間発展データ (階層構造の詳細を反映している) に, 最も荒い粗視化を施して得られた平均軌道拡大率のベキ指数 $1/(1-q)$ を与える関係式」であることを明確にした。なお, (2) 中のスケーリング指数 α_{\min} と α_{\max} は, n^∞ 不安定周期軌道が有するマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ 定義域の最小値と最大値である。間欠性の特徴を抽出するには, 粗視化のレベルを下げ, 軌道拡大率の時間発展の中から間欠性を特徴付けるユニットを取り出す必要がある。そのユニットを取り出すための適切な粗視化が, 「 n^∞ 不安定周期軌道からスケーリング指数 α_{\min} と α_{\max} に対応する軌道点のみを抽出し, 2 スケール・コントロール集合を構築するプロセス」で与えられることを明らかにした。このユニット内で平均化して得られる間欠性を特徴付けるベキ指数 $1/(1-q)$ は, スケーリング関係式

$$\frac{1}{1-q} = \frac{\ln n}{\ln 2} \left(\frac{1}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{\alpha_{\max}} \right) \quad (3)$$

で与えられることを導き出した。新たに導出したこのスケーリング関係式を利用することにより, 間欠性を示す物理系の時系列データから, その背後にある階層構造を決定するための道を開いた。

(3) 量子流体乱流の渦糸モデルによるシミュレーション (院生: 本池巧, 武智公平, 有光)

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, 循環が量子化された渦糸が存在し, Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。渦糸が量子化されていることを利用して, 乱流の本質に迫ろうという構想が Feynman により提案されたが, 最近になって, ようやく実験や数値計算が可能な状況になって来ている。今年度は, これまで進めてきた数値計算コードを, 間欠性を評価できる精度が得られるようにさらに改良・工夫した。

(4) 電磁流体乱流の統計解析 (吉田, 有光) 解説・紀要 [2], 講演 [15, 16, 17],
 外部資金 [1]

太陽表面、太陽風、地球のコア、核融合炉などのプラズマの流体近似モデルとなる電磁流体 (MHD) の乱流の統計的性質は、水や空気などの通常の流体の乱流のそれと比較して、まだ明らかになっていない部分が多い。昨年度までの我々の研究において、乱流統計の近似理論の一つである Lagrange 繰り込み近似 (LRA) を一様等方性 MHD 乱流に適用し、全 (運動 + 磁場) エネルギーのスペクトル $E(k)$ (k は波数) が $k^{-3/2}$ 、残差 (運動 - 磁場) エネルギーのスペクトル $E^R(k)$ が k^{-2} に従うことを示し、その比例定数まで見積もった。

太陽風などの実際の MHD 乱流においては、ある特定の方向に一様磁場がある場合が多く、乱流の統計も非等方的となる。本研究では、先に得られた等方的エネルギースペクトルに一様磁場を摂動

として加え、その場合のエネルギースペクトルテンソルの非等方成分について、現象論的解析を行った。その結果、その非等方成分が等方成分と同じスケール則 ($k^{-3/2}$) を持つことが示唆され、それは直接数値シミュレーションにおいても検証された。この結果は、エネルギースペクトルの等方成分と非等方成分の比が波数によらず、一様磁場の非等方性が高波数 (小スケール) まで深く浸透していることを意味する。これは、小スケールで等方化し統計的普遍性を持つと考えられている通常の流体の乱流と異なる性質である。

(5) 極性流体としての粉粒体の構成方程式と散逸関数 (院生: 武智公平, 有光, 吉田) 論文 [5]

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下における2次元粉粒体の振る舞いを調べた。散逸関数や構成方程式を測定し、その関数形を決定した。その結果は粉粒体の構成方程式を決定する手法の1つである金谷の理論の結果とは整合しなかった。その理由として、シミュレーションにおける粉粒体の摩擦係数が金谷の理論の想定するものより大きいことが考えられ、摩擦係数が大きく粉粒体が互いに接触したときにその接触面上での相対速度が直ちに0になる、という理論モデルを新たに構成し、散逸関数を見積もったところ、シミュレーション結果とよく一致した。この散逸関数から構成方程式を導くことは、今後の課題である。

【2】量子散逸系, 量子情報物理

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) 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。

(1) 空間相関を考慮した環境下での量子誤り訂正 (有光) 論文 [1, 3], 著書 [2], 講演 [7]

空間的相関を有するノイズの影響下にある量子ビット列の時間発展を NETFD の理論体系で解析、既存の (独立ノイズ仮説に基づいた) 量子誤り訂正符号が、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りをも訂正できることを示した。量子ブラウン運動の理論及びそれに基づく量子 Liouville 方程式を利用して、空間的相関を有するノイズ影響下にある量子ビット列の時間発展を記述する完全正值写像を求めた。NETFD の体系での写像演算子の具体的表式を利用して、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りが、スタブライザー符号による通常の (すなわち、無相関ノイズに対するのと全く同じ) 誤り訂正手続によって訂正されることを証明したものである。

(2) 量子散逸系の真空と消滅演算子 (院生: 大日向正志, 吉田, 有光) 学位論文 (修士) [1], 論文 [2], 講演 [3, 13]

NETFD の理論体系では、2種類の演算子 (ティルダ演算子, 非ティルダ演算子) を導入し、密度演算子の時間発展をケット真空状態の時間発展として捉える。2種類の演算子を導入することにより、非平衡量子散逸系の解析に通常用いられる量子マスター方程式の有する『時間推進演算子と密度演

算子間の演算子の複雑な絡み』を解消することができる。散逸系では、真空は不安定なため時間発展し、それに伴いその真空を消す消滅演算子も時間発展する。このような状況を記述するためには、各時刻の真空を消去する生成・消滅演算子が必要となる。これは、『時間に依存する Bogoliubov 変換』という新概念を生む。

時間依存 Bogoliubov 変換を導出する際、従来は Heisenberg 描像を経由し、Heisenberg 方程式が利用されていた。本研究は、「Schrödinger 描像のみで、その導出が可能である」ことを初めて示したものである。まず、ボゾン散逸過程における時間依存 Bogoliubov 変換を Schrödinger 描像のみにて導出できる新たな道筋が発見され、さらに、スクイーズド真空生成散逸過程を呈する（真空の対称性の破れを有する）系、すなわち、外部環境の影響下でスクイーズド真空が生成される過程に適用された。Bogoliubov 変換の時間依存性は、オーダー・パラメータの時間依存性を通して導入される。NETFD では、散逸過程の時間発展は、ティルダ・非ティルダ粒子対の真空への凝縮として捉えられるものである。フェルミ散逸系へも適用された。

(3) スクイーズド真空の生成過程における散逸の効果 (吉田, 有光) 論文 [4]

量子光学におけるスクイーズド真空は、連続量量子テレポーテーションなどで用いられ、量子情報における応用的価値が高い。スクイーズド真空は実験室では縮退パラメトリック過程などを用いて生成されるが、その過程における散逸の影響を評価することは応用上も重要である。

本研究では、縮退パラメトリック過程によるスクイーズド真空の生成における散逸の影響を、NETFD の枠組で調べた。散逸時間発展のみを考慮した真空 $|W(t)\rangle$ を参照真空として、散逸を伴ったスクイーズド真空の演算子形式による表現とその消滅演算子を求めた。その結果、スクイージングにより真空の位相対称性を破られる過程が、 $|W(t)\rangle$ への粒子ペアの凝縮で表現されることが分かった。また、得られた真空の表現を用いて正準演算子 p, q のそれぞれの分散 $\Delta p(t), \Delta q(t)$ およびそれらの積である不確定性関係の時間発展を調べた。散逸が無い場合不確定性関係は一定に保たれるのに対して、散逸がわずかでもある場合は不確定性関係が時間と共に発散することが示された。

(4) 量子散逸系の真空へのペア凝縮と Wigner 分布関数 (吉田, 有光) 講演 [14]

量子散逸系を扱う従来の方法として、密度演算子についての量子マスター方程式を c 数関数 (例えば Wigner 分布関数) の偏微分方程式に写像するものがある。正準演算子形式である NETFD も c 数関数空間での表現が可能なのは知られている。本研究において、真空への粒子ペアの凝縮に対応する Wigner 分布関数の表現の再検討を行った。

【3】ソフトマターの非平衡統計力学とガラス転移

(1) 空間的に不均一な系のガラス転移 (宮崎) 講演 [18, 20, 21, 23, 24, 25], 外部資金 [2]

ガラス転移は、見かけ上、熱揺らぎの相関は何ら異常を示さないにもかかわらず、緩和時間や粘性係数は発散し、アモルファス状に分子運動が凍結する現象である。一方、ゲルや多孔質なども、ダイナミクスが凍結したアモルファス状の物質であるが、空間的な不均一性が最初から内在している点で、ガラスとは大きく異なる。この空間不均一性の有無がガラス転移の性質をどのように変化させるのか、つまり、ゲルとガラスのクロスオーバーはいかにして起こるのかを理解するために、我々は数値実験と解析計算による研究を行った。特に、ガラスとゲルのミニマルモデルとして、易動度の異なるコロイドの混合系 (たとえば不純物と自由粒子) のスローダイナミクスの解明を行った。モデルとして、不純物は自由粒子と同じ大きさとし、運動のみが凍結されているものとした。最近、モード結合理論 (MCT) により、不純物密度が大きい領域において、スローダイナミクスが質的に変化することが予言された。これはコロイドゲルおよびガラスで観測されるダイナミクスに酷似しているが、その理由は明らかでない。我々はこれを数値実験により、検証することに成功した。動的相関関数、

非線形応答関数、Debye-Waller 因子などを系統的に調べ、特に動的な相関長が、不純物密度の増加とともに大きく減少することなどを発見した。さらに、この系は不純物密度が多くなると、自由粒子の易動度が上昇するという、所謂リエントラント転移を示すことがわかった。最近、他のグループにより、アモルファス中のイオン伝導度に奇妙なリエントラント転移が存在することが確認されたが、その物理的起源の説明はまだなかった。我々の研究は彼らの結果を、明確に説明するものである。

(2) コロイドゲルの生成ダイナミクス (宮崎) 論文 [6], 外部資金 [3]

コロイド分散系は、密度や相互作用を調節することにより、ガラスやゲルなど様々なアモルファス構造を作る。ゲルの生成で重要な役割を果たすと考えられる相互作用は、コロイド粒子間の相互作用の他に、コロイド-分散媒間の相互作用が考えられる。後者は、所謂、流体力学的相互作用と呼ばれるもので、動力的かつ非線形な相互作用である。これは、今までのほとんどの研究では無視されてきた。しかし、コロイドが凝集し密なネットワークを形成する後期過程においては、分散媒の流動場の影響は無視できないと考えられる。そこで、我々は、山本らが開発した手法を用いた大規模な数値計算により、この流体力学的な効果を 2 次元と 3 次元について考察した。一般に、流体力学的相互作用は極めて複雑でその効果を数値計算に取り入れることは至難とされているが、上記の手法は、流動場とコロイドを、連続的な密度場として扱うことにより、この困難を回避している。計算の結果、流動場の影響により、ゲルの生成過程が非常に遅くなること、そしてネットワークのモルフォロジーがよりコンパクトになることなどが分かった。

(3) 高次元空間におけるガラス転移の解析 (池田、宮崎)

ガラス転移とは、液体を融点以下に急冷し、その構造がアモルファス状に凍結する現象であり、様々な系で見られる普遍的な現象である。現段階では、ガラス転移の正体について二通りの考え方が存在する。一方は、ガラス転移は熱力学的な平衡相転移の一種として理解されるというものであり、もう一方は、モード結合理論に代表されるようなガラス転移は純粋に動力的な転移であるという考え方である。現段階では、「このどちらがガラス転移の正しい見方であるか」というガラス転移の基本的描像すらわかっていない。

この様な状況では、各理論の整合性やその予測を緻密に検証していくことが肝要である。そこで、系の空間次元を三次元に限らずに、高次元での両理論のふるまいを比較することで考察を深めようと考えた。まず、一般の d 次元のモード結合理論を導出し、その方程式の解析を行うプログラムを開発した。得られた基礎方程式は、3 次元のモード結合方程式に次元に依存する付加項がかかったものとなった。現在、この方程式の高次元での振る舞いを検討中である。

また、導出した高次元のモード結合理論とシミュレーションの結果を比較する研究も並行して行った。モード結合理論は平均場理論と考えられているため、高次元では、その記述が良くなる可能性があるためだ。具体的には、アメリカ Duke 大学の Charbonneau 博士と共同で、4 次元でのガラス転移をシミュレーションとモード結合理論を組み合わせで解析している。実際に両者の比較をおこなうと、4 次元剛体球系のガラス転移をモード結合理論が良好に記述することが明らかになった。

【4】 量子液体相における幾何学的位相の意義

現代物理学においては「対称性の破れ」とそれを記述する「秩序変数」の概念が基本的であると考えられてきた。主たる現代物理学の目的の一つはこれらを用いた物理的な「相」の分類、理解であったと言えよう。特にその相の質的变化としての「相転移」においては臨界点における局所的ゆらぎの時空間的な発散的振る舞いの正確な記述のために局所的場の理論を用いた繰り込み群ならびにその再帰的階層的概念が極めて有効であり、Landau-Ginzberg-Wilson (LGW) による一つの認識論的パラダイムが構築されるに至った。

一方近年の研究の進展により、量子効果が古典論に対する摂動であるにとどまらず、新たな物質相を選択することにより生じる「量子相」が広く存在することが認知されるに至った。物性論に例をとれば種々の量子ホール相、強相関電子群におけるスピン液体相、近藤格子系等における量子液体相、整数スピン鎖における Haldane 相等がその典型例となる。これらは、如何なる対称性の破れを伴わず、古典的秩序変数によっては特徴づけることのできない古典的対応物の存在しない真に量子的な新物質相である。これらの相は「量子液体相」と近年総称され多くの興味をあつめている。これらの新奇な「量子相」「量子液体相」の存在とその重大な意義の認識は上述の LGW-パラダイムからのパラダイムシフトの必要性を強く示唆し、あらたな自然法則の理解、発見を要求する。

その要求に応えるべく提案されたのが、「トポロジカル秩序」「量子秩序」の概念であり、共同研究者とともに、私もその概念形成を行ってきたものである。これは従来の LGW 理論が局所場の理論にその概念的基礎をおいているのに対して、トポロジカルな場の理論にその概念形成の発端をもつものである。「量子液体相」においては励起に有限のエネルギーギャップが存在し、低エネルギーの局所的な準粒子が存在しない。一般に連続対称性の破れに対応して存在するギャップレス（質量ゼロ）の Nambu-Goldston ボソンが存在しないわけである。対応して、この量子液体相の基底状態は本質的に非局所的となる。一つの系のトポロジカルな形状に支配される形で、系に境界が存在してはじめて生じたギャップレスのフェルミ統計に従う境界に局在する準粒子励起が状態を特徴づける。例えば量子ホール相等におけるギャップレスのエッジ状態がこれに対応する。これが非自明なトポロジカル秩序相としての量子液体相における「バルクエッジ対応」である。

以上を歴史的背景として量子系の特徴である「幾何学的位相」を用いたベリー接続を直接の手段とし多体の電子論、物性論におけるトポロジカルな秩序変数を構成する理論的提案を行い、それに基づく大規模数値計算機による具体的な数値計算により幾つかの量子液体相の特徴付けを行った。また「バルクエッジ対応」の観点からエンタングルメントエントロピーという新しい量子的な物理量を大局的な秩序変数として用いる試みも展開し、その有効性を確認した。

(1) Z_2 ベリー位相による量子液体相における局所秩序変数（初貝）

論文 [7, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 18],

講演 [26, 27, 28, 29, 30, 31, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 51, 55, 56, 57, 59, 62, 64, 66]

ベリー位相は歴史的には量子力学における断熱過程の解析から発見されたが、その真の意義はパラメータ依存のエルミート演算子の固有空間の正確な理解をもたらした点にある。固有ベクトルのパラメータ空間上での形式的微分 (1-form) により定義されるベクトル場は固有ベクトルの位相の不定性に起因する自由度を持つが、これは対応するベクトル場に $U(1)$ のゲージ変換を引き起こす。より一般に固有ベクトルの M 本の組により張られる固有空間を考えたとき、対応するベクトル場は M 次元の行列となり基底のユニタリ変換は (非可換) ゲージ変換を引き起こす。このようにして、非可換ゲージ場はパラメータ空間上で固有空間を考えたとき極めて自然に導入されることとなる。ここで構成されたゲージ場をパラメータ空間上の異なる 2 点間の関係を与えるものとしてベリー接続と呼んだとき、これを用いてベリー位相、チャーン数等のトポロジカルな量が一般に定義されることとなる。これが近年注目を集めている幾何学的位相の本質的部分である。これらのトポロジカルな量を具体的な物理系に対して計算する際、ベリー接続に関する明示的なゲージ固定が必要となることにまず注意したい。一方で、パラメータ空間を離散化することで得られるパラメータ空間上の格子上で非可換ゲージ場を構成し、ベリー接続としての格子上のゲージ不変量を直接扱うこともできる。その際格子ゲージ理論により開発された手法が直接適用されることとなる。一方でランダウ以来の相転移の理論によれば、古典的な物質相は局所的な秩序変数を用い対称性の破れに基づき、その多くが長距離秩序の存在により特徴づけられることを思い起こそう。局所磁化による長距離秩序で強磁性相が、局所的な電荷密度の長距離相関で、電荷密度相がそれぞれ特徴づけられるわけである。一方、低次元量子系では、その強い量子ゆらぎならびにその低次元性により、通常の秩序形成が

強く妨げられ、対称性の破れを伴わず、それでいて極めて特徴的な物理相が存在し得ることとなる。フラストレートしたスピン系におけるスピン液体相、整数スピン鎖における Haldane 相、量子ホール相等がその典型例である。これらの量子液体相の物理的理解を目指すとき、古典的な概念では不十分であることはほぼ自明であろう。

これら対称性の破れを伴わない古典的には特徴付けが困難である量子液体相、特に励起にエネルギーギャップを持つ相を量子的に特徴付けることを目指しベリー接続を用いて幾何学位相の代表例であるベリー位相を構成し量子的な「局所」秩序変数を構成するものである。古典的観測量はエルミート演算子の期待値で与えられ、それ故ユニタリ不変であるが、ベリー位相は基底のユニタリ変換により 2π の整数倍だけ不定であり決して古典的な物理量とはならない。また、ゲージ不変なチャーン数も量子液体相の特徴付けに有効である。例えば異方的超伝導相、単層炭素 2 次元系であるグラフェン等におけるスピホール伝導度がその例である。

(2) バルクエッジ対応に基づく量子液体相でのエンタングルメントエントロピーに関する研究 (初貝、有川) 論文 [7, 8, 14, 18], 講演 [26, 27, 28, 39, 40, 41, 42, 43]

上述の対称性の破れを伴わない量子液体相に対して私が提案してきた「バルクエッジ対応」の概念に立脚し、近年量子情報分野という物性論とは全く異なる分野において展開されてきたエンタングルメントエントロピーなる新しい物理量を用いることにより波動関数の量子的絡み合いに関連する大局的な情報が得ることを目的とし具体的な種々の物理系に対して理論的研究を行い、相の特徴を同定した。

(3) 量子ホール系における交流ホール伝導度におけるステップ構造の普遍性 (初貝) 論文 [10], 講演 [37, 38, 60, 61]

量子ホール系における交流ホール伝導度を理論的に計算しそこにステップ構造を見だしその普遍性を議論した。

(4) グラフェンの量子ホール系の光学伝導度の研究 (初貝) 論文 [9, 10], 講演 [37, 38, 60, 61]

グラフェンの光学伝導度を理論的に計算し、実験との比較をふくめてその特異性を詳細に議論した。

(5) グラフェンをはじめとするトポロジカル秩序相での量子-古典対応の破れ (初貝) 論文 [13], 講演 [34]

グラフェン等トポロジカルに非自明な系でのホール伝導度をトポロジカル不変量を用いて計算し、量子-古典対応を詳しく議論し、その破れを見いだした。

(6) グラフェンにおけるトポロジカル秩序とバルクエッジ対応

1. 2次元 Dirac Fermion としてのグラフェンにおけるトポロジカル秩序 (初貝) 論文 [9, 10, 11, 13, 16], 講演 [26, 27, 28, 30, 31, 32, 47, 48, 49, 50], 卒論 [3]

グラフェン無限結晶は Dirac cone 型のエネルギー分散を持ち、単位胞内の 2 原子の電子論的等価性であるカイラル対称性に起因するトポロジカル安定性をもつ。特に磁場中ではこの特異な電子構造に起因する種々のトポロジカルな効果が顕在化し、理論実験の両面から多くの興味をもたれている。これに関して「トポロジカル秩序」、「バルクエッジ対応」という独自の観点から研究を遂行し電子相関に起因するバンド秩序相の存在の可能性を提起する等、重要な成果を得た。またグラフェンの光応答に関してもそのトポロジカルな側面に基づき重要な成果を得た。

2. 有限磁場下のグラフェンの端状態 (有川, 初貝) 論文 [11, 16], 講演 [30, 31, 65]

zigzag 端を持つグラフェンでは端に局在する 1 粒子状態が存在することが知られ、ゼロモードとしてのトポロジカルな起源を持つ。一方、強磁場下では、通常の 2 次元量子ホール系では、磁場下での端状態が存在し、このエネルギー分散がランダウギャップ内にあるために E_F がランダウ準位間にあってもギャップレスの励起をもつ。 E_F がバルクのランダウ準位内のときには、電荷密度は端で磁場長程度の領域で減少する。これに対して、磁場下のグラフェンでは、Dirac 型の分散に起因して $E = 0$ (Dirac cone 点) に特異なランダウ準位が生じるので、端状態のエネルギー分散がどうなるかは興味深い。特に、zigzag 端では磁場下でもトポロジカルに保護されたゼロモード・エッジ状態が存在し、 $E = 0$ でバルク・ランダウ準位とエッジ状態が共存する新しい状況が生まれる。

本研究では、端のある磁場中グラフェン (1 層および 2 層) に対して、エネルギー・スペクトルおよび実空間における波動関数を zigzag, armchair 端に対して計算し、電荷密度における端の依存性について調べた。この結果は STM-STS により測定可能である。

3. グラフェンにおけるカイラル対称性と局在 (初貝) 講演 [32, 52]

グラフェンにおけるゼロギャップを理論的に保証するものが部分格子構造に起因するカイラル対称性であるが、それはこの系のアンダーソン局在にも特異な性質をもたらす。これに関して理論的かつ数値的な研究を行い興味深い結果を得た。

(7) 量子スピンホール相における Z_2 不変量とベリー接続 (初貝) 論文 [15], 講演 [29, 36, 53, 54]

スピンホール効果における Z_2 不変量に関して、高次のチャーン数による理論他を展開した。その結果はより一層の理論的展開の基礎となる。

(8) BEC-BCS クロスオーバーのトポロジカルな秩序変数による研究 (初貝, 有川) 講演 [35]

Bose 凝縮-BCS クロスオーバーを示す引力相互作用をもち、時間反転対称性をもつ電子系格子模型を平均場を用いた有効模型について量子ベリー位相を用いて Bose 凝縮相と BCS 相の間に量子相転移をもつことを示した。

【5】強相関電子系の理論的研究

種々の理論的、数値的手法により広く強相関電子系における理論的研究をおこない新しいブレイクスルーにつながり得る重要な成果を得た。

(1) 量子ドットとナノ構造における非断熱電荷移動の研究 (初貝) 講演 [58]

量子ホール効果を用いたナノデバイスで重要になると考えられる非断熱効果について新しい理論的手法を開発し数値計算をふくめて重要な成果を得、論文を公表した。

(2) リング相互作用をもつスピン梯子系 (有川, 初貝) 論文 [7, 8, 14, 20], 講演 [33, 39, 40, 41, 42, 55, 58, 63]

4 体相互作用をもつスピン梯子系は 2 体と 4 体のスピン相互作用の競合により様々な相が現れる。様々な系について絶対零度における動的スピン構造因子について (動的) 密度行列繰り込み群を用いて調べた。エネルギーギャップをもつ量子状態を特徴づけるために系に端を導入することで系を特徴づける低エネルギー状態が現れる (バルクエッジ対応)。基底状態の構造が非自明なベクトルカイラリティ相などに対して系を特徴づける開放境界条件下での低エネルギー励起 (ケネディー三重項) やエンタングルメントエントロピーを調べることで基底状態の試行関数を与えた。

(3) スピンチューブ (有川) 論文 [19, 21], 講演 [73]

スピンチューブとよばれる 3 本の $S=1/2$ Heisenberg スピン鎖がリング状につながった系の基底状態と絶対零度における動的スピン構造因子について (動的) 密度行列繰り込み群を用いて調べた。リング状の交換相互作用が全て等しい場合はスピン励起にギャップをもち、系が大きい極限でもダイマーのオーダーパラメータが有限に残ることを示した。一方、リング状の交換相互作用にわずかに異方性を導入した場合、フラストレーションは失われスピンギャップは閉じ、ダイマーのオーダーパラメータは系が大きい極限でゼロになることを示した。

(4) 1次元電子系の相関関数 (有川) 講演 [67, 68, 70]

一般に可解模型であっても多体系の相関関数を導出するのは困難である。電子相関を考慮した、サイトあたりの電子数の二重占有数を変分パラメータにもつ Gutzwiller 波動関数と呼ばれる試行関数がよく用いられる。1次元系でかつ、サイトあたりの電子数の二重占有を禁止した場合は $1/r^2$ 型相互作用をもつ t - J 模型の厳密な基底状態であることが知られている。この場合の Gutzwiller 波動関数に対する 1 粒子密度行列の厳密な解析形の導出を行った。さらに動的密度行列繰り込み群により最近接相互作用をもつ t - J 模型の相関関数を求め、 $1/r^2$ 型相互作用をもつ t - J 模型の動力学との比較を行った。

(5) 1次元可解模型の相関関数 (有川) 講演 [69], 解説・紀要 [4]

三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型とよばれる $1/r^2$ 型相互作用をもつ Calogero-Sutherland 模型の”相対論的拡張”版の模型の先進 Green 関数の解析形を Macdonald 多項式の公式を用いて導出した。

【6】複合ナノ構造系の電子相関と量子輸送

現在では単一の微小半導体部 (量子ドット系) を介したコンダクタンス挙動に対する電子相関効果は、かなり良く理解されるようになった。数 K 程度の低温領域でのクーロン閉塞現象、さらに低い温度領域でのコンダクタンス増大現象 (量子ドットの近藤効果) といったナノ系特有の現象に対する理解が深まり、その挙動が、量子ドット系の微視的詳細に依らない「単一量子ドットの普遍的挙動」により記述できることが明らかになってきた。一方、工学技術の進歩は縦型/並列多重量子ドット、アハロノフ-ボーム (AB) リング系、T 字ネットワークといった、様々な複合ナノ構造を実現可能にしたが、これらの複合ナノ構造系の量子輸送実験の結果をみると、従来の「単一量子ドットの普遍性」による理論的理解では説明し難い現象が数多く観測されている。我々は、普遍性の観点から複合ナノ構造系の量子性と電子相関効果に着目し、その量子輸送現象を明らかにするため継続的に研究を進めている。本年度の成果は以下の通りである。

(1) 軌道縮退系の電子相関と量子輸送 (院生: 小口悠, 谷口) 学位論文 (博士) [2], 解説・紀要 [5], 講演 [74, 75]

軌道縮退量子ドット系では、スピン自由度と軌道自由度の絡み合いにより近藤効果が強まることが知られる ($N_d = 1$ の軌道近藤効果)。縦型/並列二重量子ドット系では、各ドットのゲート電圧を調整することでこの現象を観測することが可能である。またカーボンナノチューブドットの外殻軌道はほぼ二重に軌道縮退しており、「内部縮退自由度を持つ」量子ドットとみなすことが可能である。一方、これらの軌道縮退系では、「単一量子ドットの普遍性」では説明し難い現象も数多く観測されている (カーボンナノチューブドット系では、偶数のドット電子数 N_d においても低温でのコンダクタンス増大が観測されたりされなかったりする。) 本研究ではこれらの現象が軌道二重縮退準位構造をもつドット系特有の現象と考える。同軌道内に Coulomb 相互作用 U 、異軌道間に Coulomb 相互

作用 U' が働く二重軌道縮退アンダーソン模型に基づき、相互作用の非対称性 (軌道依存性) を考慮して普遍性を拡張することで、実験結果を系統的に解明を目指した。

解析手法としては、有限相互作用スレーブボゾン平均場法 (Kotliar-Ruckenstein スレーブボゾン法) を二重軌道縮退アンダーソン模型に拡張し、非平衡グリーン関数法と組み合わせ、線形・非線形コンダクタンスを全ゲート電圧領域 ($N_d = 0 \sim 4$) で評価した。

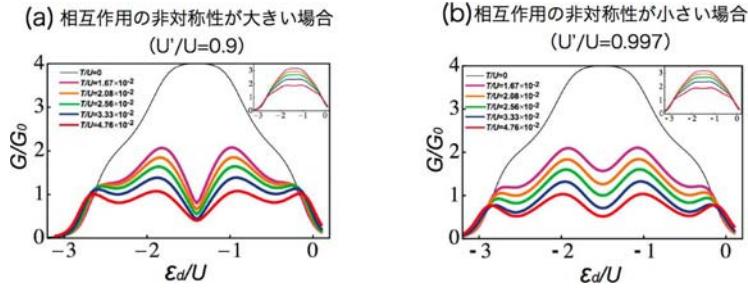


図 3: 線形コンダクタンスの温度依存性に見られる相互作用の非対称性の影響。

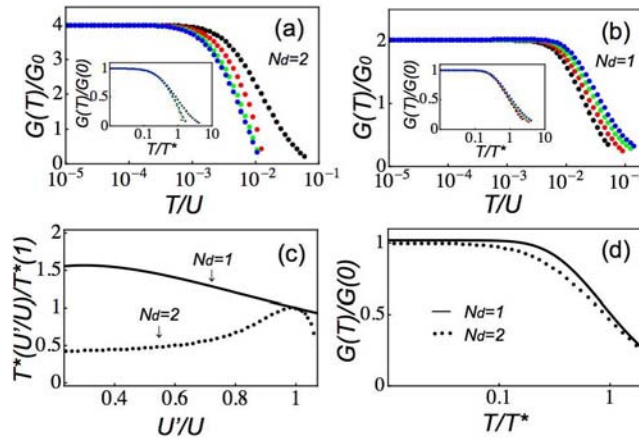


図 4: (a), (b) 線形コンダクタンスの温度依存性。(c) 特性温度の軌道間クーロン相互作用依存性。(d) 普遍曲線のドットの電子数依存性。

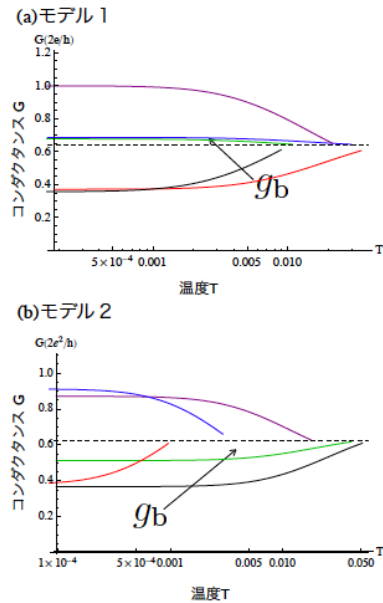
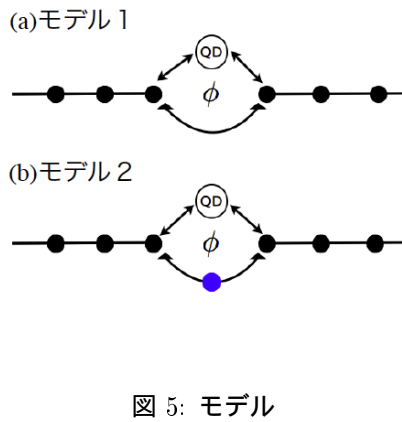
線形コンダクタンス (1) クーロン相互作用の軌道依存性は線形コンダクタンスのゲート電圧プロファイルに大きな影響を与え、特にその影響は、 $N_d = 2$ 領域のゲート電圧で顕著であることが明らかになった。相互作用の軌道非対称性が 10% 程度存在するだけで、有限温度で線形コンダクタンスに特徴的なディップ構造が現れる (図 3)。(2) 各ゲート電圧において適切なエネルギースケール (特性温度) 定義すると、コンダクタンスの温度依存性は普遍的挙動により説明できることがわかった (図 4)。(3) 以上の結果は、カーボンナノチューブ量子ドット系において行われた P. J. Herrero らの実験 (2005) と Makarovski らの実験 (2007) とに観測されているコンダクタンス挙動の差異を説明すると同時に、二重縮退量子ドット系が示す普遍的挙動に対しても系統だった理解を与える。

非線形コンダクタンス (1) 有限バイアス効果により、非線形コンダクタンスは $N_d = 2$ 領域における近藤効果が大きく抑制されるが、 $N_d = 1$ 領域における抑制はさほど大きくない。(2) スケーリング解析の議論の範疇で、有限バイアス電圧は、有限温度と同様の役割を果たすと期待されるが、我々

の計算結果はこれを支持する。温度 T とバイアス電圧 V が両方存在する場合、非線形コンダクタンスは大きいエネルギー $\max[T, eV]$ によって支配される。さらにバイアス電圧に対する依存性も普遍的依存性を示すことが明らかになった。(3) Wilhelm らのグループは、並列二重量子ドットを使ったコンダクタンス計測で、準位縮退領域では $N_d = 1$ のみを観測していることは相互作用の非対称性と有限バイアス電圧効果に依るものと解釈できる。また我々の理論結果は、現在実験で使われているバイアス電圧 ($80\mu\text{eV}$) を一桁下げれば $N_d = 2$ 領域にも近藤効果によるコンダクタンス増大が観測されることを示唆する。

【7】 AB リング系における普遍スケーリング解析: 近藤温度の磁束依存性 (院生: 磯崎健太, 院生: 小口悠, 谷口) 講演 [76]

Aharonov-Bohm リングに量子ドットを埋め込んだ系 (AB リング系) は、リングを貫く磁束により制御性が高く、量子素子として大きな可能性を持っている。AB リング系には量子ドット系の離散準位とリング部分の連続準位が混在し、そのため Fano 効果が観測されるが、更に低温領域では、Fano 効果と量子ドットの近藤効果が共存する Fano-Kondo 効果が現れる。現在、単一量子ドット系のコンダクタンスでなされたような普遍挙動の議論は、AB リング系 (Fano-Kondo 効果) に対して全くなされていない。最近、AB リング系の近藤温度は、リングを貫く磁束により変化すると理論報告もいくつかあり、普遍性の観点からも大変、興味深い系である。



本研究では、Fano-Kondo 効果における普遍挙動を探索し、普遍スケーリング解析を行うことで物理的に明確な形で近藤温度を同定することを試みた。その結果、定義される (Fano-Kondo 効果の) 近藤温度の磁束依存性を明らかにした。

模型として、図 5 で示す (a) モデル 1 (直接ホッピング) (b) モデル 2 (1 サイトホッピング) を考え、有限相互作用スレーボソン法を用いて解析した。各磁束の値でコンダクタンスの温度依存性 (図 6) はコンダクタンス $G(T)$ の温度依存部分

$$F(T) = \frac{G(T) - g_b}{G(0) - g_b}; \quad (G_b : \text{ドットを切り離れた時})$$

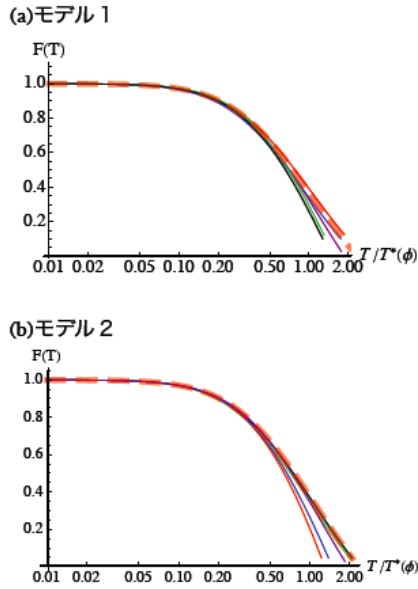


図 7: スケール普遍性

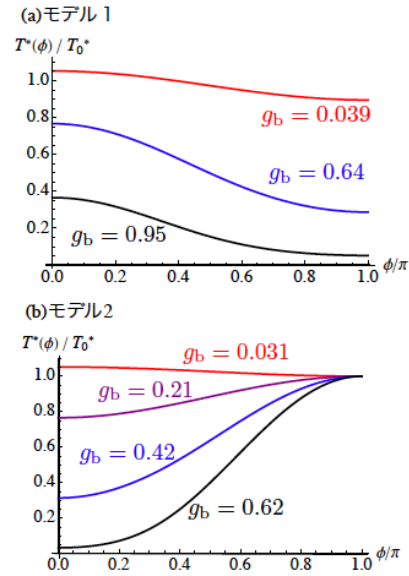


図 8: 近藤温度の磁束依存性

に着目して、スケール普遍性を調べたところ、各磁束で異なった挙動を示していたものが一つの曲線で表せ (図 7)、Fano-Kondo 効果に普遍性が存在していることが明らかになった。この普遍曲線は単一量子ドットの普遍曲線とも一致する。このような普遍スケール解析を用い、近藤温度の磁束依存性を調べた結果が図 8 である。モデル 1 では g_b の値に依らず磁束が 0 から π で必ず減少し、モデル 2 では g_b が小さい時はわずかに減少し、 g_b が大きい場合には増加する。一見、ほとんど類似した 2 モデルが近藤温度に関して全く正反対の磁束依存性を示すことがわかる。

【8】電子系の量子相転移: 電子相関と乱れ

電子系の絶縁相としては、(乱れの無い系の) 電子相関に起因するモット絶縁相、(電子相関の無い系の) 乱れに起因するアンダーソン絶縁相が存在することが知られている。電子相関と乱れが共存する場合には量子相転移の存在が示唆されているが、両者が存在するときの理論解析は困難であり、理論的解明はまだ十分になされていない。本研究では、特にフェルミ原子トラップ系実験を念頭におき、観測可能な電荷密度分布、スピン分極分布の挙動として量子相転移を特徴づけることを目指して理論研究を進めている。原子力機構の町田グループ (奥村雅彦・山田進・町田昌彦) との共同研究である。理論モデルとして電子相関と乱れが同時に存在する一次元電子系 (Anderson-Hubbard 模型)

$$H_{AH} = \sum_{(i,j)\sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \sum_{i\sigma} \epsilon_i n_{i\sigma} + U n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}; \quad P(\epsilon_i) = \theta(W/2 - |\epsilon_i|)/W$$

を使い、密度汎関数線り込み群 (DMRG) 法により電荷分布、スピン分極分布の挙動を数値的に調べた。本年度の成果は以下の通りである。

(1) ホールドープ領域における乱れと電子相関の競合と協同 (谷口) 論文 [22]

一次元 Anderson-Hubbard 模型は、乱れない時 ($W = 0$) には、半充填 ($\bar{n} = 1$) でモット絶縁体、それ以外の充填 ($0 < \bar{n} < 2, \bar{n} \neq 1$) では金属相であることが理論的に知られている。従来の研究では電子相関と乱れは競合関係にあると考えられており、 $W = 0$ で金属相であるホールドープ系 ($\bar{n} < 1$)

に乱れを導入してもモット絶縁相が現れることは無く、金属相からアンダーソン局在相に移行すると考えられて来た。しかし、 $W \neq 0$ の系に対して半充填からホールドープを行った場合を注意深く調べると、ドープしたホール自体がまず局在化することでモット絶縁ドメインが現れることが明らかになった。つまり、乱れと電子相関が常に競合関係にあるわけではなく、乱れが電子相関を助けることより (電子相関起源の) モット絶縁相が実現され得ることが明らかになった。

(2) スピン不均衡系のスピン分極密度の乱れ依存性 (谷口) 論文 [23, 24], 講演 [77]

フェルミ原子気体に磁場を印加することで、上下スピンの不均衡となる状況を作ることができる。このようなフェルミ原子のトラップ状態を念頭におき、乱れがない場合に実現される反強磁的スピン分極密度が、乱れの導入にどのように消失 (=局在化) するかを明らかにするため、スピン不均衡をもつ Anderson-Mott 模型の基底状態を DMRG により数値的に調べた。乱れがない状態では、スピン不均衡によりスピン密度波が存在する。しかし、乱れの導入に従い局所的な反強磁性領域が縮小していく。十分大きな乱れを導入すると、反強磁性領域が消失して行く様子が明らかになった (図 9)。

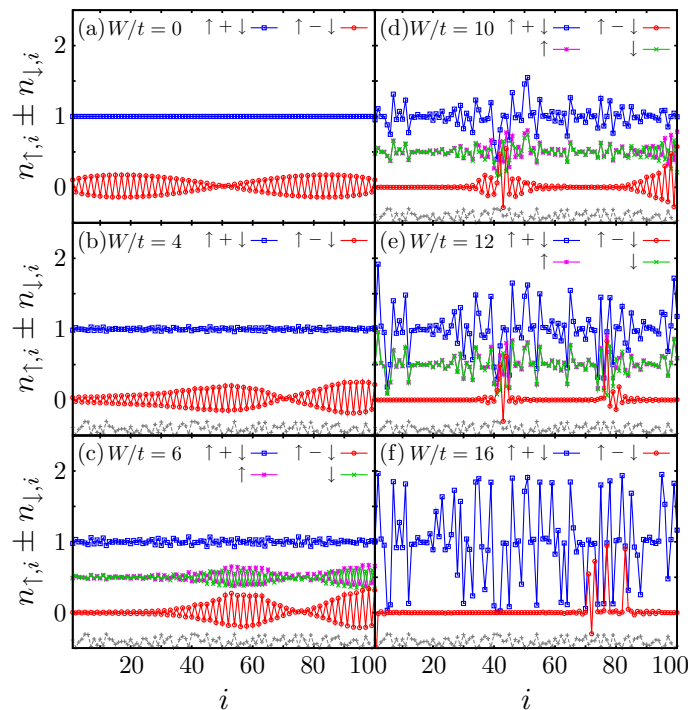


図 9: スピン分極密度の乱れ W 依存性: $(N_{\uparrow}, N_{\downarrow}) = (51, 49)$.

【9】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, 初貝)

1. 日本応用物理学会欧文誌 (JJAP) の編集委員 (Ei) を務めた。(有光) 社会還元等 [1]
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。(有光) 社会還元等 [2]
3. Progress of Theoretical Physics の編集委員として、読者決定、論文掲載の可否の決定を行った。(初貝) 社会還元等 [7]

(2) 物理チャレンジ・オリンピック委員会 (有光) 社会還元等 [3, 4, 5, 6]

物理チャレンジ・オリンピック委員会運営会議・委員, 国際物理オリンピック派遣委員会・参加派遣部会・部会長, 同・教育研修部会・委員として, 筑波大学開催の「物理チャレンジ 2007」で選抜された物理オリンピック参加候補者への課題問題出題, 採点, 冬合宿での講義, 春合宿での最終選抜を行った。

また, 物理チャレンジ実行委員会・現地実行部会・委員として岡山大学での「物理チャレンジ 2008」開催に関わった。

(3) 共同利用課題審査委員 (初貝) 社会還元等 [8]

東京大学物性研究所附属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をおこなった。

(4) 国際会議プログラム委員 (初貝) 社会還元等 [9]

2次元電子系の国際会議 EP2DS のプログラム委員としてプログラムの決定を行った。

(5) 体験授業 (宮崎) 社会還元等 [10]

(6) 日本物理学会委員等 (宮崎, 吉田) 社会還元等 [11, 12, 13]

< 論文 >

- [1] T. Arimitsu, T. Hayashi, S. Kitajima and F. Shibata: “Quantum Error Correction for Spatially Correlated Errors”, *Int. J. Quantum Information* **6** Supplement (2008) 575–580.
- [2] K. Yoshida and T. Arimitsu: “Annihilation operators associated with unstable vacua in non-equilibrium thermo-field dynamics”, *Cond. Mat. Phys.* **11** (2008) 687–697.
- [3] T. Arimitsu: “Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics and Its Application to Error-Correction for Spatially Correlated Quantum Errors”, *Interdisciplinary Information Sciences (IIS)* (2008) in press.
- [4] Kyo Yoshida, Tsuyoshi Hayashi, Sachiko Kitajima and Toshihico Arimitsu: “Dissipative squeezed vacuum in non-equilibrium thermo field dynamics”, *Physica A*, submitted.
- [5] Kohei Takechi, Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Constitutive equations and dissipation function for a dense granular flow”, *Phys. Rev. E*, submitted.
- [6] R. Yamamoto, K. Kim, Y. Nakayama, K. Miyazaki, and D.R. Reichman: “On the role of hydrodynamic interactions in colloidal gelation”, *J. Pyys. Soc. Japan* **77** (2008) 084804.
- [7] I. Maruyama, T. Hirano, Y. Hatsugai, “Topological Identification of Spin-1/2 Two-Leg Ladder with Four-Spin Ring Exchange”, *Phys. Rev.* **B79** 115107 (2009)
- [8] I. Maruyama and Y. Hatsugai, “Quantized Berry phase of Kondo insulators”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 042116 (2009)
- [9] T. Motimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, “Cyclotron radiation and emission in graphene – a possibility of Landau-level laser”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022059 (2009)
- [10] T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, “Optical Hall conductivity in QHE systems”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022060 (2009)

- [11] M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Edge states for the $n=0$ Landau level in graphene" Journal of Physics: Conference Series **150**, 022003 (2009)
- [12] I. Maruyama and Y. Hatsugai, "Non-adiabatic effect on Laughlin's argument of the quantum Hall effect" Journal of Physics: Conference Series **150**, 022055 (2009) arXiv:0806.4430
- [13] M. Arai and Y. Hatsugai, "Quantum Hall effects of graphene with multi orbitals: Topological numbers, Boltzmann conductance and Semi-classical quantization", Phys. Rev. B **79**, 075429 (2009) arXiv:0810.2377
- [14] I. Maruyama and Y. Hatsugai, "Quantized Berry Phases of a Spin-1/2 Frustrated Two-Leg Ladder with Four-Spin Exchange", J. Phys. Conf. Ser. **145**, 012052 (2009)
- [15] Takahiro Fukui, Takanori Fujiwara, Yasuhiro Hatsugai, "Topological meaning of Z_2 numbers in time reversal invariant systems" Journal of the Physical Society of Japan (Letter) **77**, 123705 (2008)
- [16] Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, and Hideo Aoki, "Edge states in graphene in magnetic fields: A speciality of the edge mode embedded in the $n = 0$ Landau band", Phys. Rev. B **78**, 205401 (2008)
- [17] T. Morimoto, H. Aoki and Y. Hatsugai, "Cyclotron radiation and emission in graphene", Phys. Rev. B **78**, 073406 (2008)
- [18] T. Hirano, H. Katsura, and Y. Hatsugai, "Degeneracy and consistency condition for Berry phases: Gap closing under a local gauge twist", Phys. Rev. B **78**, 054431 (2008)
- [19] S. Nishimoto, M. Arikawa: "Low-lying excitations of the three-leg spin tube: A density-matrix renormalization group study" Phys. Rev. B **78**, 054421 (2008) (9 pages).
- [20] S. Nishimoto and M. Arikawa: "Dynamics in two-leg spin ladder with a four-spin cyclic interaction" Phys. Rev. B **79**, 113106 (2009) (4 pages).
- [21] S. Nishimoto and M. Arikawa: "Basic properties of three-leg Heisenberg tube" J. Phys.: Conference Series **145** 012041 (2009).
- [22] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, M. Machida, "Hole Localization in Doped One-Dimensional Anderson-Hubbard Model", Phys. Rev. Lett. **101** 016407-1-4 (2008).
- [23] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, and M. Machida, "Hole localization in strongly-correlated and disordered systems: DMRG studies for 1-D and n-leg ladder random Hubbard models", Physica C **468** 1241-1244 (2008).
- [24] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, M. Machida, "Magnetism localization in spin-polarized one-dimensional Anderson-Hubbard model", to appear in Phys. Rev. B (2009).

< 著書 >

- [1] T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. Yoshida, H. Mouri: "Multifractal PDF analysis for intermittent systems" (分担執筆); *Anomalous Fluctuation Phenomena in Complex Systems: Plasma, Fluids, and Financial Markets*, Eds. C. Riccardi and H.E. Roman (Research Signpost, India, 2008) pp.25-55.

- [2] 柴田文明, 北島佐知子, 番 雅司, 有光敏彦:「量子と非平衡系の物理」(東京大学出版会, 2009) in press.
- [3] トポロジーデザイン-新しい幾何学からはじめる物質・材料設計-「量子液体のトポロジカルな特徴付け」NTS Inc. (2009)

< 解説・紀要 >

- [1] 有光敏彦, 有光直子, “Analyses of 4096³ DNS Turbulence conducted by Kaneda’s Group by means of Multifractal PDF Theory”: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 82–91.
- [2] 吉田恭, 有光敏彦「弱い一様磁場下での電磁流体乱流」: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 122–127.
- [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」: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 128–135.
- [4] 有川晃弘: “三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型の先進 Green 関数” 九州大学応用力学研究所 研究集会報告 20ME-S7 (2009) 103–108.
- [5] H. Oguchi and N. Taniguchi, “Thermal Symmetry Crossover and Universal Behaviors in Carbon Nanotube Dots”, arXiv:0811.1439 (2008).

< 講演 >

- [1] 有光直子, 有光敏彦:「4096³ DNS 乱流のマルチフラクタル PDF 解析」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [2] 本池 巧, 有光敏彦:「力学系における r^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [3] 吉田 恭, 有光敏彦:「量子散逸系における真空への粒子ペアの凝縮と Wigner 分布関数」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [4] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: “On extension of the formalism MPDFA and its application to the analyses of DNS 4096³ conducted by Kaneda and Ishihara”, Isaac Newton Institute (INI) Programme High Reynolds Number (HRN) Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日–10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK
- [5] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Detailed analyses of PDFs for energy transfer rates and for energy dissipation rates extracted from DNS 4096³ conducted by Kaneda and Ishihara”, INI Programme HRN Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日–10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK
- [6] T. Motoike and T. Arimitsu: “On a generalization of the Lyra-Tsallis scaling relation within the formalism of multifractal PDF analysis”, INI Programme HRN Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日–10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK

- [7] (招待講演) T. Arimitsu, T. Hayashi, S. Kitajima, F. Shibata: “Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics and its Application to Error-Correction for Spatially Correlated Quantum Errors”, 8th Sendai Workshop *Infinite Dimensional Analysis and Quantum Probability*, 2008年11月, 東北大学大学院 情報科学研究所
- [8] 有光敏彦, 有光直子: 「金田グループによる 4096^3 乱流 DNS のマルチフラクタル PDF 解析」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008年11月, 九州大学応用力学研究所
- [9] 本池 巧, 有光敏彦: 「力学系における n^∞ 周期軌道の階層構造と乱流のマルチフラクタル構造」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008年11月, 九州大学応用力学研究所
- [10] (特別講演) 有光敏彦, 有光直子, 本池 巧: 「乱流のマルチフラクタル構造と n^∞ 周期軌道の階層構造」, 平成 21 年度統計数理研究所共同利用重点型研究「統計科学における乱数」研究会, 2008年12月, 統計数理研究所
- [11] 有光直子, 有光敏彦: 「 4096^3 DNS 乱流のマルチフラクタル PDF 解析 II」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009年3月, 立教大学, 東京
- [12] 本池 巧, 有光敏彦: 「力学系における r^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造 II」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009年3月, 立教大学, 東京
- [13] 大日向正志, 有光敏彦: 「散逸環境下におけるスクイーズド真空の生成—Schrödinger 描像での定式化—」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009年3月, 立教大学, 東京
- [14] 吉田 恭, 有光 敏彦: 「量子散逸系における真空への粒子ペアの凝縮と Wigner 分布関数」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008年9月, 岩手大学.
- [15] Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Spectral anisotropy of MHD turbulence under weak uniform mean magnetic field”, The workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9,10月, Isaac Newton Institute, Cambridge, UK.
- [16] 吉田 恭, 有光敏彦: 「弱い一様磁場下での電磁流体乱流」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008年11月, 九州大学大学院 応用力学研究所
- [17] 吉田 恭: 「乱流の統計理論」, 理論セミナー, 2008年11月, 高エネルギー加速器研究機構.
- [18] 宮崎州正: 「ガラス転移とモード結合理論」, 産業技術総合研究所セミナー, 2008年6月, 産業技術総合研究所
- [19] K. Miyazaki: ”Comments on “ Bifurcation Scenario of Jamming Transition ”” (Discussant for Prof. S. Sasa’s talk), Internatinal Conference on ”Dynamical heterogeneities in glasses, colloids and granular media”. 2008年8月, Leiden
- [20] 金鋼, 宮崎州正, 斉藤真司: 「ランダム媒質中のスローダイナミクス-ガラス転移から局在転移へ-」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008年9月, 岩手大学
- [21] 宮崎州正: 「ガラス転移と動的相関長」, 物性研究所理論セミナー, 2008年9月, 東京大学物性研究所
- [22] (招待講演) 宮崎州正: 「非平衡統計力学の新たな展開」, 第 44 回熱測定討論会 2008年10月, つくば市

- [23] (招待講演) K. Miyazaki: "From glasses to Lorenz gases: A crossover of slow dynamics in random media", JSPS Japan-France Bilateral Joint Seminar 2008 "Frontiers of Glassy Physics", 2008年11月, 京都大学
- [24] (招待講演) K. Miyazaki: "Recent Progresses and Open Problems in Mode-Coupling Theory of Glass Transition", "Unifying Concepts in Glass Physics IV (UCGP2008)", 2008年11月, 京都大学
- [25] K. Miyazaki: "Glass transition in random media", つくばソフトマター研究会, 2009年2月, 筑波大学
- [26] (招待講演) "Bulk-Edge correspondence and fractionalization", Yasuhiro Hatsugai, Workshop on Quantum Spin Hall Effect and Topological Insulators (KITP) 2008年12月10日 Kavli Institute for Theoretical Physics, University of California Santa Barbara Santa Barbara, California, U.S.A.
- [27] (招待講演) "Characteristic edge states of quantum Hall effects in graphene: Dirac fermions and quantum liquids", Y. Hatsugai, Quantum Phases and Excitations in Quantum Hall Systems 2008年6月19日, Max Planck institute for the Physics of Complex Systems (MPIPKS), Dresden, Germany
- [28] (招待講演) "Bulk Edge Correspondence in Quantum Liquids", Yasuhiro Hatsugai, International workshop on quantum critical phenomena and novel phases in superclean materials 2009年1月12日, Honolulu, Hawaii, U.S.A.
- [29] (招待講演) "Berry Phases with/without Time Reversal Invariance", Y. Hatsugai, Topological Aspects of Solid State Physics, 2008年6月26日 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
- [30] "Topological aspects of the $n=0$ Landau level in graphene: chiral symmetry and Hall plateau transition", (selected oral presentation) Y. Hatsugai, Graphene week 2009, ESF(European Science Foundation)-FWF Conference in Partnership with LFUI, 2009年3月5日 Universitätszentrum Obergurgl, Austria
- [31] "Bulk-edge correspondence in graphene with and without magnetic field: Topological aspects of Dirac fermions in real materials" (selected oral presentation) Y. Hatsugai, ICTP Conference Graphene Week 2008, 2008年8月28日 ICTP(International Center for Theoretical Physics) Trieste Italy
- [32] 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, 「強磁場中のグラフェン量子ホール効果におけるランダムネスのレンジの効果」日本物理学会 第64回年次大会 27pYH-10, 2009年3月27日 立教大学, 東京
- [33] 丸山勲, 棚谷翔, 有川晃弘, 初貝安弘, 「リング交換相互作用を持つスピン $1/2$ 梯子系におけるエッジ状態と量子化ベリー位相」日本物理学会 第64回年次大会 27pTJ-9 2009年3月27日, 立教大学, 東京
- [34] 新井正男, 初貝安弘, 「ホール効果における量子・半古典対応の破れ」日本物理学会 第64回年次大会 27pRC-6 2009年3月27日立教大学, 東京
- [35] 「パイポーラロン-BCS クロスオーバー系のトポロジカルな量子相転移」有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘, 日本物理学会 第64回年次大会 27pRC-5 2009年3月27日立教大学, 東京

- [36] 「非可換ベリー接続と時間反転対称性」初貝安弘, 福井隆裕, 日本物理学会 第 64 回年次大会 27pRC-3 2009 年 3 月 27 日立教大学、東京
- [37] 「グラフェン量子ホール不規則系における光学ホール伝導度とプラトー構造」森本高裕, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会 第 64 回年次大会 27pPSB-51 2009 年 3 月 27 日立教大学, 東京
- [38] "Optical Hall conductivity in QHE systems", Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki, 2009 APS March Meeting 2009 年 3 月 19 日 Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [39] "Quantized Berry phase and entanglement entropy for a spin ladder system", Isao Maruyama, Shou Tanaya, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, 2009 APS March Meeting 2009 年 3 月 18 日 Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [40] "Edge States of $S=1/2$ Spin Ladder with Four-Spin Ring exchange International", S. Tanaya, M. Arikawa, I. Maruyama, Y. Hatsugai, Symposium on Interdisciplinary Materials Science, ISIMS-2009 P-016 2009 年 3 月 9 日 EPOCHAL TSUKUBA
- [41] 「フラストレートした磁性体におけるバルク - エッジ対応」特定領域研究フラストレーションが創る新しい物性平成 20 年度領域成果報告会 2009 年 1 月 9 日, 東京大学物性研究所, 柏
- [42] 「フラストレートしたスピンラダーのバルクエッジ対応: 量子化ベリー位相とエンタングルメントエントロピーによる研究」, 丸山勲、棚谷翔、有川晃弘、初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」第 3 回トピカルミーティング「フラストレーションとスピン液体」2008 年 12 月 22 日神戸大学百年記念館六甲ホール
- [43] "Gapped Quantum Liquids as Topological insulators", 初貝安弘, スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会, 2008 年 12 月 20 日奈良県新公会堂
- [44] "Topological Compensation of local charge of $n=0$ Landau level in graphene", スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会 (P5) M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki 2008 年 12 月 19 日奈良県新公会堂
- [45] "Quantum Phase Identification of Gapped Systems by Quantized Berry Phases", I. Maruyama, S. Tanaya, M. Arikawa, Y. Hatsugai, スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会 (P105) 2008 年 12 月 19 日奈良県新公会堂
- [46] 「ナノ分子グラフェンの理論」有川晃弘、初貝安弘、青木秀夫, 筑波大学学際物質科学研究拠点研究会 「ナノ分子磁性体の化学・物理・応用」2009 年 11 月 29 日筑波大学総合研究棟 B 棟 0110 公開講義室
- [47] "Universality of the zero gap semiconductors: From Graphene and d-wave superconductors to topological insulators", Y. Hatsugai, NTT 基礎研セミナー 2009 年 11 月 25 日, NTT Basic Research Laboratories
- [48] 「ゼロギャップ半導体の普遍性: グラフェンと d 波超伝導体からトポロジカル絶縁体へ: ディラック電子とエッジ状態に関するカイラル対称性の意義」初貝安弘, NIMS 高柳研セミナー 2008 年 11 月 19 日つくば NIMS 桜地区
- [49] "Topological Aspects of Graphene: Quantum Hall Effects of filled Dirac Sea and zero mode edge states", Yasuhiro Hatsugai, Dept. of Physics, Univ. of Tokyo, Hatsuda Group, HD-Seminar, 2008 年 10 月 7 日, Univ. of Tokyo, Tokyo, JAPAN

- [50] 「マルチバンドモデルによるグラフェンの量子ホール効果」新井正男, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-1 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [51] 「磁場中グラフェンのボンド秩序相におけるエンタングルメント・エントロピー」有川晃弘, 青木秀夫, 福井隆裕, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-2 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [52] 「グラフェンランダウ準位におけるランダムネスの効果」河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-9 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [53] 「時間反転対称性とベリー位相」初貝安弘, 福井隆裕, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pRB-13 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [54] 「Z2 不変量のトポロジカルな意味」福井隆裕, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pRB-14 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [55] 「リング交換相互作用を持つスピン梯子系のエンタングルメントエントロピー」棚谷翔, 丸山勲, 有川晃弘, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pVD-9 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [56] 「スピン 1/2 系におけるハルデー相の量子化ベリー位相と断熱変形」丸山勲, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 23aPS-15 2008 年 9 月 23 日岩手大学
- [57] "Quantized Berry phase of Kondo insulators", I. Maruyama and Y. Hatsugai, 25-th International Conference of Low Temperature Physics 2008 年 8 月 7 日 Amsterdam, Netherlands
- [58] "Non-adiabatic effect on Laughlin's argument of the quantum Hall effect", I. Maruyama and Y. Hatsugai, 25-th International Conference of Low Temperature Physics 2008 年 8 月 7 日 Amsterdam, Netherlands
- [59] "Edge states for the $n = 0$ Landau level in graphene", M. Arikawa, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [60] "Optical Hall conductivity in the THz region in the quantum Hall regime", T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [61] "Cyclotron radiation and emission in graphene — a possibility of Landau-level laser", T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [62] 「フラストレーションとトポロジカル秩序」初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」平成 20 年度立ち上げ全体会議 2008 年 6 月 23 日, 独立行政法人理化学研究所 和光研究所 鈴木梅太郎記念ホール
- [63] 「四体交換相互作用を持つスピンラダーの量子化ベリー位相」丸山勲, 初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」第 2 回トピカルミーティング「フラストレーションとマルチフェロイックス」2008 年 6 月 6 日京都大学宇治地区木質ホール
- [64] 「近藤絶縁体の量子化ベリー位相による相分類」丸山勲・初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日東京大学理学部 1 号館・小柴ホール

- [65] 「磁場中でのグラフェンの端状態」有川晃弘, 初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日, 東京大学理学部 1 号館・小柴ホール
- [66] 「量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序」初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日東京大学理学部 1 号館・小柴ホール
- [67] M. Arikawa: “Analytic results on the Gutzwiller wave function”, “Topological Aspects of Solid State Physics.”2008 年 6 月, 東京大学 物性研究所.
- [68] M.Arikawa: “Correlation functions of Gutzwiller wave function”, “ASPECTS OF QUANTUM INTEGRABILITY”, 2008 年 7 月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [69] 有川晃弘: “Particle propagator of trigonometric Ruijsenaars-Schneider model”, 日本物理学会 2008 年 秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学.
- [70] 有川晃弘, 西本理: “1 次元超対称性 t-J 模型のスピン 電荷動力学”, 日本物理学会 2008 年 秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学.
- [71] 有川晃弘: “三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型の先進 Green 関数”, 「非線形波動の数理と物理」2008 年 11 月, 九州大学
- [72] 有川晃弘, 西本理: “リング交換相互作用をもつスピン梯子系の動力学”, 第 3 回トピカルミーティング「フラストレーションとスピン液体」2008 年 12 月 神戸大学 (ポスター発表).
- [73] 有川晃弘: “三本鎖スピントープのダイナミクスの理論”(シンポジウム講演) 日本物理学会 2009 年 春季大会, 2009 年 3 月, 立教大学.
- [74] 小口悠, 谷口伸彦: 「軌道縮退量子ドット系の拡張スレーブボゾン平均場近似による解析: 軌道間クーロン相互作用の効果」日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月, 岩手大学).
- [75] 小口悠, 谷口伸彦: 「軌道縮退量子ドット系におけるクーロン相互作用の軌道非対称性と有限バイアス効果」日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月, 立教大学).
- [76] 磯崎健太, 小口悠, 谷口伸彦: 「AB リング系における近藤温度のリングサイズ依存性」日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月, 立教大学).
- [77] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, and M. Machida, “Magnetism Localization and Hole Localization in Fermionic Atoms Loaded on Optical Lattice”, American Physical Society March Meeting (March 2009, Pittsburg).

< 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] 有光敏彦: 物理チャレンジ・オリンピック委員会運営会議 委員
- [4] 有光敏彦: 国際物理オリンピック派遣員会 参加派遣部会 部会長
- [5] 有光敏彦: 国際物理オリンピック派遣員会 教育研修部会 委員

- [6] 有光敏彦：物理チャレンジ 2008 実行委員会 現地実行部会 委員
- [7] 初貝安弘：Progress of Theoretical Physics 編集委員
- [8] 初貝安弘：東京大学物性研究所附属物質設計評価施設（スーパーコンピュータ共同利用課題審査）
- [9] 初貝安弘：Program Committee of the 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)
- [10] 宮崎州正：体験授業「身近なものほど『？』がいっぱい 理論物理が挑戦するガラスの世界」, 筑波大付属駒場高校 2 年生対象, 2008 年 7 月, 筑波大学
- [11] 宮崎州正：日本物理学会領域 12 世話人, 2008 年 5 月–2009 年 4 月
- [12] 宮崎州正：日本物理学会・学会誌編集委員
- [13] 吉田恭：日本物理学会領域 11 領域役員, 2007 年 5 月–2008 年 4 月.

< 外部資金 >

- [1] 科学研究費補助金若手研究 (B) (平成 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：吉田恭)、課題番号 19740229 「乱流統計理論の宇宙規模流体への展開」(平成 20 年度 1,100 千円)
- [2] 科学研究費補助金基盤研究 (C) (平成 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：宮崎州正) 課題番号 19540432 「ガラス転移と動的相関長」(平成 20 年度 1,300 千円)
- [3] 科学研究費補助金特定領域研究「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 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：宮崎州正) 課題番号 19031027 「コロイドゲルの生成ダイナミクスとレオロジー」(平成 20 年度 1,450 千円)
- [4] 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」基盤研究 (B) 代表 交付金額 5,400,000 円 直接経費 5,400,000 円 間接経費 1,620,000 円
- [5] 初貝安弘 20029004 「量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序」特定領域研究 (A) (公募) 代表 交付金額 1,100,000 円 直接経費 1,100,000 円
- [6] 初貝安弘 20046002 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相」特定領域研究 (A) (公募) 代表 交付金額 1,000,000 円 直接経費 1,000,000 円
- [7] 初貝安弘 20654034 「量子液体におけるパルクーエッジ対応とエンタングルメントエントロピー」萌芽研究 代表 交付金額 2,000,000 円 直接経費 2,000,000 円

< 卒業論文 (学士) >

- [1] 筑波大学卒業論文：阿部朝彦 (有光) 「BBGKY 階層と Boltzmann 方程式」(2009) 3 月.
- [2] 筑波大学卒業論文：川本達郎 (有光) 「開放系と共鳴状態」(2009) 3 月.
- [3] 筑波大学卒業論文：阿部弘幸 (初貝、有川) 「磁場中グラフェンの量子ホール効果とその拡張」(2009) 3 月.

< 学位論文 (修士) >

- [1] 筑波大学修士論文：大日向正志 (有光) 「量子散逸系を扱う正準演算子形式に基づくスクイーズド真空の研究—シュレディンガー描像での定式化—」(2009) 3 月.

< 学位論文 (博士) >

- [1] 筑波大学博士論文: 本池 巧 (有光) < 社会人早期終了プログラム > 「 2^n 周期軌道のトポロジー及び階層構造とその物理系への応用」(2008) 12 月.
- [2] 筑波大学博士論文: Haruka Oguchi (谷口), “Quantum transport properties through a quantum dot with two-fold orbital degeneracy and orbital asymmetry in electron-electron interactions”, (2009) 2 月.

VII-2 計算物性グループ

教授 白石賢二
准教授 岡田晋
客員教授 押山淳
博士研究員 岩田潤一、高木祥光、村口正和
大学院生 7名

概要:

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

本報告書は計算物性研究室で行っているテーマを上記2つの大きなテーマに分類し、各々のテーマについての20年度の成果を報告する。

[1] 新しい計算手法の開発

1) 超高速並列計算機 PACS-CS 上での実空間密度汎関数法プログラムの開発とその応用

[国内会議 [1-5]]

密度汎関数法に基づく第一原理計算は物理・化学のみならず、材料開発の現場においても非常に重要なツールとなっている。本研究は次世代超並列計算機を有効活用し、大規模なナノスケールシステムを扱える実空間密度汎関数コード(RSDFT)の開発を行う。コード開発と平行して、実際に10000原子を越えるSi量子ドット系に対する応用計算、計算科学者との連携によるアルゴリズムの見直しおよびチューニング、性能測定など、様々な角度から研究を進めている。また通常の基底状態に対する応用に留まらず、時間依存密度汎関数法に基づく電子励起状態、電子ダイナミクスに対する大規模計算への応用も目指し、コード開発・応用計算を進めている。

[2] 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

1) C₆₀内包ナノチューブのエネルギー論 [論文[8]]

C₆₀や種々のフラーレンを内包したナノチューブは、炭素ピーポッドと呼ばれ、異なる次元性を有するsp²炭素ナノ複合構造体として98年の発見以降、ナノスケール炭素物質科学の分野で注目を集めている。特に、次元性の違いが誘起する電子構造の差異に起因する、種々の興味深い物性発現が予言、報告なされている。例えば、C₆₀を内包した金属ナノチューブでは、全炭素系

にも関わらず、CNT からフラーレンへの電荷移動が生じる事が我々によって示されている。

ここでは、直径の大きなナノチューブに着目し、そこへの C_{60} 内包のエネルギー論を調べた。特に、内包によるナノチューブの変形の可能性を調べた。図に変形、非変形のピーポッドの最適化構造を示す。(12, 12) から (20, 20) までの全てのナノチューブに対して、変形、非変形構造時の内包エネルギー利得の見積を行った。その結果、内包によるエネルギー利得は変形ナノチューブの方が常に大きく、チューブ径によらず、ほぼ C_{60} あたり 1eV 程度となった(図 1)。他方、非変形ピーポッドでは、チューブ径の増加に伴い内包エネルギーは減少し $0.2\text{eV}/C_{60}$ に漸近していく。この違いは、変形チューブでは C_{60} を囲む構造が、 C_{60} と 3.3\AA の壁間距離領域を大きく有している事によるものであり、また、この C_{60} 近傍の構造がチューブ径増加で変化しない事に起因している。一方、非変形では、チューブ径増加にともなうチューブ曲率の減少により、 C_{60} 近傍の局所構造はグラファイトに漸近していく、故に、 C_{60} のグラファイト上の吸着エネルギー 0.2eV となる。

次に、(10, 10) ナノチューブ中に内包された C_{60} 分子の長周期の構造変調の可能性を調べた。ここでは、ユニットセルに 2 個の C_{60} を含んだピーポッドを考えて、その安定構造の探索をおこなった。さらに、実験的に報告がなされている、電子線照射等による C_{60} の重合化の活性障壁の見積をおこなった。先ず、2 倍周期の範囲での長周期の構造変調は存在し得ない事をあきらかにした。すなわち、ナノチューブ中において C_{60} は等間隔に配置されているのがエネルギー的に最安定である事があきらかになった。次に、内包 C_{60} 間に [2+2] 結合有するダイマー形成のエネルギー論を調べた。その結果、重合化の活性障壁は 1.4eV 程度と見積もられ、ピーポッド構造において、自発的な重合化は起こり得ず、電子線、熱等の何らかの外的要因が重合化を引き起こしている事が示された。

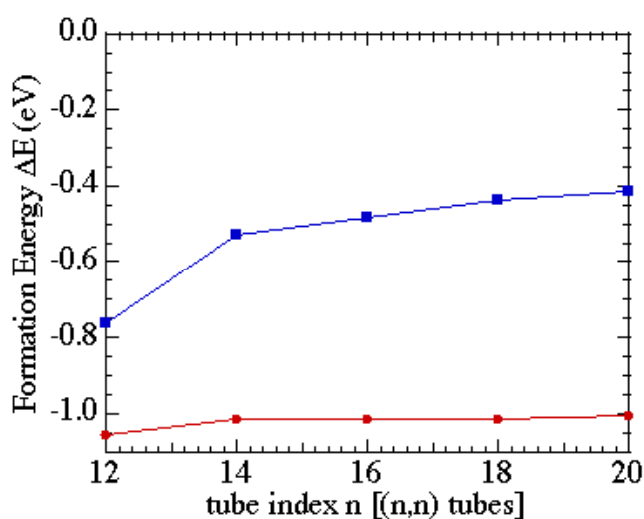


図 1 : Reaction energies per C_{60} in the encapsulation reaction for the (12,12), (14,14), (16,16), (18,18) and (20,20) armchair nanotubes with circular (blue squares) and elliptical (red circles) cross-sections.

2) ピーポッドにおける電子状態変調 [論文[6]]

我々はこれまでに、ナノチューブにフラーレンを挿入することにより得られるピーポッドにおいて、その電子物性が構成単位であるフラーレン、ナノチューブの単純な足し合わせではないことを示してきた。すなわち、空隙に存在する電子状態を介して、両者の電子構造の間の混成が生

じ、空隙の大きさに依存した電子構造の変調が生じる。この事は、ホストであるチューブ固有の物性にたいしても何らかの影響を及ぼしていることが予想される。そこで、我々は、C60を内包したアームチェアナノチューブにおいて、その動径収縮モードの内包前後での変調を調べた。その結果、(10,10)チューブでは、RBM振動数のハードニングが起こることがあきらかになった。これは、内包C₆₀が(10,10)チューブに対して、その動径方向の構造変化に対して障害物として働くためである。それに対して、太いチューブにおいては、そのRBMシフトは僅かにソフト化することが明らかになった。これは、C₆₀とチューブの間の波動関数混成により、空隙領域での電荷分布の増加し、その結果としてCNTの π 電子密度が有効的に減少したことに起因するものである。さらに、ジグザグ螺旋度を有するナノチューブに対してもRBMシフトの解析を行い、そのシフトがアームチェアと同様に、太いチューブでは低波数側、細いチューブでは高波数側にシフトする事があきらかになった。この結果を元に、実験による測定の理論解析を行い、実験結果に対する理論的解釈を与えた。

3) シリコン表面に於けるエッジ状態 [論文[7]]

ジグザグ型の端を持つグラフェンリボンでは特異な端局在状態、すなわちエッジ状態の発現が知られている。エッジ状態は、波数空間の限られた領域においてのみ、平坦なバンドを伴う端局在性を示し、その発現条件は解析的に示されている。ここでは、グラフェンにおけるエッジ状態が、シリコン表面に於いても発現する事を密度汎関数理論に基づく計算からあきらかにした。すなわち、シリコンの(111)表面において、フェルミレベル下4 eV~5eVの限られた波数領域において平坦なバンドを形成し、その分布はグラフェンにおけるエッジ状態と同様に、限られた波数において表面に完全に局在し、それ以外の波数空間では広がったふるまいを示す。解析計算の結果、この状態がグラフェンのエッジ状態と同様に電子のサイト間遷移のバランスによる表面局在状態である事があきらかになった。

4) グラフェンの端のエネルギー論 [論文[5]]

グラファイト、CNT等のsp²炭素ネットワーク物質の端に対するエネルギー論はこれまでまったくなされていない。しかしながら、CNTやグラファイトをデバイスとして用いる際、その端の存在、さらには端と異種物質との複合界面の存在は本質である。例えば、シリコン等の半導体に対しては、その表面の生成エネルギー等が詳細に調べられている。そこで、我々はsp²炭素ネットワークの端(1次元表面)生成のエネルギー論の解明を行った。ここでは、グラファイトリボンに対して、その端の生成エネルギーの計算を行った。その結果、清浄、水素化端両者に対して、アームチェア型と呼ばれる端形状がより安定であることが明らかになった。清浄端の生成エネルギーは、アームチェアで2.3eV/bond、ジグザグで3.3eV/bondであり、水素末端により、このエネルギーは著しく減少し、アームチェアでは0.1eV/bond、ジグザグでは0.3eV/bondとなる。清浄端におけるアームチェアの高い安定性は、端における2配位サイトの構造緩和によるものである。すなわち、端の2つの2配位サイトが強くダイマー化し、三重結合を形成し安定化する。

これに対して、ジグザグ端ではそのような構造緩和ができない。水素化端における、ジグザグ端の高い生成エネルギーの起源は、グラファイトジグザグ端において本質である、フェルミレベルに発現する平坦バンド状態によるものである。また、ジグザグ端の生成エネルギーが比較的リボン幅に依存しないのに対して、アームチェアのそれは明らかなリボン幅依存性を示す。これは、アームチェア端を持つリボンにおいて、その幅の3倍周期で、金属（スモールギャップ半導体）、

ラーズギャップ半導体と電子状態の特徴を反映している。すなわち、 sp^2 炭素ネットワークにおける端形成においては、その電子状態が端安定性と密接に関係している

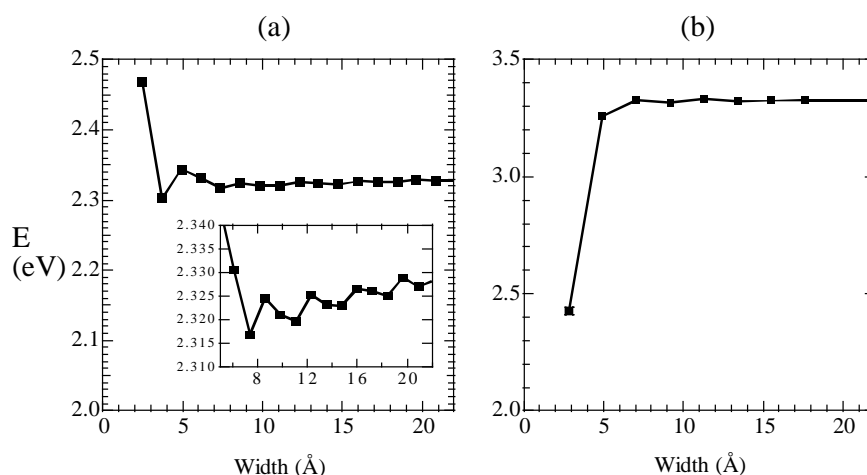


図 2 : グラファイトリボンにおける端の生成エネルギー(a)アームチェア端、(b)ジグザグ端

5) オーミック接触の新しい物理モデルの提案 [論文[19]、国際会議[27, 40]、修士論文[2]]

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ンギ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ンギ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 3)を提案した。このモデル

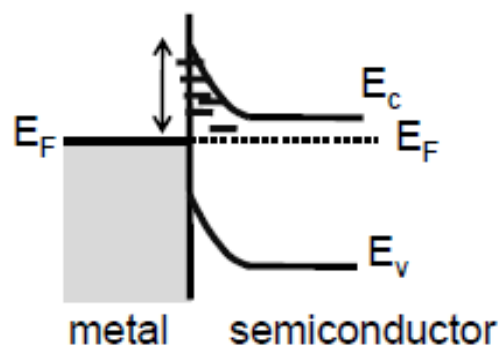


図 3 : 本研究で提案した新たなオーミック接触のモデル

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。さらに詳細について、今後の研究で本モデルの真偽も含めて検討してゆく予定である。

6) MONOS 型メモリの電荷蓄積機構の研究 [国内会議[43, 44]]

MONOS 型メモリの電荷蓄積層である SiN 絶縁膜の電荷蓄積機構を第一原理計算で検討した。MONOS 型メモリは SiN/SiO₂ の界面をその構成要素としているため、界面付近での原子の相互拡散がどのようにメモリ動作に影響するかを考察することは科学的そして産業的に極めて重要となる。計算の結果、SiN 絶縁膜の堅固さと柔軟さが電荷トラップ機構に密接に関係することを明らかにした。具体的には、SiN 膜中に酸素原子が混入されると、メモリの書き込み/消去動作の基本である電子及びホール注入による荷電状態の変化による混入して O 原子が 2 配位にも 3 配位にもなりうることを明らかにした。これは書き込み/消去動作によって O が混入した SiN 膜の構造が崩壊する可能性を示している。このことは、実用的に O が多く混入している SiN を実用的に使いこなすのは困難が伴うことを示唆しており、産業上も重要な結果である。これに対し、N 空孔のみを有する SiN 膜に対して書き込み/消去を行ってもヤン・テラー効果に対応した N 空孔周辺の構造変化が生じるのみで、構造が大きく崩れることはなかった。このことは、N 空孔にキャリアを注入する方式で MONOS 型メモリを作製すれば、メモリ動作を多数回行ってもその特性は維持できることを示しており、理想的な MONOS 型メモリが実現できることを示唆している。しかしながら、O を混入しないと SiN 膜中に N 空孔等の欠陥の数が十分に形成されないことが実験的に示唆されていることを考慮すると、最適な O 混入量が存在することを示唆している。

7) サファイア表面の第一原理計算 [博士論文[2]]

サファイア表面を第一原理計算で行い、イオン性と共有結合性の競合によってサファイア表面は大きな構造緩和を起こすことが分かった。こうした大きな構造緩和がストイキオメトリック表面の安定性やサファイア表面が化学的に不活性であることと密接に関連していることを体系的に明らかにした。

8) 歪んだ Ge チャネルのホールキャリアの起源 [博士論文[1]、論文[24]、国際会議[19, 20]]

歪んだ Ge チャネルに空孔が生じると特に一軸性の圧縮歪みにおいて Ge 空孔レベルが価電子帯の直上に出現しアクセプタ準位となることを示した。この結果は、実験で観測されている Ge チャネルのホールキャリアの起源に示唆を与えるものである。

9) バイオ物質におけるプロトン親和性の再考 [国内会議[32]、修士論文[1]]

バイオ物質におけるプロトン親和性に対して、統計力学と第一原理計算による考察を行った。

その結果、注目する部位が外界の水溶液と繋がっているか否かで配置のエントロピー効果が大きく異なるため、プロトン親和性が劇的に（3ケタから5ケタ程度）変調されることを明らかにした。本計算は第一原理計算でプロトン親和性を求めることの難しさを如術に示すものである。

<論文>

1. T. Otohe, M. Yamagiwa, J.-I. Iwata, K. Yabana, T. Nakatsukasa, G. F. Bertsch, "First-principles electron dynamics simulation for optical breakdown of dielectrics under an intense laser field", *Physical Review B* 77, 165104 (2008).
2. T. Otohe, K. Yabana, J.-I. Iwata, "First-principle calculation of the electron dynamics in crystalline SiO₂", *Journal of Physics Condensed Matter* 21, 064224 (2008).
3. T. Otohe, K. Yabana, J.-I. Iwata, "First-principle electron dynamics simulation for optical breakdown of dielectrics under an intense laser field", *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, in press.
4. T. Obata, J.-I. Iwata, K. Shiraishi, A. Oshiyama, "First-principles studies on In-related nitride semiconductors", *Journal of Crystal Growth* 311, 2772 (2009).
5. Susumu Okada, "Energetics of nanoscale graphene ribbons: Edge geometries and electronic structures" *Physical Review B*, Vol. 77, art. no. 041408(R) (2008).
6. Toshiya Okazaki, Shingo Okubo, Takeshi Nakanishi, Takeshi Saito, Minoru Otani, Susumu Okada, Shunji Bandow, and Sumio Iijima, "Optical Bandgap Modulation of Single-Walled Carbon Nanotubes by Encapsulated Fullerenes" *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, 4122 -- 4128 (2008).
7. Yohiteru Takagi and Susumu Okada "Topologically Induced Surface Electron State on Si(111) Surfaces" *Surface Science*, Vol. 602, 2876--2879 (2008).
8. Susumu Okada, "Energetics of carbon peapods: Elliptical deformation of nanotubes and aggregation of encapsulated C₆₀" *Physical Review B*, Vol. 77, art. no. 235419 (2008).
9. M. Kadoshima, T. Matsuki, S. Miyazaki, K. Shiraishi, T. Chikyo, K. Yamada, T. Aoyama, Y. Nara, and Y. Ohji, "Effective-Work-Function Control by Varying the TiN Thickness in Poly-Si/TiN Gate Electrodes for Scaled High-k CMOSFETs", *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, Vol 30, 466-468 (2009)
10. Y. Kita, S. Yoshida, T. Hosoi, T. Shimura, K. Shiraishi, Y. Nara, K. Yamada, and H. Watanabe, "Systematic study on work-function-shift in metal/Hf-based high-k gate stacks", *APPLIED PHYSICS LETTERS*, Vol 94, Art. No. 122905 (2009)
11. M. Muraguchi, K. Shiraishi, T. Okunishi, K. Takeda, "Theoretical study of the time-dependent phenomenon of photon-assisted tunneling through a charged quantum dot", *JOURNAL OF PHYSICS-CONDENSED MATTER*, Vol 21, Art. No. 064230 (2009).
12. N. Umezawa, M. Sato, K. Shiraishi, "Reduction in charged defects associated with oxygen vacancies

- in hafnia by magnesium incorporation: First-principles study”, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, Vol 93, Art. No. 223104 (2008).
13. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, and K. Shiraishi, “Theoretical Study of the Time-Dependent Phenomena on a Two-Dimensional Electron Gas Weakly Coupled with a Discrete Level”, *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol 47, 7807-7811 (2008)
 14. M. Sato, C. Tamura, K. Yamabe, K. Shiraishi, S. Miyazaki, K. Yamada, R. Hasunuma, T. Aoyama, Y. Nara, and Y. Ohji, “Cathode Electron Injection Breakdown Model and Time Dependent Dielectric Breakdown Lifetime Prediction in High-k/Metal Gate Stack p-Type Metal-Oxide-Silicon Field Effect Transistors”, *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol 47, 3326-3331 (2008)
 15. Y. Takada, M. Muraguchi, and K. Shiraishi, “Quantum cascade multi-electron injection into Si-quantum-dot floating gates embedded in SiO₂ matrices”, *APPLIED SURFACE SCIENCE*, Vol 254, 6199-6202 (2008)
 16. N. Umezawa, K. Shiraishi, Y. Akasaka, A. Oshiyama, S. Inumiya, S. Miyazaki, K. Ohmori, T. Chikyow, T. Ohno, K. Yamabe, Y. Nara, and K. Yamada, “Chemical controllability of charge states of nitrogen-related defects in HfO_xN_y:First-principles calculations”, *PHYSICAL REVIEW B*, Vol 77m Art. No. 165130 (2008)
 17. M. Sato, K. Yamabe, K. Shiraishi, S. Miyazaki, K. Yamada, C. Tamura, R. Hasunuma, S. Inumiya, T. Aoyama, Y. Nara, and Y. Ohji, “Comprehensive analysis of positive and negative bias temperature instabilities in high-k/metal gate stack metal-oxide-silicon field effect transistors with equivalent oxide thickness scaling to sub-1 nm”, *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol 47, 2354-2359 (2008)
 18. Y Sakurai, S Nomura, K Shiraishi, M Ikeda, K Makihara and S Miyazaki, “Temperature dependence of capacitance of Si quantum dot floating gate MOS capacitor”, *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol, 50, 022071 (2009)
 19. Y Takada, M Muraguchi, S Nomura and K Shiraishi, “Theoretical studies of coupled quantum dot system with a two-dimensional electron gas in the magnetic fields”, *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol, 150, 022083 (2009)
 20. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura and K. Shiraishi, “Theoretical study of the electron dynamics of a quantum wire coupled with the quantum dots”, *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 150, 022061 (2009)
 21. Yeonghun Lee, Takahiro Nagata, Kuniyuki Kakushima, Kenji Shiraishi, and H. Iwai, “Electronic Structure Analysis of Silicon Nanowires for High Conductivity in n- and p-channel Nanowire-FET”, *ECS Trans.* 16 (40), 1 (2009)
 22. Kikuo Yamabe, Kouichi Murata, Tomohiro Hayashi and T.C. Tamura, Motoyuki Sato, Akira Uedono, Kenji Shiraishi, Naoto Umezawa, Toyohiro Chikyow, Heiji Watanabe, Yasuo Nara, Yuzuru Ohji, S. Miyazaki, Keisaku Yamada, and Ryu Hasunuma, “Effect of Annealing on Electronic Characteristics of HfSiON Films fabricated by Damascene Gate Process”, *ECS Trans.* **16** (5), 521 (2008)

23. Heiji Watanabe, Shinichi Yoshida, Yuki Kita, Takuji Hosoi, Takayoshi Shimura, Kenji Shiraishi, Yasuo Nara, and Keisaku Yamada, "Fundamental Aspects of Effective Work Function Instability of Metal/Hf-based High-k Gate Stacks", *ECS Trans.* **16** (5), 27 (2008)
24. Kentaro Takai, Kenji Shiraishi, and Atsushi Oshiyama, "Generation of Acceptor Levels in Ge by the Uniaxial Strain - A Theoretical Approach", *ECS Trans.* **16** (10), 261 (2008)
25. Seiichi Miyazaki, Hiromichi Yoshinaga, Akio Ohta, Yasushi Akasaka, Kenji Shiraishi, Keisaku Yamada, Seiji Inumiya, Masaru Kadoshima, and Yasuo Nara, "Photoemission Study of Metal/HfSiON Gate Stack". *ECS Trans.* **13** (2), 67 (2008)
26. Kenji Shiraishi, Takashi Nakayama, Takashi Nakaoka, Akio Ohta, and Seiichi Miyazaki, "Theory of Metal/Dielectric Interfaces -Breakdown of Schottky Barrier Limits-", *ECS Trans.* **13** (2), 21 (2008)
27. Kenji Ohmori et al., "Control of Crystalline Microstructures in Metal Gate Electrodes for Nano CMOS Devices", *ECS Trans.* **13** (2), 201 (2008)
28. Naoto Umezawa, Kenji Shiraishi, Kuniyuki Kakushima, Hiroshi Iwai, Kenji Ohmori, Keisaku Yamada, and T. Chikyow, "Relation between Solubility of Silicon in High-k Oxides and the Effect of Fermi Level Pinning", *ECS Trans.* **13** (2), 15 (2008).
29. K. Ohmori, T. Matsuki, D. Ishikawa, T. Morooka, T. Aminaka, Y. Sugita, T. Chikyow, K. Shiraishi, Y. Nara, K. Yamada, "Impact of additional factors in threshold voltage variability of metal/high-k gate stacks and its reduction by controlling crystalline structure and grain size in the metal gates", *Tech. Digest 2008 IEEE Electron Devices Meeting*, p.409-412, 2008.
30. M. Sato, N. Umezawa, J. Shimokawa, H. Arimura, S. Sugino, A. Tachibana, M. Nakamura, N. Mise, S. Kamiyama, T. Morooka, T. Eimori, K. Shiraishi, K. Yamabe, H. Watanabe, K. Yamada, T. Aoyama, T. Nabatame, Y. Nara, Y. Ohji, "Physical model of the PBTI and TDDB of Ia incorporated HfSiON gate dielectrics with pre-existing and stress-induced defects", *Tech. Digest 2008 IEEE Electron Devices Meeting*, p. 119-122, 2008.
31. M. Sato, N. Umezawa, N. Mise, S. Kamiyama, M. Kadoshima, T. Morooka, T. Adachi, T. Chikyow, K. Yamabe, K. Shiraishi, S. Miyazaki, A. Uedono, K. Yamada, T. Aoyama, T. Eimori, Y. Nara, Y. Ohji, "Physical understanding of the reliability improvement of dual high-k CMOSFETs with the fifth element incorporation into HfSiON gate dielectrics", *Tech. Digest 2008 Symposium on VLSI Technology*, p.66-67, 2008.
32. Kadoshima, M.; Matsuki, T.; Mise, N.; Sato, M.; Hayashi, M.; Aminaka, T.; Kurosawa, E.; Kitajima, M.; Miyazaki, S.; Shiraishi, K.; Chikyow, T.; Yamada, K.; Aoyama, T.; Nara, Y.; Ohji, Y. "Improved FET characteristics by laminate design optimization of metal gates -Guidelines for optimizing metal gate stack structure-", *Tech. Digest 2008 Symposium on VLSI Technology*, p.48-49, 2008.
33. Y. Kangawa, T. Akiyama, T. Ito, K. Shiraishi, K. Kakimoto, "Theoretical approach to structural stability of GaN: How to grow cubic GaN", *Journal of Crystal Growth* **311**, 3106-3109 (2009)
34. Keita Yamaguchi, Akira Otake, Kenji Kobayashi, Kenji Shiraishi, "Atomistic origin of high-quality

“novel SiON gate dielectrics”, Microelectronic Engineering, 86, 1680-1682 (2009).

35. <招待論文> Kenji Shiraishi, "Theoretical models for work function control", Microelectronic Engineering, 86, 1733-1736 (2009).
36. Naoto Umezawa, Kenji Shiraishi, Toyohiro Chikyow, "Stability of Si impurity in high- κ oxides" Microelectronic Engineering, 86, 1780-1781 (2009).
37. Akira Otake, Keita Yamaguchi, Kenji Kobayashi, Kenji Shiraishi, "Theoretical studies on the charge trap mechanism of MONOS type memories – Relationship between atomistic information and program/erase actions", Microelectronic Engineering, 86, 1849-1851 (2009).

<講演>

国際会議

1. <招待講演> A. Oshiyama, J.-I. Iwata, K. Shiraishi, "Large-Scale Density Functional Calculations Using Real-Space Parallel-Computation Techniques", The 1st international conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience, Tokyo, June 3-7, 2008.
2. J.-I. Iwata, Y. Kawashita, K. Yabana, "Real-Space and Real-Time Method for Linear and Nonlinear Optical Properties of Fullerene-based Materials", International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Crete, Greece, Sep. 25-30, 2008
3. J.-I. Iwata, T. Obata, K. Shiraishi, A. Oshiyama, "Hidden Metallic Nature of In-containing Nitride semiconductors", International Workshop on Nitride semiconductors, Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008
4. Susumu Okada, "Energetics of Nanographite: Edge Geometries and Electronic Structure" 9th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT08), June 29 -- July 4, 2008, Montpellier.
5. Takazumi Kawai, Susumu Okada, and Yoshiyuki Miyamoto, "Mechanical-Tearing Simulations of Graphene for the Validation of Favorable Atomic Edge Structures" 9th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT08), June 29 -- July 4, 2008, Montpellier.
6. Minoru Otani and Susumu Okada. "Electric-field induced semiconductor-metal transition of bilayer graphene", 9th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT08), June 29 -- July 4, 2008, Montpellier.
7. K. Yanagi, Y. Miyata, Z. Liu, K. Suenaga, S. Okada, and H. Kataura, "Optical properties of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotubes with encapsulated molecules" 9th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT08), June 29 -- July 4, 2008, Montpellier.
8. <招待講演> Susumu Okada, "Energetics of Nanographite Ribbons", Okazaki Conference 2009: From Aromatic Molecules to Graphene: Chemistry, Physics and Device Applications, February 21 - 23, 2009, Okazaki Conference Center, Okazaki.

9. <招待講演>K. Shiraishi, T. Nakayama, S. Miyazaki, A. Ohta, Y. Akasaka, H. Watanabe, Y. Nara and K. Yamada, “Theoretical investigations on metal/high-k interfaces“, 2008 International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, Beijing, China (Oct. 20-23, 2008).
10. <招待講演>K. Shiraishi, T. Nakayama, T. Nakaoka, A. Ohta and S. Miyazaki, “Theoretical Investigation of Metal/Dielectric Interfaces -Breakdown of Schottky Barrier Limits-“, 214th Meeting of Electrochemical Society, Phoenix, AZ., USA, (May., 2008).
11. <招待講演>K. Shiraishi, “What happens at nano-scale interfaces?“, The 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, (November 9-13, 2008, Tokyo)
12. <招待講演>N. Umezawa, K. Shiraishi, K. Kakushima, H. Iwai, K. Ohmori, K. Yamada and T. Chikyow, “Relation Between Solubility of Silicon in High-k Oxides and the Effect of Fermi Level Pinning”, 214th Meeting of Electrochemical Society, Phoenix, AZ., USA, (May., 2008)
13. <招待講演>S. Miyazaki, H. Yoshinaga, A. Ohta, Y. Akasaka, K. Shiraishi, K. Yamada, S. Inumiya, M. Kadoshima and Y. Nara, “Photoemission Study of Metal/HfSiON Gate Stack”, 214th Meeting of Electrochemical Society, Phoenix, AZ., USA, (May., 2008)
14. <招待講演>K. Ohmori, T. Chikyow, T. Hosoi, H. Watanabe, K. Nakajima, T. Adachi, A. Ishikawa, Y. Sugita, Y. Nara, Y. Ohji, K. Shiraishi, K. Yamabe and K. Yamada,, “Control of Crystalline Microstructures in Metal Gate Electrodes for Nano CMOS Devices”, 214th Meeting of Electrochemical Society, Phoenix, AZ., USA, (May., 2008)
15. <招待講演>H. Watanabe, S. Yoshida, Y. Kita, T. Hosoi, T. Shimura, K. Shiraishi, Y. Nara, and K. Yamada, “Fundamental Aspects of Effective Work Function Instability of Metal/Hf-based High-k Gate Stacks”, 215th Meeting of Electrochemical Society, Honolulu, HI., USA, (October, 2008).
16. <招待講演>K. Yamabe, T. Hayashi, T. C. Tamura, A. Uedono, K. Shiraishi, N. Umezawa, T. Chikyow, H. Watanabe, Y. Nara, Y. Ohji, S. Miyazaki, K. Yamada and R. Hasunuma, “Annealing Effect on Electronic Characteristics of HfSiON Films fabricated by Damascene Gate Process”, 215th Meeting of Electrochemical Society, Honolulu, HI., USA, (October, 2008)
17. T. Obata, K. Shiraishi and A. Oshiyama, “First-principles studies on In-related nitride semiconductors”, International Symposium on Growth of III-Nitrides, Izu, Shizuoka, Japan (July 6-9, 2008)
18. Y. Kangawa, T. Akiyama, T. Ito, K. Shiraishi, and K. Kakimoto, “Theoretical approach to structural stability of GaN: How to grow cubic GaN”, International Symposium on Growth of III-Nitrides, Izu, Shizuoka, Japan (July 6-9, 2008)
19. K. Takai, K. Shiraishi, and A. Oshiyama, “Theoretical Investigation on Ge Vacancies under Uniaxial Strain -Generation of Acceptor Level Induced by Uniaxial Strain-“ The 4th International SiGe Technology and Device Meeting, Hsinchu, Taiwan, May 11-14, 2008.
20. Kentaro Takai, Kenji Shiraishi, and Atsushi Oshiyama, “Generation of Acceptor Levels in Ge by the Uniaxial Strain -A Theoretical Approach”, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State

- Science, Honolulu, Hawaii, USA, October 13-17, 2008.
21. Yeonghun Lee, Takahiro Nagata, Kuniyuki Kakushima, Kenji Shiraishi, and H. Iwai, "Electronic Structure Analysis of Silicon Nanowires for High Conductivity in n- and p-channel Nanowire-FET", Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science, Honolulu, Hawaii, USA, October 13-17, 2008.
 22. Motoyuki Sato, Chihiro Tamura, Kikuo Yamabe, Kenji Shiraishi, Seiichi Miyazaki, Keisaku Yamada, Ryu Hasunuma, Takayuki Aoyama, Yasuo Nara and Yuzuru Ohji, "Impact of nitrogen in HfSiON and of activation annealing on hole trapping and applicable of a technique to separate hole trap effects from interface state degradation in NBTI of HfSiON/TiN", IEEE International Reliability Physics Symposium, Phoenix, AZ, USA, April 28 – 30, 2008.
 23. T. Ishida, N. Tega, Y. Mori, H. Miki, T. Mine, H. Kume, M. Muraguchi*, Y. Takada*, K. Shiraishi* and R. Yamada, "A New Insight into the Dynamic Fluctuation Mechanism of Stress-Induced Leakage Current", IEEE International Reliability Physics Symposium, Phoenix, AZ, USA, April 28 – 30, 2008.
 24. Yukihiro Takada, Masakazu Muraguchi, Shintaro Nomura and Kenji Shiraishi, "Tunable interaction between the two-dimensional electron gas and an isolated level by the magnetic field", International Conference on Physics of Semiconductor, Rio de Janeiro, Brazil, July 27-August1 2008.
 25. Masakazu Muraguchi, Yukihiro Takada, Shintaro Nomura and Kenji Shiraishi, "Theoretical Study on Electron Dynamics for a Two-Dimensional Electron Gas Coupled with a Quantum Dot", International Conference on Physics of Semiconductor, Rio de Janeiro, Brazil, July 27-August1 2008.
 26. Y Sakurai, S Nomura, K Shiraishi, M Ikeda, K Makihara and S Miyazaki, "Temperature dependence of capacitance of Si quantum dot floating gate MOS capacitor", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, The Netherlands, 6–13 August 2008
 27. Y Takada, M Muraguchi, S Nomura and K Shiraishi, "Theoretical studies of coupled quantum dot system with a two-dimensional electron gas in the magnetic fields", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, The Netherlands, 6–13 August 2008
 28. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura and K. Shiraishi, "Theoretical study of the electron dynamics of a quantum wire coupled with the quantum dots", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, The Netherlands, 6–13 August 2008
 29. Yoko Sakurai, Shintaro Nomura, Yukihiro Takada, Kenji Shiraishi, Masakazu Muraguchi¹, Tetsuo Endoh, Mitsuhisa Ikeda, Katsunori Makihara, Seiichi Miyazaki, "Temperature Dependence of Electron Transport between Quantum Dots and Electron Gas", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (*ISNTT2009*), Atsugi, Kanagawa, Japan, January 20-23, 2009
 30. Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, "Temperature Dependence of Electron Tunneling between Quantum Dots and Electron

- Gas”, American Physical Society March Meeting 2009, Pittsburgh, USA, Mar. 15-19 2009
31. Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Yoko Sakurai¹, Shintaro Nomura¹, Yukihiro Takada¹, Kenji Shiraishi¹, Mitsuhsa Ikeda², Katsunori Makihara², Seiichi Miyazaki², Yasuteru Shigeta, “New insight into Tunneling Process between Quantum Dot and Electron Gas”, American Physical Society March Meeting 2009, Pittsburgh, USA, Mar. 15-19 2009
 32. K. Ohmori, T. Matsuki, D. Ishikawa, T. Morooka, T. Aminaka, Y. Sugita, T. Chikyow, K. Shiraishi, Y. Nara, K. Yamada, “Impact of additional factors in threshold voltage variability of metal/high-k gate stacks and its reduction by controlling crystalline structure and grain size in the metal gates”, 2008 IEEE Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, Dec. 15-17, 2008.
 33. M. Sato, N. Umezawa, J. Shimokawa, H. Arimura, S. Sugino, A. Tachibana, M. Nakamura, N. Mise, S. Kamiyama, T. Morooka, T. Eimori, K. Shiraishi, K. Yamabe, H. Watanabe, K. Yamada, T. Aoyama, T. Nabatame, Y. Nara, Y. Ohji, ”Physical model of the PBTI and TDDDB of la incorporated HfSiON gate dielectrics with pre-existing and stress-induced defects”, Tech. Digest 2008 IEEE Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, Dec. 15-17, 2008.
 34. M. Sato, N. Umezawa, N. Mise, S. Kamiyama, M. Kadoshima, T. Morooka, T. Adachi, T. Chikyow, K. Yamabe, K. Shiraishi, S. Miyazaki, A. Uedono, K. Yamada, T. Aoyama, T. Eimori, Y. Nara, Y. Ohji, "Physical understanding of the reliability improvement of dual high-k CMOSFETs with the fifth element incorporation into HfSiON gate dielectrics", 2008 Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI, USA, June 15-17, 2008.
 35. Kadoshima, M.; Matsuki, T.; Mise, N.; Sato, M.; Hayashi, M.; Aminaka, T.; Kurosawa, E.; Kitajima, M.; Miyazaki, S.; Shiraishi, K.; Chikyow, T.; Yamada, K.; Aoyama, T.; Nara, Y.; Ohji, Y. “Improved FET characteristics by laminate design optimization of metal gates -Guidelines for optimizing metal gate stack structure-“, 2008 Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI, USA, June 15-17, 2008.
 36. Masakazu Muraguchi, Yukihiro Takada, Yoko Sakurai, Tetsuo Endoh, Shintaro Nomura, Mitsuhsa Ikeda, Katsunori Makihara, Seiichi Miyazaki, and Kenji Shiraishi "Theoretical investigation of quantum dot coupled to a two-dimensional electron system", 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop, Hapuna Beach, HI, December 7-12, 2008
 37. Shintaro Nomura, Yoko Sakurai, Yukihiro Takada, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Mitsuhsa Ikeda, Katsunori Makihara, Seiichi Miyazaki, and Kenji Shiraishi, "Capacitance measurements on quantum dots coupled to a two-dimensional electron system", 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop, Hapuna Beach, HI, December 7-12, 2008
 38. Yoko Sakurai, Shintaro Nomura, Yukihiro Takada, Kenji Shiraishi, Masakazu Muraguchi, Tetsuo Endoh, Mitsuhsa Ikeda, Katsunori Makihara, and Seiichi Miyazaki, "Temperature Dependence of

Electron Tunneling from Two Dimensional Electron Gas to Quantum Dots", The Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2009), Tsukuba, Japan, March 9-10, 2009.

39. Yeonghun Lee, Takahiro Nagata, Kuniyuki Kakushima, Kenji Shiraishi, Hiroshi Iwai, "A Study on Electronic Structure of Silicon Nanowires with Diverse Diameters and Orientations for High Performance FET", 2008 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ULSI DEVICES: SCIENCE AND TECHNOLOGY. Tokyo, Japan, November 5-7, 2008
40. Yukihiko Takada, Masakazu Muraguchi, Shintaro Nomura, Kenji Shiraishi, "Theoretical studies on the magnetic field effect of the two-dimensional tight-binding lattice coupled to a discrete level", The Sixth Conference on Physical Phenomena in High Magnetic Fields (PPHMF-VI), Tallin, Estonia, August 1-5, 2008
41. M. Muraguchi, T. Okunishi, K. Shiraishi and K. Takeda, "Theoretical Study on Time-dependent Phenomena of Photon-Assisted Tunneling through Charged Quantum Dot", International Conference on Quantum Simulators and Design (QSD) 2008, Tokyo, Japan, May 31-June 3, 2008
42. H. Watanabe, T. Hosoi, Y. Kita, T. Shimura, K. Shiraishi, Y. Nara, and K. Yamada, "Origins of interface dipoles at p-metal/Hf-based high-k gate stacks", International Conference on Quantum Simulators and Design (QSD) 2008, Tokyo, Japan, May 31-June 3, 2008
43. Katsumasa Kamiya, Mauro Boero, Masaru Tateno, Kenji Shiraishi and Atsushi Oshiyama, "POSSIBLE MECHANISM OF PROTON TRANSFER THROUGH PEPTIDE GROUPS IN THE H-PATHWAY OF THE BOVINE CYTOCHROME C OXIDASE", 15th European Bioenergetics Conference 2008, Dublin, Ireland, July 19-24, 2008.
44. <招待講演> K. Shiraishi, "Study of nanowire band structure for the analysis of its conduction", IEEE EDS Mini-colloquium for Nano CMOS and Nanowire, Yokohama, Feb. 21, 2009

国内会議

1. 岩田潤一, 「Ral-Space Density-Functional Theory code for large-scale electronic structure calculations」, 計算量子科学によるナノアーキテクチャの構築, 東京大学, 2008年6月24日
2. 岩田潤一, 白石賢二, 押山淳, 「数 nm サイズ Si 量子ドットの大規模第一原理計算」, 日本物理学会 2008 秋季大会 2008年9月20日~23日、盛岡
3. 岩田潤一, 「実空間第一原理ナノ物質シミュレータ」, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 学士会館, 東京, 2009年3月11日
4. 岩田潤一, 「超並列機向け実空間DF Tコード (RSDFT) -現状と今後-」, TDDFT : 光応答計算の基礎、応用と展開, キャンパスイノベーションセンター, 東京, 2009年3月18日
5. 辻美和子, 押山淳, 佐藤三久, 岩田潤一, 「RSDFT コードの OpenMP/MPI ハイブリッド並列化と性能評価」, 次世代スーパーコンピュータ開発プロジェクト・次世代ナノ統合シミュレ

- ーションソフトウェア第3回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター, 2009年3月4日~5日
6. 二村保徳, 櫻井鉄也, 多田野寛人, 岩田潤一, 「密度汎関数法で考慮する電子状態数の収束性への影響評価」, 日本応用数理学会, 京都大学理学部6号館, 2008年3月7日~8日
 7. 高木祥光, 大野隆央, 岡田 晋 ``カーボンナノチューブを擦ることによるカーボンナノチューブの回転運動" フラーレン・ナノチューブ学会, 第35回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(東京, 東京工業大学), 2008年8月27日--29日
 8. S.-K Jeong, 岡崎俊也, 岸直希, 中西毅, 岡田 晋, 坂東俊治, 飯島澄男, ``単層カーボンナノチューブのブリージングモードに対するフラーレン内包の影響"フラーレン・ナノチューブ学会, 第35回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(東京, 東京工業大学), 2008年8月27日--29日
 9. 河合孝純, 岡田 晋, 宮本良之, 日浦英文, ``グラフェンシートと引き裂きの MD シミュレーション: 端の原子構造"フラーレン・ナノチューブ学会, 第35回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(東京, 東京工業大学), 2008年8月27日--29日
 10. 岡田 晋, ``SiO₂ 上に吸着された半導体ナノチューブの電子構造とエネルギー論"フラーレン・ナノチューブ学会, 第35回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(東京, 東京工業大学), 2008年8月27日--29日
 11. 岡崎俊也, 大窪清吾, 岸直希, 中西毅, 岡田 晋, 飯島澄男, ``フラーレン内包による単層カーボンナノチューブの直径に依存したバンドギャップ変化"フラーレン・ナノチューブ学会, 第35回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(東京, 東京工業大学), 2008年8月27日--29日
 12. 岡田晋 ``SiO₂ 上に吸着された半導体ナノチューブの電子構造とエネルギー論" 日本物理学会 2008年秋季大会 (盛岡市, 岩手大学) 2008年9月20--23日
 13. 岡田晋, 柳和宏, 片浦弘道 ``β カロテン内包ナノチューブの電子構造"日本物理学会 2008年秋季大会 (盛岡市, 岩手大学) 2008年9月20--23日
 14. 河合孝純, 岡田晋, 宮本良之, 日浦英文 ``グラフェン引き裂きにおける原子スケール端構造の安定性: 分子動力学シミュレーション"日本物理学会 2008年秋季大会 (盛岡市, 岩手大学) 2008年9月20--23日
 15. 大谷実, 岡田晋 ``電圧印加による2層グラフェンの再金属化"日本物理学会 2008年秋季大会 (盛岡市, 岩手大学) 2008年9月20--23日
 16. <招待講演> 岡田 晋 ``カーボン系構造変化の第一原理シミュレーション"第4回励起ナノプロセス研究会(応用物理学会), (和歌山市, 和歌山大学サテライト), 2008年11月21日, 22日
 17. 高木祥光, 岡田晋 ``紫外領域における単層カーボンナノチューブの光学的性質"フラーレン・ナノチューブ学会, 第36回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(名古屋, 名城大学), 2009年3月2日--4日
 18. 大谷実, 岡田晋 ``非開口ナノチューブにおける自発分極"フラーレン・ナノチューブ学会, 第

- 36回フラレーン・ナノチューブ総合シンポジウム(名古屋,名城大学),2009年3月2日--4日
19. 岡田晋`炭素ナノワイヤのエネルギー論と電子構造"フラレーン・ナノチューブ学会, 第 36 回フラレーン・ナノチューブ総合シンポジウム(名古屋,名城大学),2009年3月2日--4日
 20. 田中倫子、河合孝純、岡田晋`半金属分子ナノワイヤ: 酸素分子内包カーボンナノチューブ" フラレーン・ナノチューブ学会, 第 36 回フラレーン・ナノチューブ総合シンポジウム(名古屋,名城大学),2009年3月2日--4日
 21. 斎藤峯雄, 澤田啓介, 石井史之, 岡田晋, 河合孝純`グラフェンナノリボンのキャリアドーピングによる磁性制御"日本物理学会第 64 回年次大会 (東京,立教学院),2009年3月27日--30日
 22. 高木祥光, 岡田晋 `紫外線領域に於ける単層カーボンナノチューブのバンド間遷移"日本物理学会第 64 回年次大会 (東京,立教学院),2009年3月27日--30日
 23. 岡田晋`炭素ナノワイヤのエネルギー論"日本物理学会第 64 回年次大会 (東京,立教学院),2009年3月27日--30日
 24. <招待講演>石田 猛, 手賀直樹, 毛利友紀, 三木浩史, 峰利之, 久米均, 鳥居和功, 村口正和, 高田幸宏, 白石賢二, 山田廉一、"可変ストレス誘起リーク電流(V-SILC)の機構解析"、第 55 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「ユビキタス世界を支える LSI デバイスの信頼性物理—信頼性を損なうのはだれだ? なぜか?—」(中部大学 2008 年 9 月)
 25. <招待講演>村口正和, 白石賢二、"信頼性を支配するトンネル現象に対する新しい理解"、第 55 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「ユビキタス世界を支える LSI デバイスの信頼性物理—信頼性を損なうのはだれだ? なぜか?—」(中部大学 2008 年 9 月)
 26. <招待講演>白石賢二、"量子効果が生み出すナノ材料の新物性とナノ界面科学"、第 55 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「シリコンナノエレクトロニクス新展開— 新材料導入によるシリコンプラットフォームの超機能化 —」(中部大学 2008 年 9 月)
 27. <招待講演>白石賢二、"埋もれた界面に関する理論および計算科学研究の最前線"、第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「X線・中性子による埋もれた界面研究の最前線」、(筑波大学 2009 年 3 月)
 28. <招待講演>岩井洋, 名取研二, 白石賢二, 山田啓作, 大毛利健治, 筒井一生, 角嶋邦之, パールハット アヘメト、"シリコンナノワイヤ FET 研究の現状とロードマップ作成の考え方"、第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「ナノ CMOS への新展開 - 高機能化・高性能化を図る新材料・新構造技術」、(筑波大学 2009 年 3 月)
 29. <招待講演>野村晋太郎, 櫻井蓉子, 高田幸宏, 白石賢二, 村口正和, 遠藤哲郎, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一、 "電子励起状態を介した量子ドットへのトンネル現象の変調"、第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「Si系およびC系ナノ構造と励起プロセス」、(筑波大学 2009 年 3 月)
 30. <招待講演>白石賢二、"ポストスケーリング時代にデバイス・物性物理は何をなすべきか?"、第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「ポストスケーリング時代をデバイス・物

- 性物理から斬る -これが半導体デバイスの未来像だ-、(筑波大学 2009 年 3 月)
31. <招待講演>村口正和, 遠藤哲郎, 牧原克典, 池田弥央, 宮崎誠一, 櫻井蓉子, 高田幸宏, 野村晋太郎, 白石賢二, ”少数電子で動く未来デバイスの姿 量子電子ダイナミクスからのメッセージ” 第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム「ポストスケーリング時代をデバイス・物性物理から斬る -これが半導体デバイスの未来像だ-、(筑波大学 2009 年 3 月)
 32. T. Tanaka, K. Kamiya, Y. Shigeta and K. Shiraishi, “Theoretical proposal of a new pKa concept applicable in protein environment by the first principles calculations”, 日本生物物理学会第 46 回年会、2008 年 12 月 3 日-5 日、福岡
 33. 神谷克政, 重田育照, マウロボエロ, 白石賢二, 押山淳, 「蛋白質の立体構造・電子状態・生物機能の間の相関関係の研究」、日本物理学会 第 64 回年次大会、東京、2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日
 34. 高田幸宏, 櫻井蓉子, 村口正和, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 遠藤哲郎, 野村晋太郎, 白石賢二, 「電子ガス-量子ドット結合系における電子構造 II」、日本物理学会 第 64 回年次大会、東京、2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日
 35. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 高田幸宏, 白石賢二, 村口正和, 遠藤哲郎, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 「電子ガス-量子ドット結合系における C-V 特性および I-V 特性の Sweep Rate 依存性」、日本物理学会 第 64 回年次大会、東京、2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日
 36. 村口正和, 遠藤哲郎, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 高田幸宏, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 斎藤慎一, 「電子ガス-量子ドット結合系における電子ダイナミクス II」、日本物理学会 第 64 回年次大会、東京、2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日
 37. 高田幸宏, 村口正和, 野村晋太郎, 白石賢二, 「電子ガス・量子ドット結合系における電子状態」、日本物理学会 2008 年秋季大会、盛岡、岩手、2008 年 9 月 20 日—23 日
 38. 村口正和, 高田幸宏, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 斎藤慎一, 白石賢二, 「電子ガス-量子ドット結合系における電子ダイナミクス」、日本物理学会 2008 年秋季大会、盛岡、岩手、2008 年 9 月 20 日—23 日
 39. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 「電子ガス-量子ドット結合系における C-V 特性」、日本物理学会 2008 年秋季大会、盛岡、岩手、2008 年 9 月 20 日—23 日
 40. 高田幸宏, 村口正和, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 白石賢二, 「シリコン量子ドットフローティングゲート型メモリの理論的考察」、2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会、春日井、愛知、2008 年 9 月 2 日—5 日。
 41. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一, 「量子ドットフローティングメモリの低温における C-V 特性」、2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会、春日井、愛知、2008 年 9 月 2 日—5 日。
 42. 李 映勳, 永田貴弘, 白石賢二, 角嶋邦之, 岩井 洋, 「第一原理計算によるシリコンナノワイヤの電子構造解析」、2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会、春日井、愛知、2008

年9月2日—5日。

43. 山口慶太, 大竹 朗, 小林賢司, 白石賢二、「MONOS型メモリにおけるSiN層のN空孔型欠陥の原子構造と電子構造」、2009年春季第56回応用物理学関連講演会、つくば、茨城、2009年3月30日—4月2日
44. 大竹 朗, 山口慶太, 小林賢司, 白石賢二、「MONOS型メモリにおけるSiN層へのO混入の効果の理論的検討」、2009年春季第56回応用物理学関連講演会、つくば、茨城、2009年3月30日—4月2日
45. 李 映勲, 永田貴弘, 角嶋邦之, 白石賢二, 名取研二, 岩井 洋、「引っ張り歪みSiナノワイヤの電子構造とバリスティック伝導」、2009年春季第56回応用物理学関連講演会、つくば、茨城、2009年3月30日—4月2日
46. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 村口正和, 遠藤哲郎, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一、「Si量子ドットフローティングゲートMOSキャパシタにおける過渡電流特性」、2009年春季第56回応用物理学関連講演会、つくば、茨城、2009年3月30日—4月2日
47. <招待講演> 白石賢二、「LSI開発の効率化—計算科学的手法による次世代デバイスの高効率製造—」、08秋季半導体プロセスシンポジウム、「32/22nm以降を見据えたプロセス技術—要素技術開発の現状と今後の課題を徹底検証—」、東京、2008年10月3日。
48. 白石賢二, 小林賢司, 石田 猛, 奥山 裕, 山田廉一、「MONOS型メモリの電荷蓄積機構の理論的研究」、応用物理学会、シリコンテクノロジー分科会、第101回研究集会「ゲートスタック構造の新展開：高移動度チャネル技術を中心に」、東京、2008年6月9日-10日
49. 幸田みゆき, 梅澤直人, 角嶋邦之, Parhat Ahmet, 白石賢二, 知京豊祐, 山田啓作, 服部健雄, 岩井洋、「価電子揺動Ce酸化物を利用したHigh-k膜中の固定電荷の抑制」、ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—、第14回特別研究会、三島、静岡、2009年1月23日-24日
50. 大竹朗, 山口慶太, 小林賢司, 白石賢二、「MONOS型メモリの電荷蓄積機構の第一原理計算による考察」、ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—、第14回特別研究会、三島、静岡、2009年1月23日-24日
51. 大毛利健治, 松木武雄, 石川大, 諸岡哲, 網中敏夫, 杉田義博, 知京豊裕, 白石賢二, 奈良安雄, 山田啓作、「金属/high-k絶縁膜構造トランジスタにおいて金属結晶が閾値電圧ばらつきに及ぼす影響とその抑制」、ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—、第14回特別研究会、三島、静岡、2009年1月23日-24日
52. 石田猛, 手賀直樹, 毛利友紀, 三木浩史, 峰利之, 久米均, 鳥居和功, 村口正和, 高田幸宏, 白石賢二, 山田廉一、「可変ストレス誘起リーク電流(V-SILC)の機構解析」、ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—、第14回特別研究会、三島、静岡、2009年1月23日-24日
53. <招待講演> 寒川義裕, 秋山 亨, 伊藤智徳, 白石賢二, 柿本浩一、「立法晶GaNエピ成長における成長形の制御」、第38回結晶成長国内会議、仙台、2008年11月4日-6日

54. <招待講演> 白石賢二、「チトクローム酸化酵素プロトン輸送の理論計算」、菅野シンポジウム、「配位子場の科学に基づく融合科学の創成のために」、つくば、2009年3月7日
55. Yoshihiro Kangawa, Toru Akiyama, Tomonori Ito, Kenji Shiraishi, Koichi Kakimoto, "Theoretical study of growth condition of cubic GaN", 第27回電子材料シンポジウム、修善寺、静岡、2008年7月9日～11日
56. <招待講演> 渡部平司、喜多祐起、細井卓治、志村考功、白石賢二、奈良安雄、山田啓作、「金属電極とHf系高誘電率絶縁膜界面の実効仕事関数変調機構」、第72回半導体・集積回路技術シンポジウム、小金井、東京、2008年7月10日-11日

<学位論文（修士）>

- 1) 田中朝紀 「たんぱく質環境下でのプロトン親和性の理論的考察」
- 2) 高田幸宏 「2次元電子ガスー量子ドット結合系の電子構造」

<学位論文（博士）>

- 1) 高井健太郎 「Theoretical Study on the Electronic Structure of the Vacancies in Compressively Strained Ge」
- 2) 栗田貴宏 「Theoretical Investigation into Atomic and Electronic Structures of Sapphire Surfaces」

VII-3 計算生命グループ

准教授 舘野 賢

准教授 Mauro Boero (～H20 年 11 月)

大学院生 (6 名)

当グループは、「生体機能情報分子システムによる重要な生体反応の分子・電子ダイナミクス」の解明」を目的として、研究を推進している。そのために、物理学における基本原理に基づき、生体機能分子システムの電子構造・分子構造を正確に記述し、生物学的に重要な反応機構を解析する。こうした研究を高精度に実現するためには、解析対象を省略することなく、高度に複雑かつ巨大な生体分子システムをリアルなまま、「まるごと」理論的に解析することが最も重要である。

そのためには、量子力学計算などを表面的に適用するのではなく、構造生物学理論や情報科学理論の応用 (Structural Bioinformatics) もまた不可欠となる。その際には、大規模計算 (計算科学) が必要となる場面も多く、筑波大学・計算科学研究センタなどと密接に連携し、超高速・超並列コンピュータを駆使して、それらの課題に取り組む。

こうした様々な解析技術を集中的に駆使することによって、重要な生物機能を担う生体機能分子システムのダイナミクスを解明し、以って生物機能の実体を原理的に明らかにすることが、当研究グループの基本方針である。それらによって、ひいては複雑な生体システムに内在する物理的法則性を解明し、生命科学におけるゲノムワイドな現実の諸課題へと、広くそれらの知見を応用することを目指して研究を推進している。

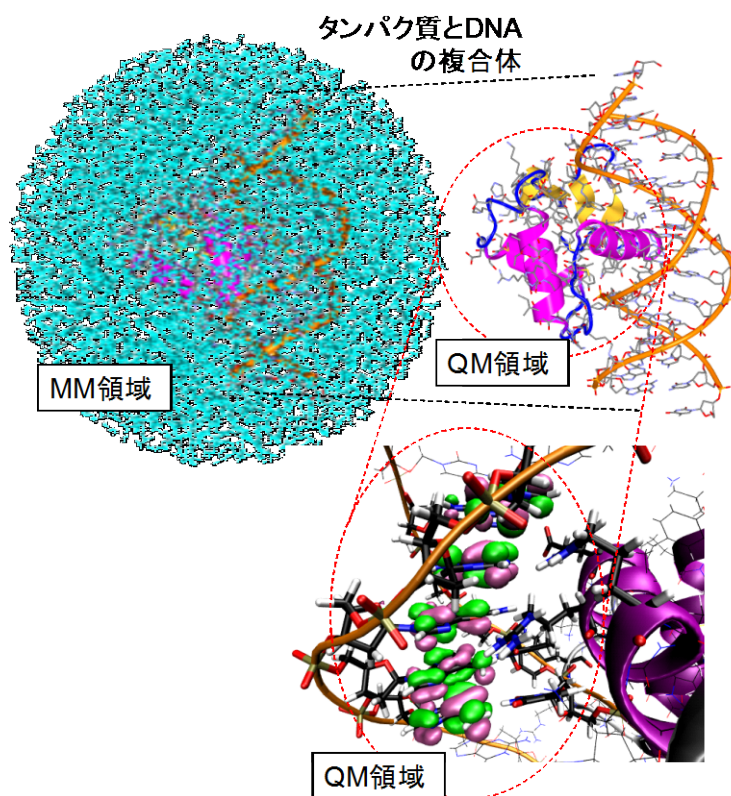
特に本年度は、超並列コンピュータに適した高精度な計算システムの開発も新たに推進した。これは、量子理論 (全電子 QM 計算) と古典理論 (MM 計算) を同時に用いることで、高精度な計算を高効率に行うための QM/MM ハイブリッド計算システムであり、そのために QM/MM インターフェース・プログラムを新たに開発して、大規模かつ高精度な QM/MM ハイブリッド分子動力学 (MD) 計算システムを実現した。さらにこれを用いて、タンパク質酵素・RNA 酵素 (リボザイム) や、シトクローム酸化酵素・アズリンなどの遷移金属結合タンパク質 (電子移動・プロトン移動などを担う) 等に応用し、まったく新しい反応機構を見出すなど、当初の予想をはるかに超える研究成果を創出することに成功した。

これらの成果は、量子シミュレーションを単に形式的に適用するだけでは到底得られないものである。バイオインフォマティクス解析技術の開発、構造生物学(理論)の応用、さらに計算物理化学などに渡る、多くの関連領域を生体高分子の機能と構造の構築原理の解明のために、統合・融合することによって初めて成し遂げられた成果である。今後の理論生命科学自体の方向性を明示するものでもあり、我々はこれを「量子構造生物学」の創出として、広く提唱しているところである。またその結果として、現在、多くの重要な共同研究へと発展しつつある。

【1】高精度かつ高効率な QM/MM ハイブリッド分子動力学計算システムの開発 [文献 3, 10]

タンパク質などの生体機能高分子の場合には、そのサイズが巨大であることから、その化学反応（酵素反応や電子・プロトン移動など）を正確に解析するためには大規模な計算が必要となる。そのため、生体分子をふたつの領域に分けて計算する方法（下図）が、現在、最先端の手法として脚光を浴びている。すなわち、

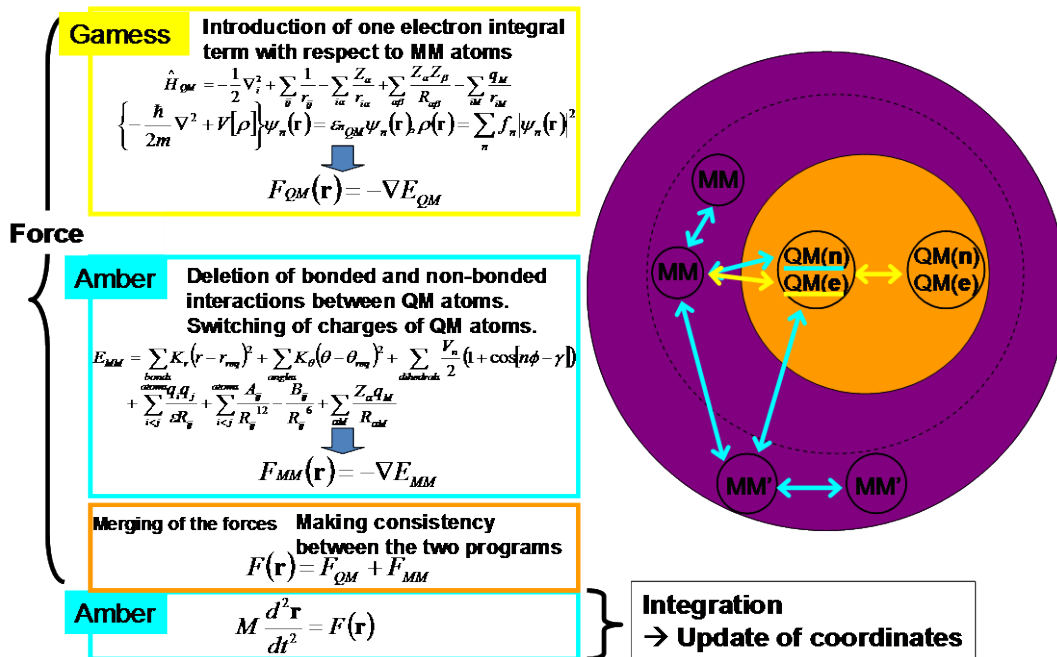
- 1) 電子を含めて化学反応を正確に取り扱う量子力学（QM）計算：
非常に大きな計算のため、小さな領域をカバー
- 2) 化学反応に直接には関係しない領域に適用する古典力学（MM）計算：
比較的小さな計算のため広い領域をカバー



とに分けることで、大きな生体分子も効率よく計算することを目的とした方法である。これは一般に、QM/MM 計算と呼ばれている。本課題においては、従来よりも高精度で、かつさらに効率よく計算することの可能な QM/MM ハイブリッド・インターフェースプログラムを新たに開発し、これを筑波大学の超並列大型コンピュータ PACS-CS などで稼働させることにより、新しい QM/MM ハイブリッド分子動力学計算システムを構築した。さらに、このシステムを用いて、金属（銅イオン）と結合したタンパク質などの機能のしくみを調べた結果、従来は正確な立体構造さえ得ることのできなかった生体分子についても、非常に高い精度の計算結果が得られることを実証した。

以上の開発・応用は、21年1月にプレスリリースを実施し、全国紙などにおいて、その成果が紹介された。

Gamess ... QM calculation (all electron based HF/DFT hybrid method)
Amber ... MM & MD calculation

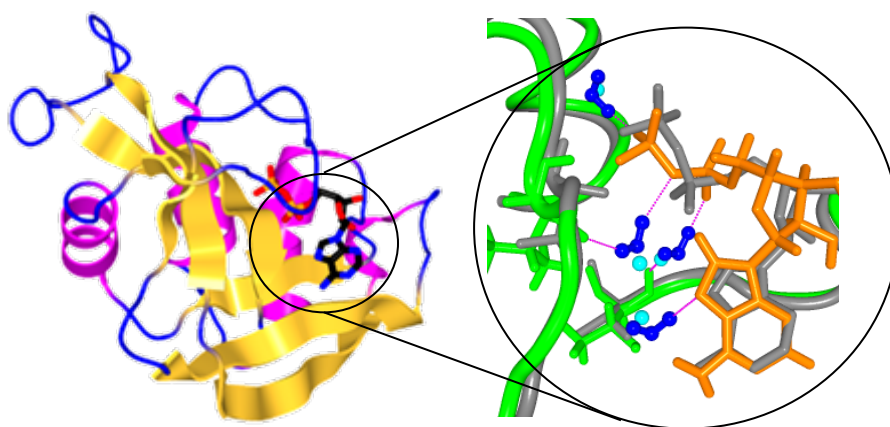


QM/MM ハイブリッド・インターフェースプログラムの役割

【2】ダイナミカルな分子ドッキング計算技術の開発:FSDD 法の開発 [文献 6]

量子シミュレーションを実行するためには、高精度の計算モデルが不可欠である。X線結晶構造解析などによって実験的に得られた生体高分子の立体構造には、反応に必須の分子種に関する情報が欠如している場合や、技術的な制限により立体構造に誤謬を含む場合さえもある。例えば、水分子自体が反応に寄与する系では、溶媒水分子の位置が実験的に観測できない場合には、その配置情報を理論的に予測することが必須である。また、触媒反応の対象となる分子（基質とよばれる）を酵素と混ぜた場合には、実際に反応が生じるわけであるから、酵素・基質複合体の結晶を実験によって得ることはできない。仮に基質を含む結晶を何らかの方法によって得ることができたとしても（酵素単体で結晶を作成した後に、基質を結晶にしみこませるなど）、結晶内部での酵素反応によって実験データの質が深刻に低下する場合も多い。したがって、反応の対象となる基質と酵素との複合体の立体構造を得ることは、原理的に極めて困難である（そこで本来の基質の代わりに、反応は起こさずに結合のみ生じる阻害剤を使用して、結晶構造解析を行う場合が多い）。

このように生体高分子の反応機構を解明するためには、実験上の様々な技術的限界が、現在もなお数多く存在するのが実情である。そこで本課題においては、生命科学的に重要な系でありながら、こうした実験的な技術上の困難を回避することのできない系に対しても、その限界を理論的に補い、生体分子の立体構造を計算科学的に高精度に再構築するための理論手法の開発を試みた。そのために、基質と酵素との分子間ドッキング・アルゴリズムを新たに開発し（下図）、これを用いて研究の対象となる複合体の計算モデルを構築した。

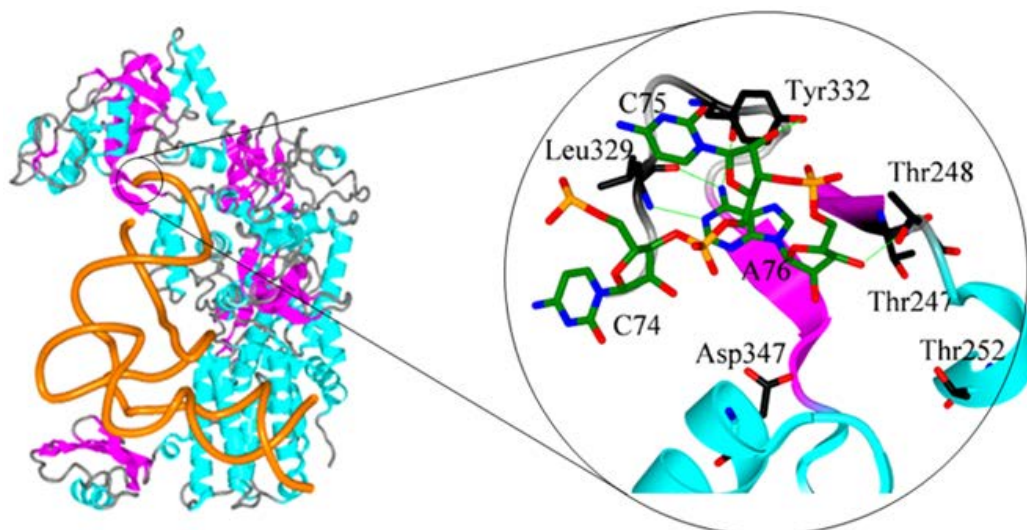


従来の分子ドッキング・アルゴリズムは溶媒水分子を含めずに、しかも酵素の立体構造を固定して計算するのが通常であったが、我々はそれらの制約をすべて解き放ち、溶媒中のタンパク質に対して、そのダイナミカルな立体構造変化を導入した上で、分子ドッキングを初めて実現した。これを **FSDD (Fully Solvated Dynamical Docking)** 法と名づけた。こうした計算手法は、医薬分子設計の領域ではしのぎを削って開発が行われている課題であり、今後はそうした分野のみならず、本研究における量子デザインのステップにおいても、広く応用が期待される、重要な解析手法である。

【3】すべての生物において、遺伝情報の変換を担う酵素反応の動的機構 [文献 8]

以上のようにして構築した精密な計算モデルは、ロイシル tRNA 合成酵素 (LeuRS ; 次ページの図を参照。これはアミノアシル tRNA 合成酵素 aaRS のメンバ) と、その基質として作用する tRNA^{Leu}, およびその tRNA^{Leu} に結合されているアミノ酸とからなる。ここで LeuRS (分子量~120,000) は、tRNA (分子量~15,000) と複合体を形成し、本来はその 3'-末端に特定のアミノ酸分子を正確に結合させる生物機能を有する酵素である。しかし、互いによく似たアミノ酸分子を認識する際には、その識別が誤る場合もあり、LeuRS 自身がそれを校正・編集する (= 誤ったアミノ酸分子を加水分解する) 機能をも有している。これは校正反応 (エディティング反応 ; **Editing Reaction**) とよばれ、あらゆる生物にお

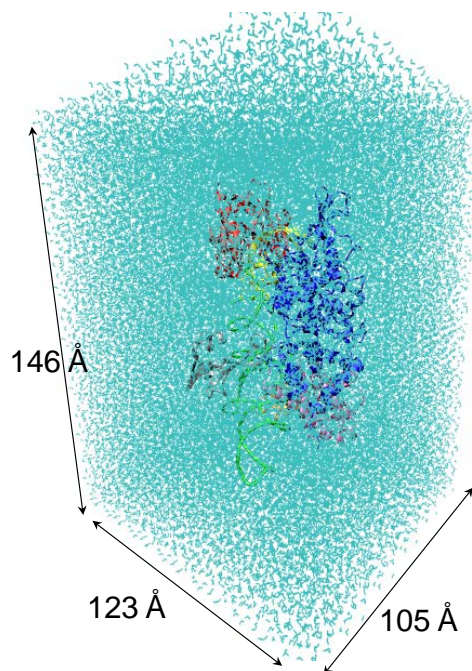
いて遺伝情報の発現-----すなわち、すべてのタンパク質の生合成-----に、不可欠な反応である。



そこで、LeuRS による校正反応（エディティング反応）の機構を解明するために、前記の計算モデル（原子数~165,000 個）に対して QM/MM ハイブリッド計算（まずは静的な計算）を適用し解析した。その結果、攻撃を受けるカルボニル基（C=O）の炭素原子の近傍（2.4 Å）にまで、接近し得る水分子を同定することに成功した。この水分子は、これまで実験的には観測できていないものである。

この点は、LeuRS によるエディティング反応の開始が、水分子による攻撃によって開始されると考えられていた従来の研究結果と一致している。

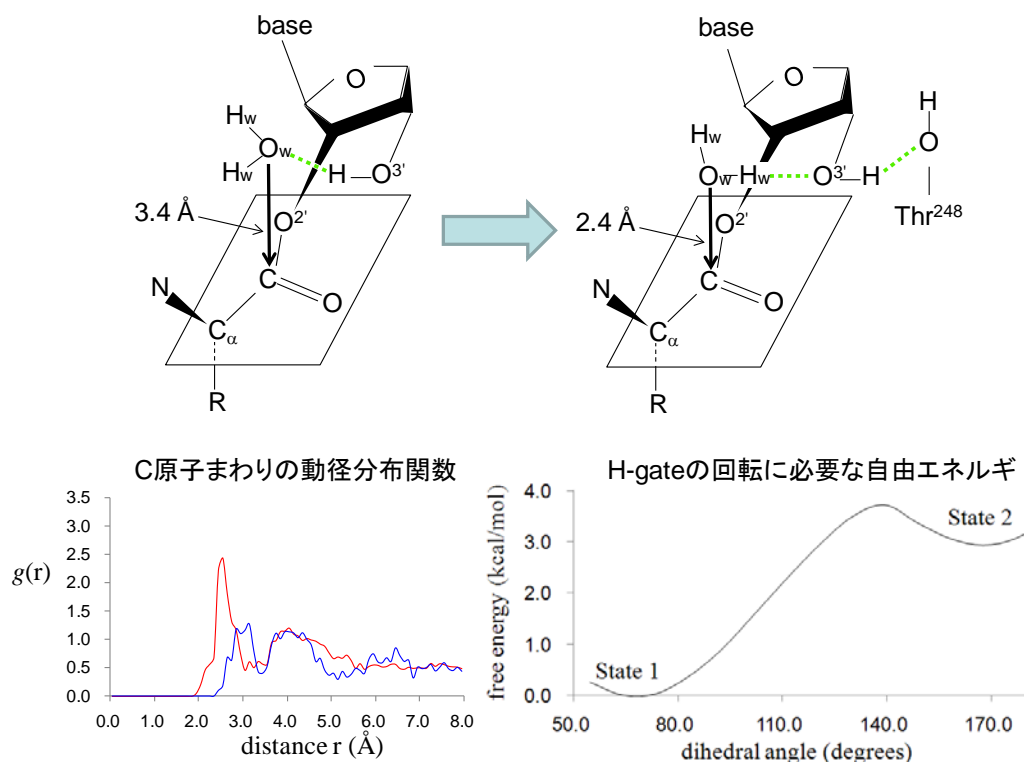
実際、結晶構造解析においても、反応部位から 4 Å にまで接近した水分子が、阻害剤との複合体においてのみ（tRNA^{Leu}は含まれない結晶構造）、これまでも見出されていた。ところが、この阻害剤との複合体構造においては、求核性の水分子が存在する位置は、攻撃されるカルボニル基から遠いばかりではなく、 π 電子を攻撃し得る向きとは正反対に位置しており、そのまま



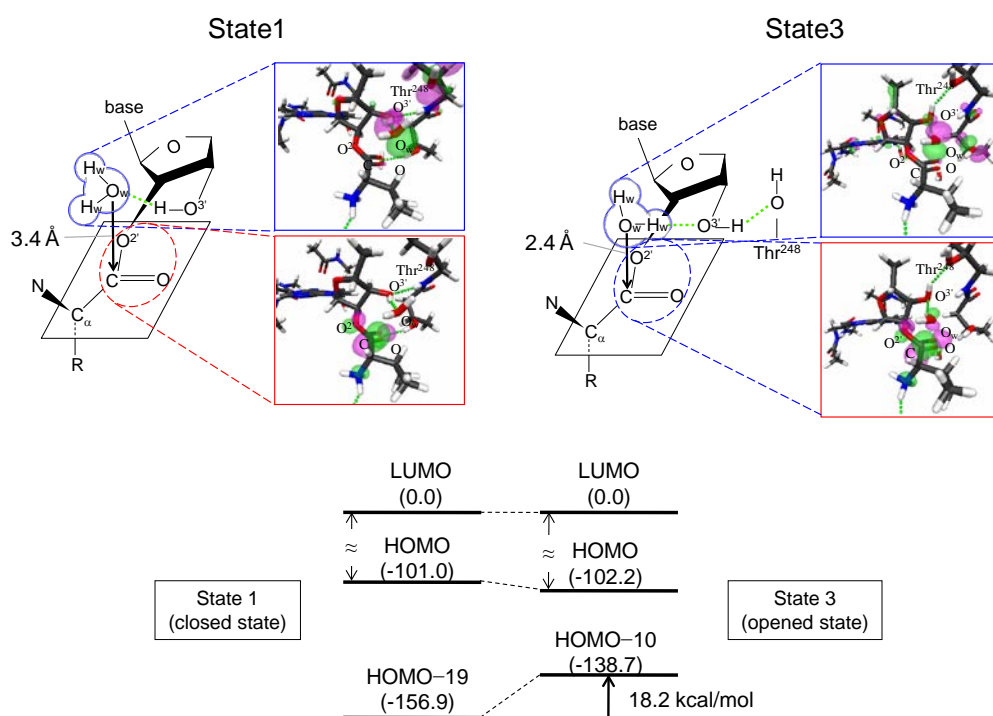
では水分子の攻撃は不可能な位置であった。そのため、想定されている反応機構に対して異をとる研究者もおり、意見が分かれる原因となっていた。

こうした状況にあった LeuRS の反応機構の研究において、本研究により初めて、求核剤として基質を攻撃し得る溶媒水分子の存在と、その配置とが明らかになった（下図参照）。計算結果によると、反応の前には、この求核性の水分子は基質の一部と水素結合を形成することにより、その位置が安定化されている。ここで、水分子が水素結合しているのは、基質である tRNA^{Leu} の 3'-HO 原子である。ところが、この 3'-HO 原子が動いて、この水分子との水素結合が切断されると、水分子がカルボニル基に接近することが可能となる。その場合、水分子には著しい電子状態の変化が誘起されることが明らかになった（後述）。そこで本研究では、tRNA^{Leu} におけるこの 3'-HO 原子を H-gate と名付け、LeuRS-tRNA^{Leu} を活性化するためのスイッチ機能をもつ装置として、同定することに成功した（以下の図を参照）。このように、水素原子 1 個が生体高分子の反応を高度に制御している事実を見出したのは、本研究が最初である。これは、極めて精巧な生体システムの機能制御機構の発見であると考えられる。

ここで、基質分子の LUMO は、一貫してカルボニル基に存在することから、水分子の孤立電子対がこの LUMO を攻撃することを強く示唆している（次ページの図）。その際に、水分子の p 電子の軌道は、最初 HOMO-19 のエネルギーレベルにある一方で、求核剤であ



水分子の接近に伴う電子状態の変化



る水分子の接近によってそのエネルギーレベルが上昇し、HOMO に急速に近づくことも、同時に明らかになった。これは、この水分子が求核剤として作用するための準備と考えられ、いわば酵素反応の準備段階、すなわち電子状態が活性化される一過程と考えることができる。

【4】TARA プロジェクト [文献 1, 4, 5, 7, 9 など]

「電子ダイナミクスに基づく生体物質の構造と反応機構の解析」(研究代表者：舘野 賢)

当グループを中心としたメンバにより、上記の学内プロジェクトを推進している(最終年度)。本研究課題は、生体高分子のナノスケールの構造と機能発現のメカニズムを、量子理論に基づく計算科学的手法により解明することを目的とし、推進した。そのために、既存の解析システム(CPMD 計算システム)を駆使するだけでなく、超並列コンピュータに適した、さらに高精度な計算システムの開発も新たに行った(前述の計算解析システムの開発)。この計算システムを用いて、タンパク質酵素・RNA 酵素や、シトクローム酸化酵素・アズリンなどの遷移金属結合タンパク質(これらは電子移動・プロトン移動などを担う)等に適用し(前述)、まったく新しい反応機構を見出すなど、当初の予想をはるかに

超える研究成果を、3年の短期間で創出することに成功した（投稿中の分を含む）。

一般に、極めて複雑な立体構造を有する生体機能分子においては、実験データを鵜呑みにしたシミュレーションは、根本的な誤りを導く原因となる。これは、現実にこれまでの実例が示す事実である。実験によって得られたタンパク質構造に内在する誤りを、むしろ理論的に正して、それによって得られた精密な原子座標を計算に用いることにより QM/MM 分子動力学シミュレーションを実行する、この一連のワークフローこそが、次世代の生物物理学において極めて重要なストラテジの第一歩である。量子シミュレーションなどの計算技術の枠を超え、他領域に渡る複数の解析技術をひとつの研究対象に対して統合的に集中して適用することが、次代の新しい生物物理学を開拓する試金石となる。本課題においては、まさにこのストラテジを実際の生命科学の重要問題に対して適用し、その解決を実現することに成功した点に、大きな意義があると考えられる。

以上が、本研究課題の基本コンセプトであった。これに基づいて得られた前述の成果は、これまでにない新規の生体反応機構の発見などに結びつき、しかもその一般性がさらに明らかになりつつある。これらを基盤にしてさらに、**Systems Biology** や **Structural Informatics** などの新しい研究領域との本質的な融合など、新しい計算技術を一層飛躍的に発展させることが、次の研究課題となる。これは、次世代のまったく新しい生物物理学分野を創出するものと期待される。その基盤となる技術開発およびニューコンセプトの創出を目指した研究を、今後とも推進する考えである。

【5】研究業績

(1) 研究論文

- 1) Yamasaki, K., Kigawa, T., Inoue, M., Watanabe, S., Tateno, M., et al., Structures and evolutionary origins of plant-specific transcription factor DNA binding domains, *Plant. Physiol. Biochem.* **46** (2008), 394-401.
- 2) Scipioni, R., Boero, M., A First Principles Investigation of Water Dipole Moment in a Defective Continuous Hydrogen Bond Network, *J. Chem. Phys.*, **130** (2009), 024502.
- 3) Hagiwara, Y., and Tateno, M., QM/MM hybrid calculation of biological macromolecules using new interface program connecting QM and MM engines, *J. Phys. Cond. Mat.*, **21** (2009), 064234.
- 4) Kang, J., Ohta, T., Hagiwara, Y., Nishikawa, K., Yamamoto, T., Nagao, H., and Tateno, M., Electronic and geometric structures of the blue copper site of azurin investigated by QM/MM hybrid calculations, *J. Phys. Cond. Mat.*, **21** (2009), 064235.

- 5) Tateno, M. and Hagiwara, Y., Evaluation of stabilization energies in π - π and cation- π interactions involved in biological macromolecules by ab initio calculations, *J. Phys. Cond. Mat.*, **21** (2009), 064243.
- 6) Hagiwara, Y., Nureki, O., and Tateno, M., Structural modelling of the complex of leucyl-tRNA synthetase and mis-aminoacylated tRNA^{Leu}: *FEBS Letters*, **583** (2009) 825–830.
- 7) Hagiwara, Y. and Tateno, M., A novel computational scheme for accurate and efficient evaluation of π - π and π - σ stacking: *J. Phys.: Cond. Mat.*, **21** (2009), 064243.
- 8) Hagiwara, Y., Nureki, O., and Tateno, M., Identification of the nucleophilic factors and the productive complex for the editing reaction by leucyl-tRNA synthetase, *FEBS Letters*, in press. **(Cover)**
- 9) Boero, M., Kang, J., Tokumoto, S., and Tateno, M., A First-Principle Exploration of Heme a and Heme a₃ of the Bovine Cytochrome c Oxidase in Reduced and Oxidized Charge States, *J. Comp. Theor. Nanosci.*, in press.
- 10) Ohta, T., Hagiwara, Y., Kang, J., Nishikawa, K., Yamamoto, Y., Nagao, N., and Tateno, M., Evaluation of Electronic and Geometrical Properties of the Blue Copper Site in Fully Solvated Azurin by QM/MM Hybrid Calculations Using a New Interface Program Connecting QM and MM Engine, *J. Comp. Theor. Nanosci.*, in press. **(Cover Image)**
- 11) 舘野 賢, ボエロ マウロ : 第一原理計算が明らかにする生体反応の精巧な仕組み, 生物物理 (日本生物物理学会) , **48**, 216-220 (2008).

(2) 学会発表 (主たるもの)

- 1) Takehiro Ohta, JiYoung Kang, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Computational study of metal binding sites of biological macromolecules by using QM/MM calculations. International Conference on Quantum Simulators and Design 2008., Tokyo, Japan (2008).
- 2) Masaru Tateno, Osamu Nureki, and Yohsuke Hagiwara. Computational investigations of mechanisms of enzymatic reaction by using QM/MM molecular

dynamics simulations. International Conference on Quantum Simulators and Design 2008. Tokyo, Japan (2008).

3) Yohsuke Hagiwara and Masaru Tateno. Development of QM/MM molecular dynamics scheme enabling to accurately and effectively evaluate van der Waals interactions. International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, Japan (2008).

4) Kang Jiyoung, ボエロ マウロ, 舘野 賢, シトクロム c 酸化酵素におけるヘムの立体構造に依存した非対称な分極と電子構造の理論的解析, 特定領域研究「生体超分子構造」第4回ワークショップ, 淡路, 2008年6月.

5) 太田雄大, 萩原陽介, Kang JiYoung, 舘野 賢. QM/MM 計算による CuA サイトの電子構造および立体構造の理論的解析, 科学研究費補助金特定領域研究「生体超分子の構造形成と機能制御の原子機構」第4回ワークショップ, 淡路, 2008年6月.

6) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Modeling of complex of LeuRS and mis-aminoacylated tRNA^{Leu} for which 3'-terminal is bound to the active site of editing. International conference on aminoacyl-tRNA synthetases (aaRS's), From basic mechanisms to systems biology (aaRS2008), Annecy, France (2008).

7) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Computational investigations of mechanisms of enzymatic reaction by using QM/MM molecular dynamics simulations. World association of theoretical and computational chemists., Sydney, Australia (2008)

8) Takehiro Ohta, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Electronic state of blue Cu protein revealed by using QM/MM calculations, World association of theoretical and computational chemists. Sydney, Australia (2008).

9) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Masaru Tateno, and Takahisa Ohno. Structural modelling, docking, and QM/MM study of ligand-binding upon human AhR. World association of theoretical and computational chemists. Sydney, Australia (2008).

10) Tatsunori Nishimura, Thomas Maiwald, Jens Timmer and Masaru Tateno. Computer simulation and theoretical formulation of stimulus/response relationships of

intracellular signaling network cascades. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

11) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Masaru Tateno, and Takahisa Ohno. Structural modelling, docking, and QM/MM study of ligand-binding upon human AhR. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

12) JiYoung Kang, Takehiro Ohta, Yohsuke Hagiwara, Keigo Nishikawa, Tetsunori Yamamoto, Hidemi Nagao, and Masaru Tateno. 金属蛋白質の QM/MM 計算における遠距離静電相互作用の影響. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

13) Shigehide Kuroyanagi, Yohsuke Hagiwara, Masaru Tateno. 分子動力学計算により明らかになった GatCAB におけるアンモニアを輸送する新しいチャネル. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

14) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. 分子ドッキングおよび QM/MM 分子動力学シミュレーションによる酵素反応機構の理論的解析. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

15) Masaru Tateno and Yohsuke Hagiwara. 高速かつ高精度な van der Waals 相互作用計算スキームを含む QM/MM-MD 計算プログラムの開発. 日本生物物理学会第 46 回年会, 福岡, 2008 年 12 月.

16) Shigehide Kuroyanagi, Yohsuke Hagiwara, Masaru Tateno, Novel channel of glutamine amidotransferase CAB for ammonia transport revealed by molecular dynamics simulations. 第 31 回日本分子生物学会年会 第 81 回日本生化学大会合同大会, 神戸, 2008 年 12 月.

17) Jiyoung Kang, Takehiro Ohta, Yohsuke Hagiwara, Keigo Nishikawa, Tetsunori Yamamoto, Hidemi Nagao, and Masaru Tateno. 金属結合タンパク質の活性部位に対する遠距離静電相互作用が与える影響に関する計算科学的解析. 第 31 回日本分子生物学会年会 第 81 回日本生化学大会合同大会, 神戸, 2008 年 12 月.

18) Tatsunori Nishimura, Thomas Maiwald, Jens Timmer and Masaru Tateno. Novel mathematical formulation to describe steady state reactions in intracellular signaling network cascade. 第 31 回日本分子生物学会年会 第 81 回日本生化学大会合同大会, 神戸,

2008年12月.

19) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Computational analyses of enzymatic reaction mechanism by molecular docking and QM/MM-MD simulations. 第31回日本分子生物学会年会 第81回日本生化学大会合同大会, 神戸, 2008年12月.

20) Masaru Tateno and Yohsuke Hagiwara. Development of QM/MM molecular dynamics program including an accurate and effective description of van der Waals interactions. 第31回日本分子生物学会年会 第81回日本生化学大会合同大会, 神戸, 2008年12月.

21) Yohsuke Hagiwara and Masaru Tateno. Computational study of signal propagation in the complex of *Thermus thermophilus* leucyl-tRNA synthetase (LeuRS) and its cognate tRNA. Biophysical Society 53rd Annual meeting. Boston, US (2009).

22) Masaru Tateno, Osamu Nureki, and Yohsuke Hagiwara. Reaction Mechanisms of Editing (Proofreading) by Leucyl-tRNA Synthetase Revealed by QM/MM Molecular Dynamics Simulations. Biophysical Society 53rd Annual meeting. Boston, US (2009).

(3) その他の発表

1) プレスリリース

2009年1月

生命のしくみを電子のレベルで解明するために高精度かつ高速なコンピュータ・プログラムを開発

— タンパク質や遺伝子 DNA の研究に応用 —

日経産業 (全国版), 日経 BP オンライン版, 茨城新聞など

学内サイト <http://www.tsukuba.ac.jp/public/pressreport.html>

2) TARA News, No. 37 (Jan 2009), 12-17.

舘野 賢 「電子ダイナミクスに基づく生体物質の機能構造および反応機構の構築原理」

生命のしくみを電子のレベルで解明するために高精度かつ高速なコンピュータ・プログラムを開発

VIII 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よる, 主に遷移金属酸化物を対象とした量子スピン系(幾何学的競合系), 相関電子系(新型超伝導), 並びに機能性物質系(イオンバッテリー, 熱電材料等)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」「コバルト酸化物系」「チタン酸化物系」「ニッケル酸化物系」「鉄ニクタイト系」等の研究状況を簡潔に整理する¹.

【1】バナジウム酸化物系

近年, 本グループがバナジウム酸化物系において対象とした物質群を図1(a)に示す.

(1) 量子スピン系

フラストレーションのある系は量子効果の最も強く現れる系として興味深い. たとえば1次元交換結合 J_1 - J_2 モデルでは, 古典的にはスパイラル秩序が現れるのに対して, $S = \frac{1}{2}$ 系では2量体秩序が現れる. 現在, 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

- $Li_xZn_{1-x}V_2O_4$ — NMR および高分解能 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 — NMR および高分解能 NMR による物性の微視的解析. 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 (新規).

¹バナジウム酸化物系に関する2006年時点での過去約5年間の成果の概略に関しては, 次の文献を参照のこと: 小野田雅重, バナジウム酸化物系の科学, セラミックス 41(3), 167-172 (2006).

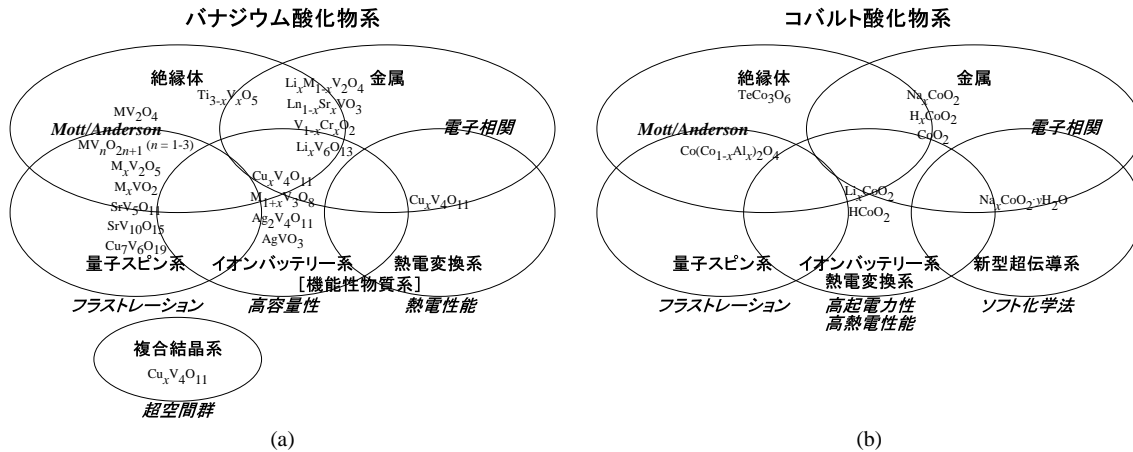


図 1: 近年, 本グループが研究対象とした (a) バナジウムおよび (b) コバルト酸化物系の物質群. 上図に加えて, チタン酸化物系, ニッケル酸化物系および鉄ニクタイト系の研究がある.

c) 他の物質群

- $\text{SrV}_5\text{O}_{11}$ — 新規低次元導体の結晶構造解析 (継続).
- MV_2O_5 — V^{4+} と V^{5+} からなる分子軌道を持つトリス格子 NaV_2O_5 の伝導機構説明.
- $\text{MV}_{10}\text{O}_{15}$ — 新規幾何学的競合系の中性子散乱 (東京大物性研究所・大原氏との協力研究; 新規).

(2) 金属 絶縁体転移系

上記 $\text{Li}_x\text{M}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ 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 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 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ブスカイト系, $\text{MV}_{10}\text{O}_{15}$ (既出 1.1c), $\text{Li}_x\text{V}_6\text{O}_{13}$, VO_2 等が現在の研究対象である (継続).

(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 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 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 $\text{CuV}_4\text{O}_{11}$ 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.

- $(\text{Cu}_{1-z}\text{M}_z)_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ — $\text{M} = \text{Ni}$, $x = 2.2$ において良好な熱電性能指数 ($P = S^2/\rho \approx 3 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$) が得られたのに対して. Ag および Zn の非磁性イオン置換に対しては, 電気伝導度の減少とともに熱電能が減少するという特異な振る舞いが見られた. すなわち, Cu 鎖へ

の異種スピン導入が、熱電素材構築の上で重要であることが示唆された。現在 $x = 2.2$ において、 $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Ag}$ の置換合成を進め、単結晶および多結晶に関する物性解析を行っている（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。図 1(b) は、近年、本グループがコバルト酸化物系において対象とした物質群を表す。

(1) 量子スピン系

- スピネル格子 $\text{Co}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{O}_4 - \text{Co}_3\text{O}_4$ 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。 $0 \leq x \leq 1$ の全領域について、それらの基底状態を考察している（継続）。

(2) 相関電子系

- CoO_2 (P3) — LiCoO_2 のソフト化学処理により得られる CoO_2 は P3 型積層パターンを持ち、 CoO_2 層間方向に関してシフトベクトル $s_1 = \frac{2}{3}a + \frac{1}{3}b$ および $s_2 = \frac{1}{3}a + \frac{2}{3}b$ を伴う積層不整を示す。電気的・磁氣的性質から弱相関金属と考えられ、現在 NMR による微視的解析を詳細に行っている（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る。 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は、実験と理論両面から広範囲に研究されている。電気化学法およびソフト化学法により Li 脱ドーブ試料 ($\text{CoO}_{2-\delta}$ を含む) を作成し、それらの構造と物性評価を行っている（継続）。並行して NMR による微視的解析に着手した（新規）。

(4) 新規超伝導系

- $\text{Na}_{0.3}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$ — コバルト系酸化物超伝導体の電子構造や超伝導の性質は、試料の化学組成に大きく影響される。良質の粉末試料を磁場中で配向させ、結晶 c 軸を揃えることにより、 $H \parallel c$ および $H \perp c$ に対して NMR および NQR を詳細に行い、本系の超伝導がスピン一重項であること等を確立した。

(5) 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 の結晶構造を精密に決定し、その化学組成が TeCo_3O_6 であることを明らかにした。本構造はこれまでに報告されていない新しい型であり、基礎物性評価を進めている（継続）。

【3】他の3d遷移金属化合物系

(1) ペロブスカイト格子 SrTiO₃

SrTiO₃ 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、熱電素材の観点から研究を行っている（新規）。

(2) 三角格子 Li_xNiO₂

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 LiNiO₂ 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）。並行して電気化学的合成も進める予定である。

(3) 鉄ニクタイト系 FeSe

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。本系の超伝導および常伝導機構について知見を得ることを目的として、その合成および評価を行っている（新規）。

〈 論 文 〉

1. M. Rini, Z. Hao, R. W. Schoenlein, C. Giannetti, F. Parmigiani, S. Fourmaux, J. C. Kieffer, A. Fujimori, M. Onoda, S. Wall and A. Cavalleri, Optical switching in VO₂ films by below-gap excitation
Applied Physics Letters **92**, 181904 (3pp) (2008)
2. Masashige Onoda and Yoshikazu Mizuguchi, Correlation and disorder effects for the electronic transport in the low-dimensional system Na_xCa_{1-x}V₂O₅ and Na_xV₂O₅
Journal of Physics: Condensed Matter **20**, 445207 (7pp) (2008)
3. Masashige Onoda, Kenjiro Takao and Tomohiro Ikeda, Spin-singlet superconductivity and antiferromagnetic correlations for the field-aligned powder of the triangular lattice Na_xCoO₂·yH₂O
Physica C **469**, 162 (6pp) (2009)

〈 学位論文 〉

1. 後藤育郎, ペロブスカイト系 Sr_{1-x}R_xTiO_{3+y} の熱電特性
数理物質科学研究科修士（物理学）論文, 2009年3月

ペロブスカイト系 SrTiO₃ は少量のキャリアドープにより低い電気抵抗率と高い熱電能を示すことから、新規酸化物熱電素材として期待されている。しかし本系を熱電素材として利用するには熱電能のさらなる増強等が必要であり、そのような観点から Sr_{1-x}R_xTiO_{3+y} (R = Ce, La; 0 ≤ x ≤ 0.5; y = -0.1, 0, 0.1) を対象に本研究は行われた。1 バンドモデルに基づきホール係数から導出されたキャリア濃度 n_H と熱電能の関係は、元素置換系、酸素欠損系ともに、キャリア有効質量 m* = 3m₀ (m₀ = 自由電子質量) とした縮退半導体モデルで理解された。但し酸素欠損系では、n_H と組成式から導かれるキャリア密度 n_c とに大きな違いが見られた。

- 菅原麻美, 三角格子系 CoO_2 の積層不整と金属的性質
数理解物科学研究所修士(物理学)論文, 2009年3月

三角格子系 $A_x\text{TO}_2$ ($A = \text{アルカリ金属}; T = \text{遷移金属}$) は, 量子スピン系等の基礎分野およびイオンバッテリー系等の応用分野において活発に研究されている. 最近では, $T = \text{Co}$ において高い熱電性能および水分子ドーピングによる超伝導が指摘されている. 本研究は, $A_x\text{CoO}_2$ の母物質である CoO_2 の性質を解明することを目的として行われた. ソフト化学的に合成された CoO_2 は, 三角格子面間酸素配位がプリズム的で, 単位胞当り3層の CoO_2 を持つ (P3). X線回折, 輸送・磁気特性, 並びに核磁気共鳴を通して, CoO_2 (P3) が弱い積層不整を持ち, 金属的であることが明らかにされた.

- 前田清隆, 三角格子系 Li_xNiO_2 の輸送現象と磁性
数理解物科学研究所修士(物理学)論文, 2009年3月

三角格子系 $A_x\text{TO}_2$ ($A = \text{アルカリ金属}; T = \text{遷移金属}$) は, 量子スピン系等の基礎分野およびイオンバッテリー系等の応用分野において活発に研究されている. 最近では, $T = \text{Co}$ において高い熱電性能および水分子ドーピングによる超伝導が指摘されている. 本研究は, ソフト化学的に合成された Li_xNiO_2 の輸送現象と磁性を明らかにすることを目的として行われた. X線回折, 輸送および磁気特性を通して, 本系の輸送現象が2つの伝導機構(半導体および変長ホッピング)に基づいて説明されることがわかった.

〈 講 演 〉

- 高尾健二郎, 小野田雅重, 三角格子系 Li_xVO_2 ($x \approx 0.33$) の磁性
日本物理学会 2008年秋季大会・岩手大学上田キャンパス・2008年9月20日・20pQG1
- 後藤育郎, 小野田雅重, ペロブスカイト型 $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{TiO}_{3+y}$ の熱電特性
日本物理学会 2008年秋季大会・岩手大学上田キャンパス・2008年9月20日・20pPSA43
- 小野田雅重, 高尾健二郎, 池田知廣, $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の超伝導における反強磁性スピンゆらぎの効果
日本物理学会 2008年秋季大会・岩手大学上田キャンパス・2008年9月20日・21aQE3
- 菅原麻美, 小野田雅重, 三角格子系 CoO_2 (P3) の積層不整と電子状態 II
日本物理学会 2008年秋季大会・岩手大学上田キャンパス・2008年9月20日・21aQE4
- 小野田雅重, 遷移金属酸化物系の科学
第42回熱・電気エネルギー技術研究会・帝国ホテルタワー・2008年10月28日(招待講演)
- 小野田雅重, 三角格子系酸化物における軌道秩序的二重項状態
第3回トピカルミーティング「フラストレーションとスピン液体」・2008年12月23日・神戸大学百年記念館六甲ホール
- Masashige Onoda and Ikuo Goto, Electron correlations and thermoelectric effects for the metal-insulator crossover of the perovskite titanium oxides
The Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science・International Congress Center (Epochal Tsukuba)・2009年3月9日
- Asami Sugawara and Masashige Onoda, NMR study for the triangular lattice metal CoO_2 with a three-layer structure

The Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science・International Congress Center (Epochal Tsukuba)・2009年3月9日

9. Hisashi Ishikawa and Masashige Onoda, Thermoelectric effects of the multifunctional composite crystal $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ system

The Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science・International Congress Center (Epochal Tsukuba)・2009年3月9日

10. Kenjiro Takao and Masashige Onoda, NMR study of the geometrically frustrated triangular lattice systems M_xVO_2 with $\text{M} = \text{Li}$ and Na

The Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science・International Congress Center (Epochal Tsukuba)・2009年3月9日

11. 菅原麻美, 小野田雅重, 三角格子系 CoO_2 (P3) の積層不整と電子状態 III
日本物理学会第64回年次大会・立教大学, 立教池袋中学高校・2009年3月27日・27pPSA44

12. 小野田雅重, 斉藤佑弥, 三角格子系 Li_xCoO_2 の軌道秩序的二重項状態
日本物理学会第64回年次大会・立教大学, 立教池袋中学高校・2009年3月28日・28aTL3

13. 高尾健二郎, 小野田雅重, 三角格子系バナデート Na_xVO_2 の NMR
日本物理学会第64回年次大会・立教大学, 立教池袋中学高校・2009年3月28日・28aTH7

14. 前田清隆, 小野田雅重, 三角格子系 Li_xNiO_2 の輸送特性と磁性
日本物理学会第64回年次大会・立教大学, 立教池袋中学高校・2009年3月28日・28aPS48

〈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・自然系学系棟・2009年7月10日
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)」・自然系学系棟, 1F棟・2009年7月28-30日
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年生筑波大学訪問(体験研修)・自然系学系棟・2009年2月10日
4. 小野田雅重, 社会性の育成-研究者育成の観点から-(招待講演)
茨城県立勝田高等学校「みんなといっしょにマナーアップ推進事業」・茨城県立勝田高等学校・2009年3月12日

〈特記事項〉

1. 小野田雅重, 熱・電気エネルギー技術財団研究助成, 「低次元伝導性複合結晶性の高機能化」に対して(2008)
2. 小野田雅重, Selection for Marquis Who's Who in the World, 「遷移金属酸化物系の研究」の業績に対して(2009)

VIII - 2. 半導体物性グループ

教授 舩本 泰章
准教授 野村晋太郎
講師 池沢 道男
助教 富本 慎一
大学院生 (15名) 舩本・野村合算値

【1】半導体量子ドットのスピン光物性 (舩本泰章、池沢道男、富本慎一)

<中性の InP 量子ドット中の励起子のスピン>

(舩本泰章、鈴木幸、川名啓介、池沢道男) [論文 13, 国際会議 4]

中性の InP 量子ドット中の励起子のスピンの励起エネルギー依存性、温度安定性および、観測エネルギー依存性を、直線偏光で準共鳴励起下で、ブライต์励起子とダーク励起子の磁場による反交差の際に観測される円偏光度の共鳴スピン構造をモニターにして研究した。励起エネルギーからは、エネルギー緩和に時間がかかる程、ダーク励起子の生成比が増加すること、温度依存性からは、共鳴スピン構造が 65K まで温度が上昇するとほぼ消滅すること、観測エネルギー依存性からは、量子ドットのサイズの変化により正孔の g 因子が大きく変化することが明らかにされた。

<量子ドット中の電子と正孔の交換相互作用> (舩本泰章、鈴木幸、川名啓介、池沢道男) [論文 8]

直線偏光による準共鳴励起下で 1 電子ドーパの InP 量子ドットと 2 電子ドーパの InP 量子ドットの発光の円偏光度を縦磁場下で、磁場の関数として調べ、低温では磁場の増加とともに増加する円偏光度は正孔単独のゼーマン分裂間の熱分布によって形成される分極に比べて小さく、電子との交換相互作用が働いている事が示唆された。2 電子ドーパの InP 量子ドットの場合には、発光の円偏光度の縦磁場依存性は、弱磁場領域で電子と正孔の異方的交換相互作用による構造が重畳することが観測された。

<1 電子をドーパされた InP 量子ドットの負の円偏光度>

(I. Ignatiev^A, S. Verbin^A, 舩本泰章^A St. Petersburg State Univ.) [論文 12]

1 電子をドーパされた InP 量子ドットでは、負の円偏光度が最大 -50% に到達し、これはドーパされた電子のスピンの光学的に偏極されることで起きることが明らかにされた。光生成された電子・正孔対が電子・正孔間のスピンフリップフロップ過程を伴ったエネルギー緩和をしているとするモデルにより全ての実験データが良く記述できる。

<チャージチューナブル InP 量子ドットにおけるピコ秒スピンダイナミクス>

(川名啓介、富本慎一、舩本泰章)

量子ドットにドーピングされた電子は輻射再結合寿命に制限されない長いスピン寿命を持つことからスピン量子ビットとして有望視されている。本研究では、電界によって電子のドーピング状態を自由に制御出来るチャージチューナブル InP/InGaP 量子ドットにおいて、ピコ秒領域の電子スピンダイナミクスを時間分解カー回転法によって調べた。図 1(a) は量子ドット当たり平均で 1 個の電子をドーピングした場合 (バイアス電圧 -0.175 V) での測定結果である。GaAs 基板中の電子による低周波数の振動とともに、より高い周波数の別の振動成分が観測された。後者の成分が量子ドット中のドーピングされた 1 個の電子のスピン歳差運動によるもので、円偏光のポンパルスの照射によりドーピングされた電子にスピニコヒーレンスが生じたことを示している。この成分の振動周波数は磁場に対して線形な増大を示し (図 2 の Δ)、その傾きから閉じ込め電子の g 因子が 1.52 と求められた。一方、図 1(b) は量子ドットが

電氣的に中性な場合（電子がない場合、バイアス電圧 -0.8 V）での測定結果である。(a)の場合とは異なる 50 ps 程度の短い寿命のビートが観測されたが、この場合の振動周波数の磁場依存性(図2の○)は、弱磁場 (3 T 以下) で線形な関係から外れることが分かった。これは、励起時に電子と対になって生成したヘビーホールが量子ドット中に存在するため、それが電子に及ぼす交換相互作用の効果が歳差運動周波数に現れている。破線のフィッティングから等方的交換相互作用の大きさが 150 μ eV と求められた。

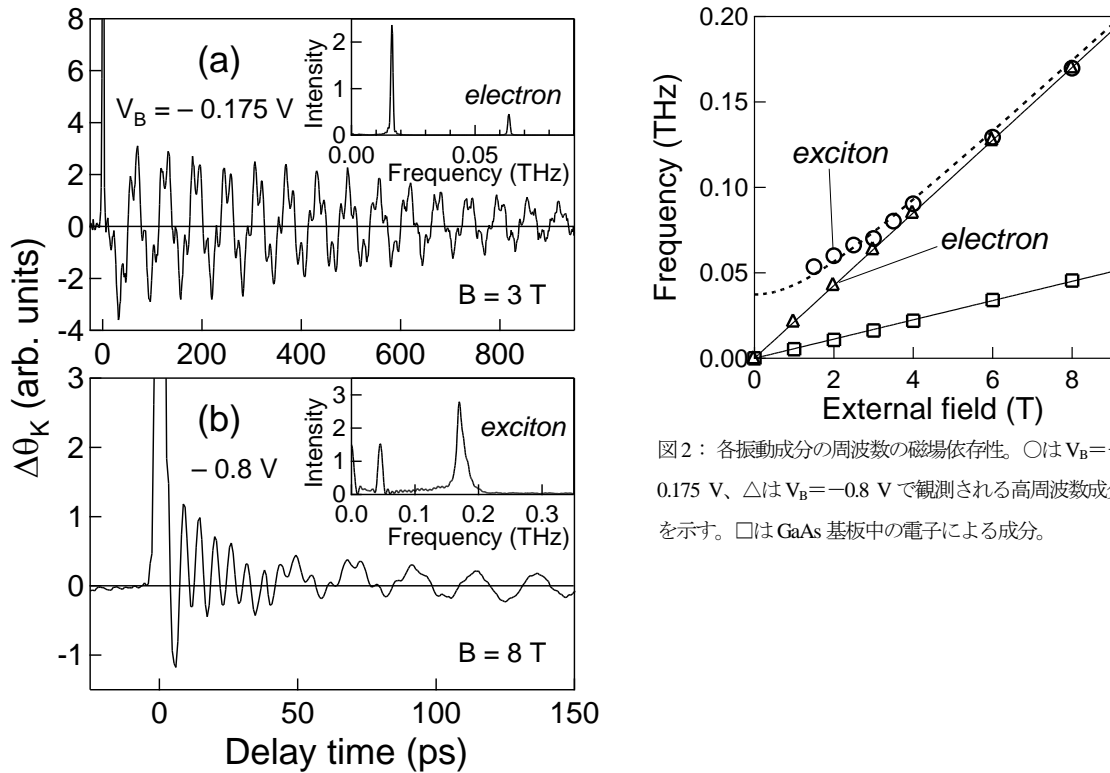


図2：各振動成分の周波数の磁場依存性。○は $V_B = -0.175$ V、 Δ は $V_B = -0.8$ V で観測される高周波数成分を示す。□は GaAs 基板中の電子による成分。

図1：チャージチューナブル InP/InGaP 量子ドットにおけるカー回転角の時間変化。それぞれのパネルの右上に FFT スペクトルを示す。

<CdTe/ZnTe 量子ドットにおける電子の g 因子の異方性の観測>

(富本慎一、野澤伸介、舛本泰章、寺井慶和^A、黒田真司^A、瀧田宏樹^A ^A物性・分子工学専攻)

共通の陰イオンを持つ CdTe と ZnTe のヘテロ界面は価電子帯のエネルギー差が小さく、CdTe/ZnTe 量子ドット (QD) では閉じ込められた正孔の熱的脱離が比較的低い温度 (約 110 K) で起こることが報告されている。我々は、CdTe/ZnTe QD 及び量子井戸 (QW) における時間分解カー回転 (TRKR) の温度依存性を測定し、正孔の熱的脱離がスピンドYNAMICS にどのように反映されるかを調べた。また、試料成長軸に対する磁場の角度 θ を変化させ、電子の g 因子テンソルの異方性を調べた。図 3 は QD で温度を変えて測定した結果である ($\theta = 90^\circ$ 、ポンプ・プローブ波長 564 nm)。QD 内に電子と正孔が共存する低温 ($T = 7$ K) では、励起子による約 20 ps の寿命の非振動・減衰成分が支配的である。この成分の寿命は温度上昇とともに短くなるが、100 K 以上の高温ではそれに続くように新たに振動が観測された (図中の矢印)。これは、正孔の脱離後に QD 内に単独で存在する電子のスピン歳差運動を表している。図 4 は、この歳差運動が現れている高温 ($T = 160$ K) において、磁場の角度 θ を変えて測定した結果である。g テンソルの異方性由来する振動周期の変化が観測された。詳しい測定から QD では成長軸方向成分を $g_{\parallel} = -0.19$ 、それに垂直な方向の成分を $g_{\perp} = -0.33$ と決定出来た。同様に井戸幅 2 ML の QW では $g_{\parallel} = -0.31$ 、 $g_{\perp} = -0.34$ と求められた。

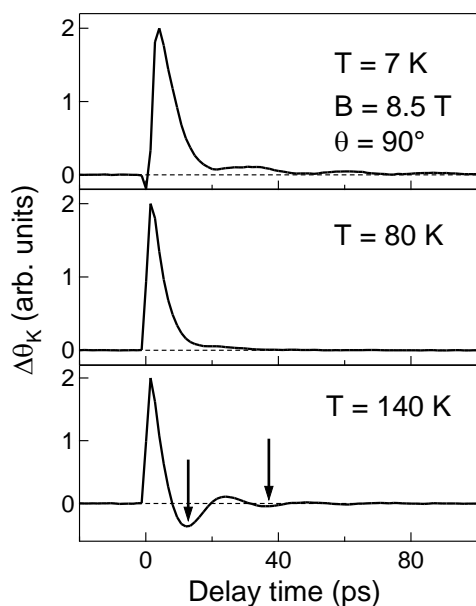


図3：CdTe/ZnTe量子ドットにおけるカー回転角の時間変化の温度依存性。

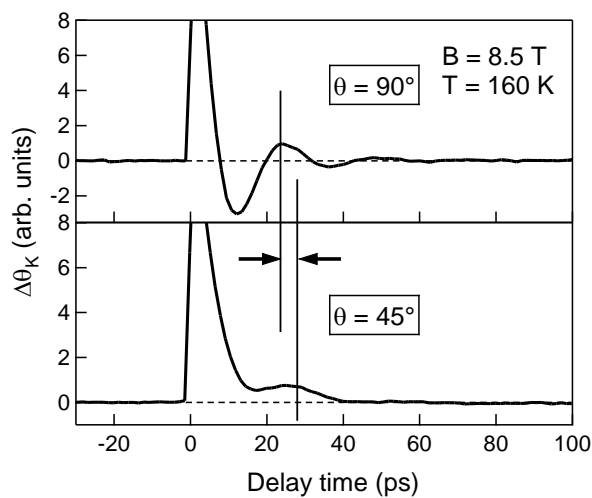


図4：CdTe/ZnTe量子ドットにおいて磁場の方向θを変えて測定した結果。

<Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe自己形成量子ドット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、寺井慶和^A、黒田真司^A、瀧田宏樹^A ^A物性・分子工学専攻)

磁性イオンをドーピングした半導体量子構造は、閉じ込められたキャリアや励起子のスピンと磁性イオンの磁気モーメントとの間の交換相互作用により、興味深い光学物性を示すことが知られている。我々はCd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe量子ドット (QD) 及び量子井戸 (QW) において時間分解カー回転法による実験を行い、閉じ込め電子スピンとMnイオン磁気モーメントのダイナミクスを時間領域で観察した。図5はx=4.5%のQDで外部磁場を変えて測定した結果である (T=7 K、ポンプ・プローブ波長 561 nm)。g=2.0のMnイオン磁気モーメントの歳差運動による遅い振動 (図のMn1 及びMn2 の矢印) とともに、閉じ込め電子スピンによる速い振動 (e1-e3 の矢印) が5 ps以内の短い時間範囲に観測された。振動周波数は磁場とともに大きくなっている。これから求まる閉じ込め電子の有効g因子 (絶対値) は18であるが、これはMn濃度とともに増大し、x=7.1%のQDでは|g|=25と得られた。これらの値はそれぞれ同じMn濃度のQW (井戸幅2 ML) での値の2倍程度であり、電子の波動関数がCdMnTe層に局在する度合に依存していることが分かる。電子スピンの振動周波数はブリュアン関数に従う温度変化を示しており (図6の●)、常磁性的に振る舞う多数のMnスピンとの相互作用を明確に示している。

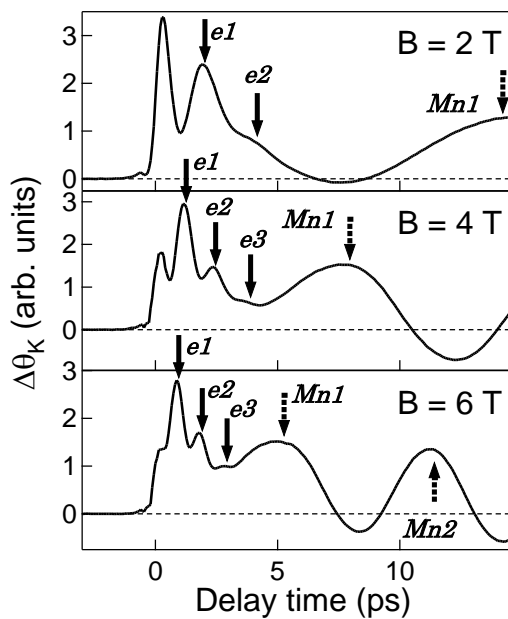


図5: $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ 量子ドット ($x=4.5\%$) におけるカー回転角の時間変化。

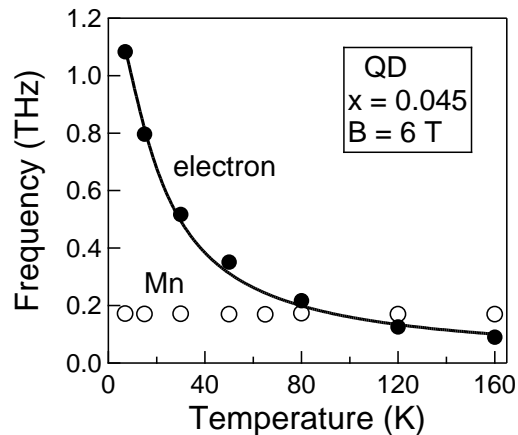


図6: 電子スピン ● と Mn イオン磁気モーメント ○ の振動周波数の温度依存性。

<GaAsN 中の電子の g 因子の符号>

(V. K. Kalevich^A, 池沢道男, 舛本泰章^A Ioffe Physico-Technical Institute) [論文 7]

室温で希薄窒素半導体 GaAsN 中の伝導電子と深い準位に束縛された電子の g- 因子の符号が室温で正であることを Hanle 効果を用いて測定した。g- 因子の符号は横磁場下で試料に垂直方向から角度をつけて入射し、垂直方向から角度をつけて観測する発光の偏光度の磁場依存性に非対称性がでることから決定できる。Hanle 曲線は深い準位に束縛された電子に対応する 400G の幅をもつローレンツ曲線と伝導電子に対応する 50000G の幅をもつローレンツ曲線の和で表わされる。線幅の 2 桁の違いは、伝導電子に比べて、深い準位に束縛された電子がスピン緩和時間がはるかに長いことを示唆している。Hanle 曲線の非対称性の大きさと向きは、GaAs 基板上に成長された GaAsN 薄膜にかかる一軸性歪みにより重い正孔と軽い正孔が分離し、軽い正孔が重い正孔よりも高エネルギー側になるとして説明できる。

【2】単一量子ドットの分光研究 (池沢道男, 舛本泰章)

<単一 GaP:N 等電子トラップからの単光子発生と分光>

(池沢道男, 渡邊真人, 舛本泰章, 佐久間芳樹^A 物質・材料研究機構) [論文 11, 15]

ガリウムリン (GaP) 結晶中に希薄にドーブした窒素原子 (N) による等電子トラップは、不均一性の小さいシャープな束縛励起子発光を示す。単一の等電子トラップは単一量子ドットと同様に、単一光子発生に用いる事が出来るうえ、不均一性の避けられない量子ドットでは困難なエネルギーの揃った単一光子源にもなり得る。実際に、窒素原子 2 つから成る NN ペア等電子トラップを用いて単一光子発生を実証してきた。

NNペアは、近接するPのサイトをNが置換した時に形成される発光中心で、発光スペクトル上で 10 本の輝線 ($\text{NN}_1 \sim \text{NN}_{10}$) が観測されることから、N-N間隔の異なる 10 種類のNNペアがその起源と考えられている。NNペアを単一光子発生に用いると、①NNペアの形成確率が低いので、面内の数密度が下げられ、顕微鏡の空間分解能で容易に単一NNペアを選択出来る、②Nよりも大きな束縛エネルギーを持つ

で、Nより高温まで失活しない、という利点がある。他方、NNペアを用いることによって、束縛励起子の感じるポテンシャルの対称性が低下し、束縛励起子準位が微細分裂を起こす事が応用上問題になりうる。そこで、NNペアの微細エネルギー構造を各ペアについて調べ、その偏光依存性からN-N原子配置を再考察することを試みた。原子配置が確定できれば、各NNの非対称性を相殺するような外場の印加方法も提案できる。

単一のNNペアを観測するために、高純度GaP結晶中に窒素原子を1原子層(001面)だけドーブした試料を用いた。この試料は、有機金属気相成長法(MOCVD)を用いて、物質・材料研究機構の佐久間芳樹博士によって作製された。図7に孤立したN原子と、単一のNN₄ペア発光中心に束縛

された励起子発光の偏光依存性を示す。孤立N原子はNNペアの数よりも数千倍多く均一に存在しているために、ここでは単一のNではなく多数個のN発光を見ている事になるが、いずれにしても高い対称性を反映して発光スペクトル形状はシンプルで、偏光依存性は見られない。他方、単一NN₄発光には微細分裂と強い偏光依存性が見られた。これは、異種原子がペアの形で結晶中に存在するために、ペアの軸方向に例えば歪のような異方性を生じ、そのためp軌道から作られる正孔波動関数の $|p_x\rangle, |p_y\rangle, |p_z\rangle$ 間の縮退が解けるためと解釈される。最も強いピークが[110]結晶軸方向に偏光しているNN₄発光中心と、直交方向に偏光しているNN₄発光中心の二種類があることから、これを説明する原子配置として(0,0,0)-(n,n,0)(nは整数)が考えられる。同様ドーブした試料で多数のNNペアを同時に観測すると様々な方向を向いたNNのスペクトルが平均化されてしまうため、このような明瞭な偏光依存性は見られず、今回単一のNN発光中心を観測することによって偏光依存性が初めて明らかになった。

ドーブを複数層に渡って行くと、図8に示すような傾いた軸を持つ新しい偏光パターンが現れる。これは、(0,0,0)-(n,0,n)という配置でドーブ面(001)と垂直な面内に形成されるNN₄である。この偏光パターンを持つNN₄の割合を、ドーブ層の厚さを変えながら調べることによって、nの値を決める事が可能になる。同様の偏光パターンを持つNN₁, NN₃, NN₇発光中心について詳しく調べたところ、NN₁, NN₃, NN₄, NN₇の順にn=1,2,3,4を当てはめる事が妥当であると分かった(図9)。この他にもNN₅の配置が(0,0,0)-(2,2,1)か(3,2,1)であり、NN₆の配置が(0,0,0)-(5,1,0)および(4,3,1)であることが同様に偏光パターンから明らかとなり、本研究によりNN₁~NN₇までの主要なNNペアの原子配置が分かったと言える。この原子配置は、これまでに知られていたThomas&Hopfieldの単純

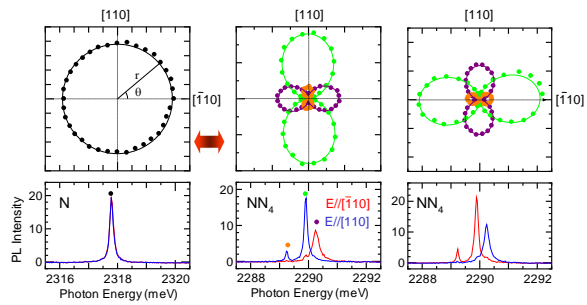


図7：左下：孤立した窒素原子（多数個）による発光中心の偏光分解発光スペクトル。対称性が高く等方的な発光になっているので、ピーク強度を極座標プロットすると、円状になる。中央：単一のNN₄発光ピークの偏光依存性。[110]結晶軸、およびそれに直交する方向に強く偏光している。スペクトルの微細分裂も観測できる。右：90度回転した偏光パターンを持つNN₄も観測された。

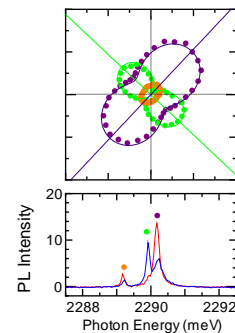


図8：ドーブ層を厚くした場合に観測される別の偏光パターンを持ったNN₄発光中心。[110]結晶軸方向から45度傾いた偏光を持つ。

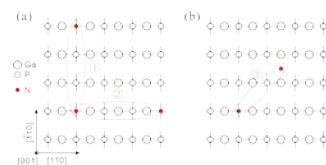


図9：(a) δドーブ面内に形成される(0,0,0)-(3,3,0)窒素原子ペア。第9近接原子配置に相当する。(b) 4層の窒素ドーブ層を必要とする、同種のペア配置。これらが、NN₄発光の起源と考えられる。

な予想に基づく原子配置とは大きく異なっている。この正しい知見を生かして、NNペアの非対称性を相殺するような外場を印加したNNペアからのもつれ合い光子対生成などの応用が考えられる。

窒素をドープしたGaP中には、孤立N原子、NNペアによる発光中心以外にも、3つ以上の窒素不純物原子からなるクラスタ的な発光中心が形成される事が予想されるが、これまで明確な報告はなかった。原因のひとつには、そのようなクラスタの形成確率はNNペアよりもさらに低いため、マクロな発光測定ではクラスタによる弱い発光がNNペア発光の裾に隠されてしまう事が考えられる。今回、顕微発光分光を行ってエネルギーだけではなく空間的にもNNペアと区別する事によって、窒素原子3つから成る新しい発光中心(NNN)を発見することができた。図10に単一NNNの発光スペクトルを示す。NN₄の低エネルギー側にあつてNN₃とも一致しないため、新しい発光中心であることが分かる。窒素原子3つからなることは、窒素ドープ濃度の3乗に比例して面密度が増加したことを根拠としている。単一NNN発光中心からの光子も単一光子となっていることは、Hanbury-Brown Twiss型の強度相関測定を行って確認した。原子配置は、偏光依存性とエネルギーから、NN₄にもうひとつの窒素原子が付いたような形のトリプレットだと考えている。スペクトルの特徴として、NN₄と比較して、低エネルギー側に出るピークの強度が増している事がわかる。このピークは全角運動量J=2のDark excitonに起因するが、第三の窒素原子によって対称性がNN₄のC_{2v}からさらに低下したために波動関数の混合が起こってBright exciton成分が増加したためと考えられる。このような新しい発光中心は他にも多数観測されており、NNペアよりも大きな束縛エネルギーを持つものもあるので、応用上も重要である。

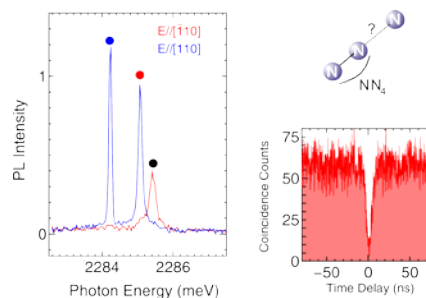


図10：左：単一NNNクラスタに束縛された励起子発光スペクトル。NN₄と同様に[110]結晶軸に強く偏光している。右：単一NNN発光の強度相関測定結果。明瞭なアンチバンチングが観測されている。

<単一量子ドットにおける温度上昇にともなう励起子線幅先鋭化>

(阪東一毅^A、舛本泰章^A 静岡大理物理) [論文 5, 9]

フーリエ分光法を単一量子ドットに適用することにより高感度・高分解能に GaInP マトリックス中に成長された単一 InP 量子ドットの励起子の位相緩和計測を行い、周囲環境が引き起こすドットの位相緩和過程を調べ、低温から温度上昇すると励起子線幅が先鋭化し coherence が回復するという極めて興味深い結果が見出された。モンテカルロシミュレーションによって、ドット周囲のキャリアがもたらすランダムな揺らぎの温度依存性がガウス線幅減少の原因であることが説明された。この結果、温度上昇にともなう線幅の先鋭化が明瞭に説明でき、低温下で環境揺らぎが位相緩和に極めて重要な寄与をもたらすことが明らかにされた。

【3】新しいナノ構造の光物性 (舛本泰章)

<ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェル型ナノワイヤ光物性> (後藤健、B. Pal、舛本泰章、P. Mohan^A、本久順一^A、福井孝志^A 北大量子集積エレクトロニクス研究センター) [論文 6, 10, 14]

ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの形状は、長さが 2 μm、幅が 140 nm の六角柱状で、InP の核と外殻に挟まれて InAs 層が単原子層精度の厚さで埋もれている。六角柱の側面部分は量子井戸として、角部分は量子細線として、それぞれコアマルチシェルナノワイヤの基本構造を形成している。内包された InAs 層の厚さが 1 原子層ずつ変化するのに応じて発光エネルギーが 1.05eV から 1.35eV の間で離散的に変化し、それぞれの発光ピークには約 30 meV の不均一広がり確認された。共焦点顕微分光法により、この不均一幅はナノワイヤ 1 本の中にすでに含まれていることが特定された。不均一広

がりの原因としては、ヘテロ界面でのP原子とAs原子の混合、層厚のゆらぎやひずみによるポテンシャルゆらぎが考えられる。

発光の励起スペクトルから、発光線幅の2倍以上である70 meVものストークスシフトを得た。通常、不均一広がりを示すタイプI型の量子井戸では、発光線幅の0.6倍のストークスシフトを生じるという通則があるが、タイプII型の量子井戸はこの限りではない。発光のピークエネルギーは励起光強度の増加に対して1/3乗に比例して高エネルギー側にシフトする。これは、光励起された電子-正孔の空間的分離に伴うバンド曲がりで説明される。単一光子計測法により発光寿命を測定すると、16 nsもの長寿命であることがわかった。これらの結果は、いずれもタイプII型量子井戸の特徴を示す。InAsおよびInPのa軸(c軸)方向の格子定数は、それぞれ4.2 Å (6.9 Å)、4.0 Å (6.6 Å)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圧縮ひずみを受けている。この大きな圧縮ひずみが伝導帯を引き上げ、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。

1本のナノワイヤ中に250個の電子-正孔対が生成される励起条件の下で、時間分解発光測定を行った。発光スペクトルの平均エネルギーは、数100 psで素早くレッドシフトすることがわかった。これは、バンド曲がりによる束縛準位のブルーシフトが素早く緩和するために生じていると考えた。バンド曲がりの過渡的な現象を取り扱うため、2次元量子井戸におけるポアソン方程式とシュレーディンガー方程式を自己無撞着に解き、精度の高い束縛エネルギーを求め考察を行った。その結果、励起子密度の時間変化と発光の積分強度時間変化との間に良い一致を見出した。このことから、励起子の再結合発光による励起子”数”の変化ではなく、励起子がナノワイヤ中における励起子密度が濃い部分から薄い部分へ拡散することによる、励起子”密度”の変化が、バンド曲がり緩和の物理的な根源になっていると考えられる。

1本のワイヤ中に3個の電子-正孔対を生成するような弱い励起強度の下で時間分解発光測定を行った。発光スペクトルは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値エネルギーをプロットすると、一定の拡散速度で2 meV低エネルギー側にシフトし、およそ1 ns後に拡散速度が遅くなることが見出された。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ている様子であると考えられる。有限要素法によって、コアマルチシェルナノワイヤの側面領域と角領域での正孔の閉じ込めエネルギーを計算すると、角の領域の方が2.7 meV低くなり、上記の筋書きを支持する結果を得た。

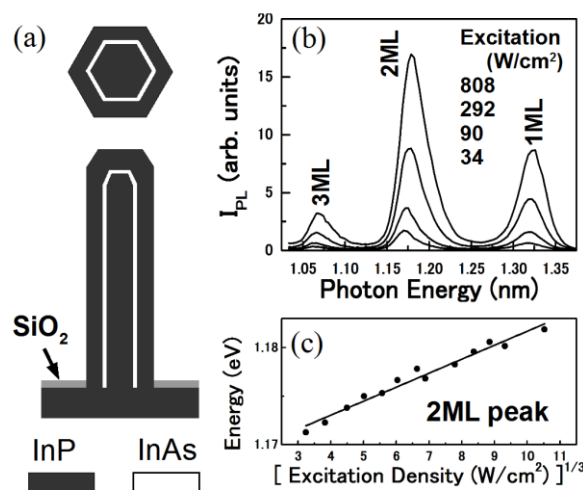


図 11 : (a) コアマルチシェルナノワイヤの断面図。 (b) PL スペクトルの励起強度依存性。 (c) 2ML ピークエネルギーは励起光強度の増加に対して1/3乗に比例して高エネルギー側にシフトする。

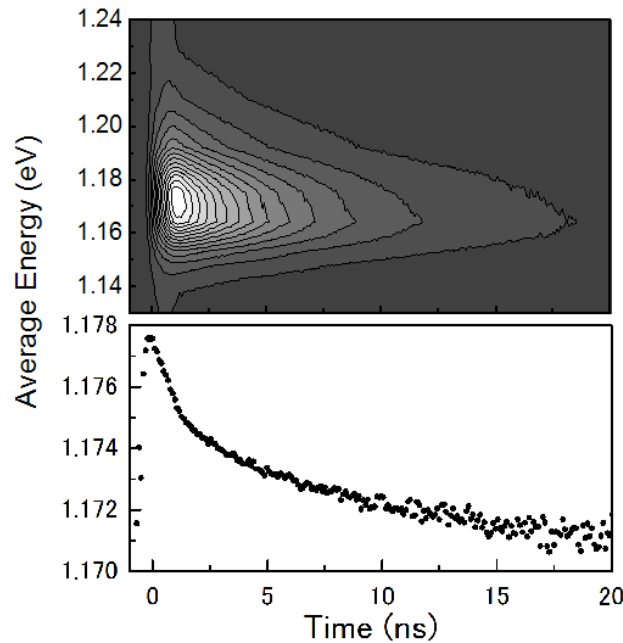


図 12：(上)弱い励起条件における時間分解発光スペクトルの等高線図。
(下)発光の平均エネルギーをプロットしたもの。約 1ns でスペクトル拡散の速度が変化している。

<(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)

(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。

【4】強磁場中空間分解分光システムを用いた研究 (野村晋太郎)

<希釈冷凍機温度近接場光学顕微鏡の開発> (伊藤宙陸、柴田佑輔、野村晋太郎)

極低温強磁場下近接場光学顕微鏡を用いた空間分解分光測定システムを用いた二次元電子系端状態のかかわる現象の研究を実施した。図 13 に開発された装置の外観を示す。光学測定に適するように混合器

等の配置等が特に工夫された独自設計の希釈冷凍機である。試料は Ti/Au ゲート電極付の GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造のホールバーを用い、ゲート電極周辺の空乏層と二次元電子系の境界における光応答の研究を実施した。波長 800nm、強度 60nW の励起光をファイバースコープ先端の約 100nm 径の開口部を介し試料に照射した。局所的に光励起することによりホールバー電圧端子間に生じた電圧のマッピングを行った。得られた光起電圧マッピングはホールバー上のゲート電極付近に強い信号を示した。この信号のピーク位置はゲート電極の印加電圧を負の方向に増大させるほどゲート電極から離れることが観測された。

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氏との共同研究である。

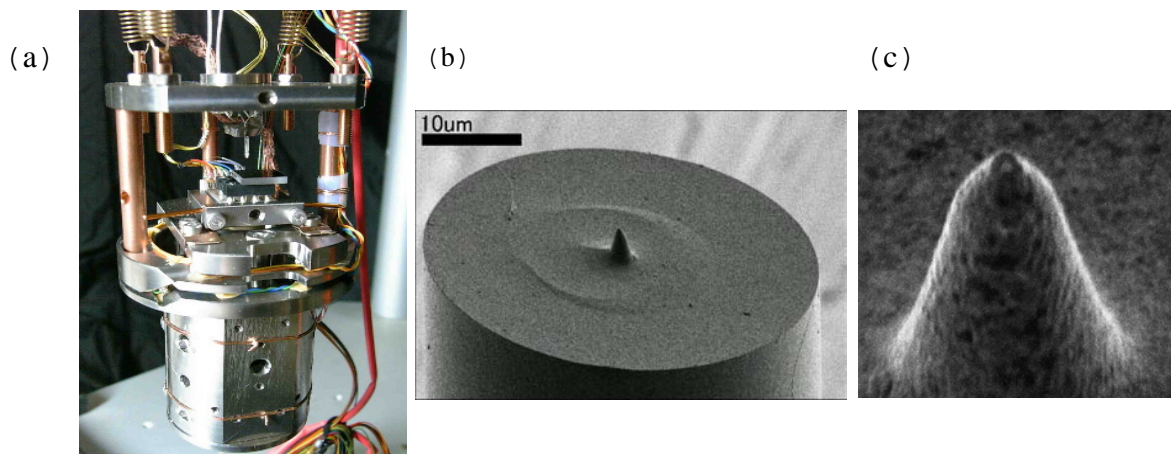


図 13: (a) 近接場顕微鏡ユニット、(b), (c) 約 100nm 径の開口部を有する光プローブ。

<超伝導体-半導体接合の光照射効果の空間分解測定> (津村公平、野村晋太郎) [論文 20, 23]

半導体 2 次元電子ガス (2DEG) のキャリア密度やその空間的分布はゲート電圧によって変調できるという特性を生かし、常伝導金属として 2DEG を用いた超伝導体 (S)-常伝導金属 (N) 接合の研究が行われている。一方、光によっても 2DEG の状態を変調できるが、この場合は、(i) ゲート電極作成といったプロセスが不要である、(ii) 任意スピンキャリアを 2DEG 中に直接生成できるといった利点がある。そしてこの光によって生成されたスピンと Andreev 反射との相互作用によって、接合の輸送特性が変調されることが期待される。これまでに光照射によるジョセフソン状態のスイッチングや臨界電流値の変調の報告がある。2DEG に対する光照射と超伝導の相互作用を直接的に示すような報告は無い。またスピンと関連しては、フェルミ面上での超伝導体と強磁性体の状態密度の違いを利用した量子ポイントコンタクトによるスピン偏極度測定の報告例はあるが、光によるスピン注入と超伝導の研究報告はいまだに実現されていない。

これまでに我々は、GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ接合中の 2DEG と NbN による SNS 接合に対する光照射効果の研究を行ってきた。それにより、まず試料全体に光照射を行うことで 2DEG の電子密度が増大しノーマル抵抗が光照射前の半分に減少することを観測した。さらに NbN の超伝導ギャップエネルギー内の微分抵抗が光照射前より減少することから、光照射によって Andreev 反射確率が増大していることが示された。

今年度は、光励起強度、励起波長といったパラメータを細かく変化させることで、それらに起因した光照射効果をさらに詳細に明らかにすることを目的として研究を実施し、超伝導と光照射効果の関連性を立証することを試みた。その結果、光照射に伴う電圧変化のマップを得ることに成功し、両 SN 界面付近に電圧変化の極大、極小が位置していることが明らかにされた。通常、金属と半導体界面付近にはショットキーバリアが形成されるので、この試料では AuGeNi と NbN の合金をアニーリングで作成し、2DEG

と NbN との電気的接触を取っている。しかし、この試料では超伝導電流が観測されていないことから推察されるように、SN 界面にはポテンシャルバリアが残存している。そのため、バリア付近に局所光照射することでポテンシャルバリアを超えられるエネルギーのキャリアが生成され、それが電圧変化として観測されたものと考えられる。

本研究は東京理科大学教授高柳英明氏、NTT 物性科学基礎研究所赤崎達志氏のグループとの共同研究である。

【5】半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

<ゲート付き非ドープ量子井戸構造の円偏光依存発光分光> (野村晋太郎) [論文 18, 25]

低電子密度領域での二次元電子系の品位の向上に伴い、有効質量やスピン感受率の測定が最近注目を集めている。私たちは発光分光法により、低電子密度領域での研究を進めている。発光分光法では金属相と絶縁体相の双方の状態を検出可能なため、低電子密度極限での振る舞いを調べることに適している。

測定にはゲート電圧により電子密度を連続的に制御することが可能なゲート付き非ドープ GaAs 量子井戸構造試料を用いた。励起光と検出光の円偏光を独立に変えられるようなセットアップを構成し、 σ^+ 偏光励起、 σ^- 偏光励起、 σ^+ 偏光と σ^- 偏光の同時励起 (N) の各励起における発光スペクトルを希釈冷凍機中約 100 mK において測定した。

ランダウ準位占有数 $\nu > 1$ では、N, σ^+ , σ^- のいずれの励起光でも発光ピークエネルギーには顕著な差が見られなかった。そこで、N の場合について、 σ^+ 偏光検出、 σ^- 偏光検出間の発光ピークエネルギーの差の電子密度依存性を低電子密度領域において測定した。その結果、発光ピークの分裂が強く電子密度に依存することがわかった。

ランダウ準位占有数 $\nu < 1$ の分数量子ホール効果領域では、一般に電子は上向きスピンの偏極していると仮定されることが多いが、低電子密度では特定の ν でスピン偏極度が小さくなることが知られている。さらに、光励起下では、電子-正孔対が生成され、量子ホールの励起状態が生じる。特に、up spin で占められている電子系に down spin を光励起で付け加えられ、スピン波励起が生じる。スピン波励起や magnetoroton 励起 (電荷の集団励起) の関わる現象が観測される。

$\nu=1/3$ 近傍ではキャリア相関に起因して発光ピークの分裂が観測される。5 T において高エネルギー側のピークは σ^- 、低エネルギー側は σ^+ に偏極していることがわかった。図 14 に示すように σ^+ に偏極した発光も単なる荷電励起子発光ではなく、二次元電子系の相関を反映している。また、分裂した二つの発光ピークの強度は、 ν に対して異なる振る舞いを示しているのがわかる。これらの発光ピークは荷電励起子発光と関連づけて考えると理解しやすい。一重項荷電励起子 X_s^- は必ずスピン反転を伴う。三重項荷電励起子 X_t^- はスピン反転を伴わない場合と、2 個のスピン反転を伴う場合とがある。低エネルギー側の発光 (" X_s^- " またはスピン波励起) は $\nu=1/3$ や $2/5$ で極小値をとり、遮蔽が小さい場合に電子と正孔が井戸内の別の場所に局在する傾向があると考えられる。一方、高エネルギー側の発光 (" X_t^- " または magnetoroton 励起) は $\nu=1/3$ や $2/5$ で極大値をとり、 X_t^- の軌道はより広がっているため、正孔との重なり積分の低下が小さいと考えることで説明される。

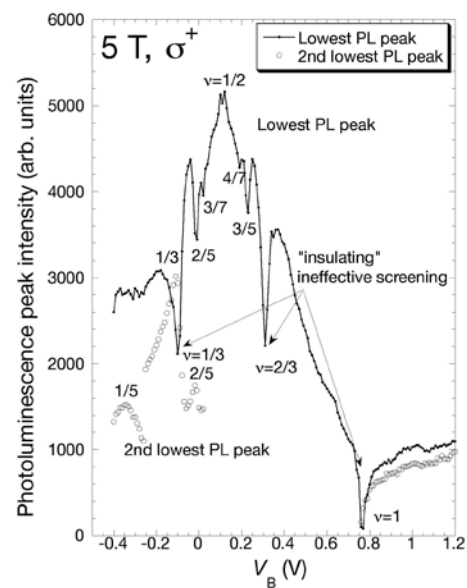


図 14：分数量子ホール効果領域の σ^+ 偏光の二つの発光ピーク強度の ν 依存性。

以上の見方により、観測された円偏光依存発光の電子占有数に対する依存性は定性的に理解されることがわかった。

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

【6】Si ドット-電子ガス結合系の物性（野村晋太郎）

<Si ドット-電子ガス結合系の C-V、I-V 特性の温度依存性>

（櫻井蓉子、野村晋太郎）[論文 16, 19, 21, 22]

二次元系から0次元系へのトンネル現象は、例えば量子ドットフローティングゲートメモリデバイスの動作を決める本質的に重要な現象である。トンネル現象の変調はこれらのデバイスの性能を決定づける重要な役割を果たす可能性がある。二次元系から0次元系へのトンネル現象の理解を深め、その変調を行うために、私たちは量子ドットフローティングゲート MOS キャパシタのトンネリングの温度依存性と光照射強度依存性の研究を進めている。

研究に用いた試料は、二次元系と Si ドットの間十分に高いポテンシャルエネルギーの障壁層をもち、キャリアを Si ドットに長時間保持できるという特徴をもつ。かつ、障壁層の厚さは直接トンネル領域での動作を意図した十分な厚さとなっている。Si ドットの直径は約 5 nm であり、電子注入が起こる際に基板の伝導体と一致するエネルギー付近の Si ドットのエネルギー準位間隔は約 1 meV である。その結果、クーロン=ブロケードは生じるがトンネルの起こりうるゲート電圧には広い範囲が対応する。これは、フェルミ面と離散準位間の共鳴条件によってトンネリングの透過確率が大きくなる条件が決まる単電子トランジスタの場合とは異なっている。

Si ドット-電子ガス結合系試料の C-V 特性に現れるトンネリングに対応する特徴的な構造と過渡電流特性の温度依存性を調べ、低温から温度の上昇にともない、トンネリングの生じるゲート電圧が減少することを見いだした。さらに、レーザー光照射によってもトンネリングの生じるゲート電圧が減少することが見いだされた。これらの結果は、二次元系から0次元系へのトンネルにあたって、電子の進行方向に垂直な方向の波動関数の拡がり、透過確率に大きな影響を与える可能性を示唆している。

本研究は白石賢二教授、広島大学教授宮崎誠一氏のグループ、東北大学教授遠藤哲郎氏のグループとの共同研究である。

<論文>

1. K. Bando, T. Nakamura, S. Fujiwara and Y. Masumoto: "Optical selection rule for the lower Davydov excitons in co-oligomer single crystals", *Phys. Rev. B* 77, 045205 (2008).
2. J. H. Kim, K. Kyhm and Y. Masumoto: "Ultrafast Dynamics of the Band-Gap Renormalization and the State-Filling Effect in Strongly-Confined CdSe/ZnS Nanocrystals", *Journal of the Korean Physical Society* 52, No.1, pp.64-69 (2008).
3. Y. Masumoto, K. Toshiyuki, T. Suzuki and M. Ikezawa: "Resonant spin orientation at the exciton level anticrossing in InP quantum dots", *Phys. Rev. B* 77(11), 115331 (2008).
4. I. Y. Gerlovin, I. V. Ignatiev, I. A. Yugova and Y. Masumoto: "Quantum Beats of Fine-Structures States in InP Quantum Dots", *Opt. Spectroscopy* 104 (4), 577-587 (2008) (in English); *Optika i Spektroskopiya* 104 (4), 640-652 (2008) (in Russian).
5. K. Bando and Y. Masumoto: "Interferometric spectroscopy for excitons in InP single quantum dots", *J. Lumin.* 128, 855-857 (2008).
6. B. Pal, K. Goto, M. Ikezawa, Y. Masumoto, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui: "Type-II behavior in wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Appl. Phys. Lett.* 93, 073105 (2008).
7. V. K. Kalevich, E. L. Ivchenko, A. Y. Shiryayev, M. M. Afanasiev, A. Y. Egorov, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "The sign of electron g-factor in GaAs_{1-x}N_x measured by using the Hanle effect", *Semicond. Sci. Technol.* 23, 114008 (2008).
8. Y. Masumoto, T. Suzuki, K. Kawana and M. Ikezawa: "Spin orientation of excitons, trions and tetraons in charge tunable InP quantum dots", *Phys. Stat. Sol. (c)* 6, 24-27 (2009).
9. K. Bando and Y. Masumoto: "Narrowing of exciton linewidth of a quantum dot with increasing temperature", *Phys. Stat. Sol. (c)* 6, 57-60 (2009).
10. K. Goto, S. Tomimoto, B. Pal, Y. Masumoto, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui: "Transient band-bending in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Phys. Stat. Sol. (c)* 6, 205-208 (2009).
11. M. Ikezawa, Y. Sakuma, M. Watanabe and Y. Masumoto: "Single NN pair luminescence and single photon generation in nitrogen δ -doped GaP", *Phys. Stat. Sol. (c)* 6, 362-365 (2009).
12. I. V. Ignatiev, S. Yu. Verbin, I. Ya. Gerlovin, R. V. Cherbunin and Y. Masumoto: "Negative Circular Polarization of InP QD Luminescence: Mechanism of Formation and Main Regularities", *Opt. Spectroscopy* 106 (3), 375-387 (2009) (in English); *Optika i Spektroskopiya* 106 (3), 427-441 (2009) (in Russian).
13. Y. Masumoto, T. Suzuki, K. Kawana and M. Ikezawa: "Exciton Spin Stability in InP Quantum Dots at the Elevated Temperatures", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 04C198 (2009); 2008 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (Tsukuba, 2008).
14. K. Goto, M. Ikezawa, S. Tomimoto, B. Pal, Y. Masumoto, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui: "One-dimensional and two-dimensional spectral diffusion in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 04C203 (2009); 2008 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (Tsukuba, 2008).
15. M. Ikezawa, Y. Sakuma, M. Watanabe and Y. Masumoto: "Observation of New Isoelectronic Trap Luminescence in Nitrogen delta-doped GaP", *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 04C158 (2009); 2008 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (Tsukuba, 2008).
16. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura and K. Shiraiishi: "Theoretical study of the time-dependent phenomena on a two-dimensional electron gas weakly coupled with a discrete level", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47(10), 7807-7811 (2008).
17. Y. Sugimoto, T. Saiki and S. Nomura: "Visualization of weak confinement potentials by near-field optical imaging spectroscopy of exciton and biexciton in a single quantum dot", *Appl. Phys. Lett.* 93(8) 83116/1-83116/3 (2008).

18. M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Maruyama, S. Miyashita, Y. Hirayama, H. Tamura and T. Akazaki: "Clear evidence of transition from nonlinear to linear screening of a two-dimensional electron system detected by photoluminescence spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 101, 207401 (2008).
19. Y. Sakurai, S. Nomura, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara and S. Miyazaki: "Temperature dependence of capacitance of Si quantum dot floating gate MOS capacitor", J. Phys. Conf. Series. 150, 022071/1-022071/4 (2009).
20. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi: "Optical imaging of the transport properties of S-Sm-S junctions", J. Phys. Conf. Series. 150, 052273/1-052273/4 (2009).
21. Y. Takada, M. Muraguchi, S. Nomura and K. Shiraishi: "Theoretical Studies of Coupled Quantum Dot System with a Two-dimensional Electron Gas in the Magnetic Fields", J. Phys. Conf. Series. 150, 022083/1-022083/4 (2009).
22. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura and K. Shiraishi: "Theoretical Study of the Electron Dynamics of a Quantum Wire Coupled with the Quantum Dots", J. Phys. Conf. Series. 150, 022061/1-022061/4 (2009).
23. T. Akazaki, H. Hashiba, M. Yamaguchi, K. Tsumura, S. Nomura and H. Takayanagi: "Interplay between negative photoconductivity and enhanced Andreev reflection in InGaAs-based S-Sm-S junctions when exposed to infrared light", J. Phys. Conf. Series. 150, 052004/1-052004/4 (2009).
24. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, K. Miyakoshi, H. Tamura, H. Takayanagi and Y. Hirayama: "Density dependent electron effective mass in a back-gated quantum well", in Controllable Quantum State, (World Scientific, Singapore, 2008), eds H. Takayanagi, J. Nitta, and H. Nakano, pp. 307-311.
25. S. Nomura and T. Itaka: "Order- N electronic structure calculation of n -type GaAs quantum dot", in Controllable Quantum State, (World Scientific, Singapore, 2008), eds H. Takayanagi, J. Nitta, and H. Nakano, pp. 197-202.

<総説>

1. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎: "低密度二次元系のキャリア関連の発光測定" 固体物理, Vol. 44, No. 1 pp. 43-53 (2009).

<国際会議>

1. K. Goto, M. Ikezawa, S. Tomimoto, B. Pal, Y. Masumoto, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui: "One-dimensional and two-dimensional spectral diffusion in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", SSDM 2008 (Tsukuba, 2008.9)
2. Y. Masumoto, T. Suzuki, K. Kawana and M. Ikezawa: "One-dimensional and two-dimensional spectral diffusion in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", SSDM 2008 (Tsukuba, 2008.9)
3. M. Ikezawa, Y. Sakuma, M. Watanabe, Y. Masumoto: "Exciton spin stability in InP quantum dots at the elevated temperatures", SSDM 2008 (Tsukuba, 2008.9)
4. Y. Masumoto, T. Suzuki, K. Kawana and M. Ikezawa: "Spin orientation in charge tunable InP quantum dots", ICL' 08 (Lyon, 2008.7)
5. B. Pal, K. Goto, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Spectral diffusion of type-II excitons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", ICL' 08 (Lyon, 2008.7)
6. Y. Masumoto, T. Suzuki, K. Kawana and M. Ikezawa: "Spin orientation of excitons, trions and tetraons in charge tunable InP quantum dots", EXCON' 08 (Kyoto, 2008.6)
7. K. Bando and Y. Masumoto: "Narrowing of exciton linewidth of a quantum dot with increasing temperature", EXCON' 08 (Kyoto, 2008.6)
8. K. Goto, S. Tomimoto, B. Pal, Y. Masumoto, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui: "Transient band-bending in

- InP/InAs/InP core-multishell nanowires”, EXCON’ 08 (Kyoto, 2008.6)
9. M. Ikezawa, Y. Sakuma, M. Watanabe and Y. Masumoto: “Single NN pair luminescence and single photon generation in nitrogen δ -doped GaP”, EXCON’ 08 (Kyoto, 2008.6) 招待講演
 10. Y. Masumoto: “Progress in quantum dot research”, Workshop on PNU-UT Collaborated Research (Kyoto, 2008.6)
 11. M. Ikezawa: “Single NN pair luminescence and single photon generation in nitrogen δ -doped GaP”, Workshop on PNU-UT Collaborated Research (Kyoto, 2008.6)
 12. Y. Takada, M. Muraguchi, S. Nomura and K. Shiraishi: “Tunable interaction between the two-dimensional electron gas and an isolated level by the magnetic field”, 29th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS29) (Rio de Janeiro, 2008.7)
 13. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura and K. Shiraishi: “Theoretical study on electron dynamics for a two-dimensional electron gas coupled with a quantum dot”, 29th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS29) (Rio de Janeiro, 2008.7)
 14. Y. Takada, M. Muraguchi, S. Nomura and K. Shiraishi: “Theoretical studies on the magnetic field effect of the two-dimensional tight-binding lattice coupled to a discrete level”, Physical Phenomena at High Magnetic Fields VI (Tallinn, 2008.8)
 15. M. Muraguchi, Y. Takada, Y. Sakurai, T. Endoh, S. Nomura, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki and K. Shiraishi: “Theoretical investigation of quantum dot coupled to a two-dimensional electron system”, 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop (Hawaii, 2008.12)
 16. S. Nomura, Y. Sakurai, Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki and K. Shiraishi: “Capacitance measurements on quantum dots coupled to a two-dimensional electron system”, 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop (Hawaii, 2008.12)
 17. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, T. Maruyama, S. Miyashita and Y. Hirayama: “Electron density dependence of photoluminescence peak splitting in a gated undoped quantum well”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 18. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura and T. Akazaki: “Photoluminescence spectra of gated undoped GaAs quantum wells at low electron density with a square-mesh surface gate”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 19. Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara and S. Miyazaki: “Temperature Dependence of Electron Transport between Quantum Dots and Electron Gas”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 20. S. Nomura and T. Iitaka: “Order-N electronic structure calculation of a Si quantum dot”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 21. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi: “Photo-voltage imaging of S-Sm-S junctions”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 22. H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, Y. Ootuka and S. Nomura: “Optical mapping of the boundary of a two-dimensional electron gas by a near-field optical microscopy”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Kanagawa, 2009.1)
 23. Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara and S. Miyazaki: “Temperature Dependence of Electron Tunneling between Quantum Dots and Electron Gas”, American Physical Society March Meeting (Pittsburgh, 2009.3)
 24. M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki and Y. Shigeta: “New insight into Tunneling Process between Quantum Dot and Electron Gas”, America Physical Society 2009 March Meeting (Pittsburgh, 2009.3)

<学位論文>

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻博士論文 (2009年2月)

1. 後藤 健: “Optical properties of novel semiconductor nanostructures: wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires (新しい半導体ナノ構造 – ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの光学的性質)”

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文 (2009年2月)

1. 井門 靖樹: “(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”
2. 梅澤 康昭: “金一次元格子構造を有するグラフェンのラマン分光”
3. 櫻井 蓉子: “量子ドット-電子ガス結合系における C-V 及び I-V 特性”
4. 藤咲 健二: “量子ドットアレーの C-V 特性と発光特性”

<講演>

1. 池沢道男, 佐久間芳樹, 渡邊真人, 舛本泰章: “窒素を δ ドープした GaP の単一等電子トラップ分光 (II)” 日本物理学会 2008 秋季大会 (2008年9月)
2. 野澤伸介, 富本慎一, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “時間分解カー回転法を用いた CdTe/ZnTe 量子構造におけるスピンドYNAMIXの観測” 第 69 回応用物理学会学術講演会 (2008年9月)
3. 佐久間芳樹, 池沢道男, 渡邊真人, 舛本泰章: “GaP 中への N ドーピング技術と等電子トラップによる単一光子発生” 第 69 回応用物理学会学術講演会 (2008年9月)
4. 佐々木史雄, 原市 聡, 井門靖樹, 舛本泰章, 堀田 収: “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーを用いたマイクロ(ディスク・リング)レーザーの発振モード特性” 第 69 回応用物理学会学術講演会 (2008年9月)
5. 井門靖樹, 舛本泰章, 佐々木史雄, 原市 聡, 堀田 収: “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーマイクロリングレーザー作製プロセスの改善” 第 69 回応用物理学会学術講演会 (2008年9月)
6. 富本慎一, 野澤伸介, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “CdTe/ZnTe 量子井戸及び自己形成量子ドットにおける時間分解カー回転測定” 日本物理学会 2008 秋季大会 (2008年9月)
7. 川名啓介, 鈴木宰, 池沢道男, 舛本泰章: “チャージチューナブル InP 量子ドットのスピン偏極” 日本物理学会 2008 秋季大会 (2008年9月)
8. 舛本泰章: “単一光子技術が拓く新しい光物性” 日本光学会年次学術講演 招待講演 (2008年11月5日)
9. 野澤伸介, 富本慎一, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “CdTe/ZnTe 量子ドット中の閉じ込め電子の g 因子とスピン緩和” 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009年3月)
10. 舛本泰章: “量子ドット中の電子スピンドYNAMIXと緩和” 日本物理学会第 64 回年次大会 招待講演 (2009年3月)
11. 富本慎一, 野澤伸介, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “Cd_{1-x}MnxTe/ZnTe 自己形成量子ドットにおける電子スピンドYNAMIX” 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009年3月)
12. 富本慎一, 野澤伸介, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “CdMnTe/ZnTe 量子構造の光励起状態におけるスピンドYNAMIX” 第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009年3月)
13. 佐々木史雄, 原市 聡, 井門靖樹, 舛本泰章, 堀田 収: “(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーを用いたマイクロ(ディスク・リング)レーザーの発振閾値低減” 第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009年3月)
14. 井門靖樹, 舛本泰章, 佐々木史雄, 原市 聡, 堀田 収: “高温蒸着法を用いた(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーマイクロレーザー作製” 第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009年3月)

15. 川名啓介, 富本慎一, 野澤伸介, 舛本泰章: “チャージチューナブル InP 量子ドットにおける電子スピンのピコ秒ダイナミクス” 第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009 年 3 月)
16. 野澤伸介, 富本慎一, 寺井慶和, 黒田眞司, 瀧田宏樹, 舛本泰章: “CdTe/ZnTe 量子構造における電子スピンドダイナミクスの温度変化と g 因子の異方性” 第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009 年 3 月)
17. 野村晋太郎: “平らな二次元系と巻かれた二次元系の発光分光” 早稲田大学理工学術院, QMS セミナー (2008 年 5 月) (招待講演)
18. 野村晋太郎: “低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測研究” 京都大学, 宇治セミナー (2008 年 7 月) (招待講演)
19. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一: “量子ドットフローティングゲートメモリの低温における C-V 特性” 第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2008 年 9 月)
20. 高田 幸宏, 村口 正和, 野村晋太郎, 白石賢二: “電子ガスと量子ドットの結合系における電子状態および電子ダイナミクスの検討” 第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2008 年 9 月)
21. 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 丸山達朗, 宮下宣, 平山祥郎: “二次元電子系発光ピーク分裂エネルギーの電子密度依存性” 日本物理学会秋季大会 (2008 年 9 月)
22. 野村晋太郎, 飯高敏晃: “Si ナノドットのオーダー N 電子状態計算” 日本物理学会秋季大会 (2008 年 9 月)
23. 高田幸宏, 村口正和, 野村晋太郎, 白石賢二: “電子ガス-量子ドット結合系における電子状態” 日本物理学会秋季大会 (2008 年 9 月)
24. 村口正和, 高田 幸宏, 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 斎藤慎一, 白石賢二: “電子ガス-量子ドット結合系におけるダイナミクス” 日本物理学会秋季大会 (2008 年 9 月)
25. 櫻井蓉子, 野村晋太郎, 白石賢二, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一: “電子ガス-量子ドット結合系における C-V 特性” 日本物理学会秋季大会, (2008 年 9 月)
26. 野村晋太郎, 櫻井蓉子, 高田幸宏, 白石賢二, 村口正和, 遠藤哲郎, 池田弥央, 牧原克典, 宮崎誠一: “電子励起状態を介した量子ドットへのトンネル現象の変調” 応用物理学連合会 (2009 年 4 月) (招待講演)
27. 村口正和, 遠藤哲郎, 宮崎誠一, 牧原克典, 池田弥央, 野村晋太郎, 櫻井蓉子, 高田幸宏, 白石賢二: “少数電子で動く未来デバイスの姿-量子電子ダイナミクスからのメッセージ” 応用物理学連合会 (2009 年 4 月) (招待講演)

VIII-3 強相関物性グループ

教授 守友 浩
 助教 上岡隼人
 研究員 松田智行
 特別研究生 WuXuewei (H20.9-H21.6)
 客員教授 劉曉 俊 (H20.8.7-9.7)
 大学院生 M2 中田文也
 M2 柴田恭幸
 M1 五十嵐一泰
 M1 阿部雄太

【1】 価数差分分光法と Co-Fe シアノ錯体への応用[1](中田、栗原、上岡、守友)

ずエレクトロクロミズムを示す材料の電子構造を明らかにする手法として、価数差分分光法を提案し、Co-Fe シアノ錯体に応用した。電圧印加で試料薄膜の価数をわずかに変化させ、差分吸収スペクトルを側手することにより、価数の変化した金属サイトに関する吸収帯のみを実験的に抽出することができる。さらに、価数差分の符号により、どの価数状態に関するかも明らかになる。図1下にあるように、Co-Fe シアノ錯体の価数差分吸収スペクトルには複数の吸収帯が観測され、その帰属を行った。

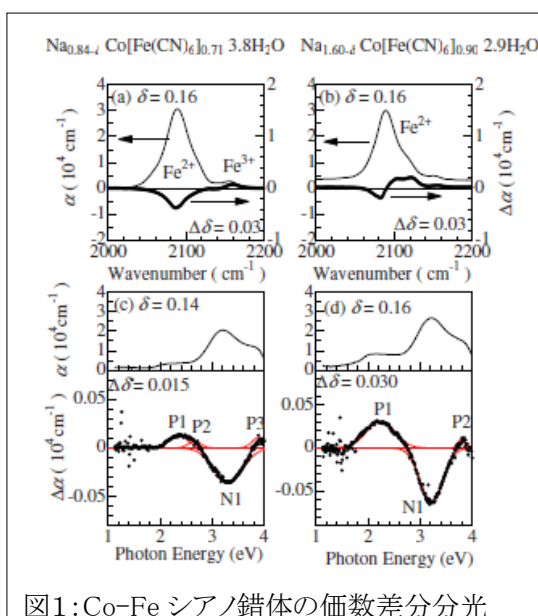


図1: Co-Fe シアノ錯体の価数差分分光

【2】 ゲスト水濃度によるシアノ錯体の物性制御 [2,11,14] (中田、守友)

ナノポーラス構造を有する Co-Fe シアノ錯体 ($\text{Na}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$) のナノ空間の占有するゲスト水の量を制御し、それが物性に与える影響を明らかにした。特に、電荷移動相転移温度は、二段階の振る舞いを示した。ゲスト水の多い領域では、ゲスト水の量が減少するとともに電荷移動相転移の臨界温度が上昇した。しかしながら、ゲスト水の少ない領域では、電荷移動相転移が消失した。そうした二段階の振る舞いは、ゲスト水に複数のサイトがあるためである。つまり、まず、骨格との結合が弱いゼオライト水が脱離し、次に、骨格との結合の強い配位水が脱離すると考えられる。こうした考察は、放射光粉末 X 線回折による精密構造解析で実験的に確認された。右図は、非経験的に決定された酸素サイトである。

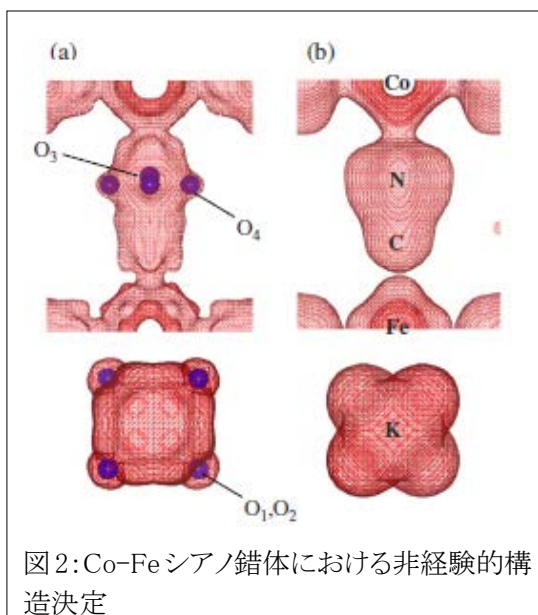


図2: Co-Feシアノ錯体における非経験的構造決定

【3】 シアノ錯体界面における物質移動と強磁性の電圧スイッチ [3,13] (柴田、守友)

シアノ錯体では、Na の濃度とともに光物性、磁性、構造物性が大きく変化する。我々は、二種類のシアノ錯体膜を接合し両端に 0.6V 程度の電圧を印可すると、界面を通じて片方の膜からもう片方の膜へと Na が移動することを見出した。この現象を利用すると、電圧印加により光物性、磁性、構造物性の制御が可能となる (特許 2)。右図に、その一例を示す。As-grown 膜は常磁性であるが、0.6V の電圧を印可することにより $T_c=20\text{K}$ の強磁性体へと変化する。

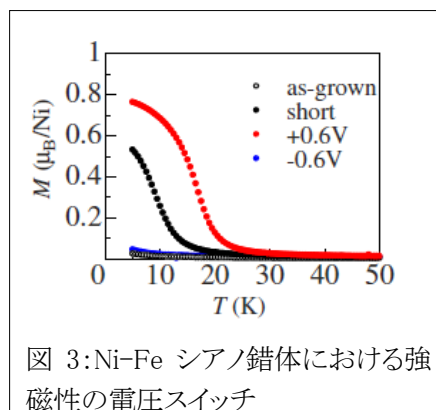


図 3: Ni-Fe シアノ錯体における強磁性の電圧スイッチ

【4】 シアノ錯体の圧力誘起構造相転移 [4] (劉、松田、上岡、守友)

高圧ラマン分光法により、Mn-Fe シアノ錯体に 2GPa 程度の圧力を印可すると構造誘起相転移が誘起されることを見出した。2GPa 以下では、CN 伸縮振動モードの共鳴エネルギーは blue shift を示すが、2GPa 以上ではほぼ一定となった。これは、圧力印可により、 $\text{Fe}(\text{CN})_6$ 八面体が回転したことを示唆する。

【5】 フェムト秒分光による Co-Fe シアノ錯体の相探索 [5,6,7,8,16,17] (上岡、守友)

我々は、フェムト秒分光を駆使して Co-Fe シアノ錯体の隠れた秩序相の探索を行っている。これまでの研究により、光生成された電荷移動状態の寿命が励起光強度とともに増大することを見出した。

【6】 Co-Fe シアノ錯体のホールドープと物性 [12,17] (中田、五十嵐、守友)

Co-Fe シアノ錯体にホールドープを行い、価数に依存した物性の変化を明らかにした。この研究で得られた知識は、界面における物質移動を利用した物性制御の基礎となる。

【7】 SPring-8 における CREST プロジェクト

(1) 本研究グループの役割

本研究グループは、チームリーダーとして CREST プロジェクト (「反応現象の X 線ピンポイント構造計測」: 代表 高田昌樹 H16.10 - H21.9) に参加している。プロジェクト全体の詳細は、<http://pinpoint.spring8.or.jp/CREST/> を参照して頂きたい。このプロジェクトは、5つの研究チームより構成されている。

- ・ 高田チーム: X線ピンポイント構造計測装置の構築とその実用デバイスへの応用
- ・ 木村チーム: X線マイクロビームの発生と高精度回折系の開発
- ・ 田中チーム: フェムト秒パルスの発生と同期技術の開発
- ・ 守友チーム: 極限環境下での計測技術の開発と本装置の有用性の実証
- ・ 鳥海チーム: 微小空間での計測技術の開発と本装置の有用性の実証

守友チームの役割は、時間分解構造解析装置の装置開発とその有用性の実証である。これまでの期間で装置開発は、ほぼ終了した。今後は、時間分解構造解析といった実験手法を光誘起相転移や巨大光応答に適用し、その有用性を実証してゆく。

【8】XFEL 利用推進に向けた委託研究

(1) 本研究グループの役割

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MEM電子分布解析の高度化」:代表 守友 浩、H18.9-H21.3)の委託研究を推進している。この研究では、試料を時間・空間領域で分光学的に監視するフェムト秒時間分解顕微鏡の開発、及び、MEM電子分布解析の高度化技術の開発を、独立行政法人理化学研究所と共同で実施する。筑波大学では、フェムト秒時間分解顕微鏡試作機の開発と性能評価に関わる研究開発を実施する。

平成21年度以降は、本委託業務は「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」に引き継がれることになった。次年度以降は、フェムト秒時間分解顕微鏡のXFEL本機への組み込みを目指した開発を行う。

(2) 本年度の経過

a) 光源部の開発

パラメトリック増幅器を導入し、励起光のエネルギー変換を可能にした。

b) 鏡筒部の開発

SPring-8のBL19LXUでの実験を念頭において、小型・軽量の鏡筒部を設計・製作を行った。制

作した鏡筒部の

写真を設計図面

とともにしめす(特

許3)。筑波大学

において、製作した鏡筒部の性能

試験を行ったところ、空間分解能 3

μm 、時間分解能 200fs であった。

なお、時間分解能は光源部(フェムト秒レーザー)

の仕様で決まる。

完成した鏡筒部

を SPring-8 に運

搬した。

c) 画像部の開発

H19年度に開発した A/D 変換器を用いた擬似 boxcar 方式での 72 チャンネルデータ取り込み方式をさらに改良した。素子数を 256 チャンネルに増やした。また、データ取り込みをスキャン方式に変更し、デジタルオシロを経由して取り込んだ。S/N の低下は観測されず、また、測定データ空間分解能が著しく向上した。

d) 性能評価物質の探索

フェムト秒時間分解顕微鏡の性能評価には、光応答性の高いシアノ架橋金属錯体が適していると考えられる。そこで、光応答の実験に不可欠なシアノ架橋金属錯体薄膜を電解析出法で作成した。得られた薄膜の構造・磁性・光物性を測定した。

e) プロジェクトの総合的推進

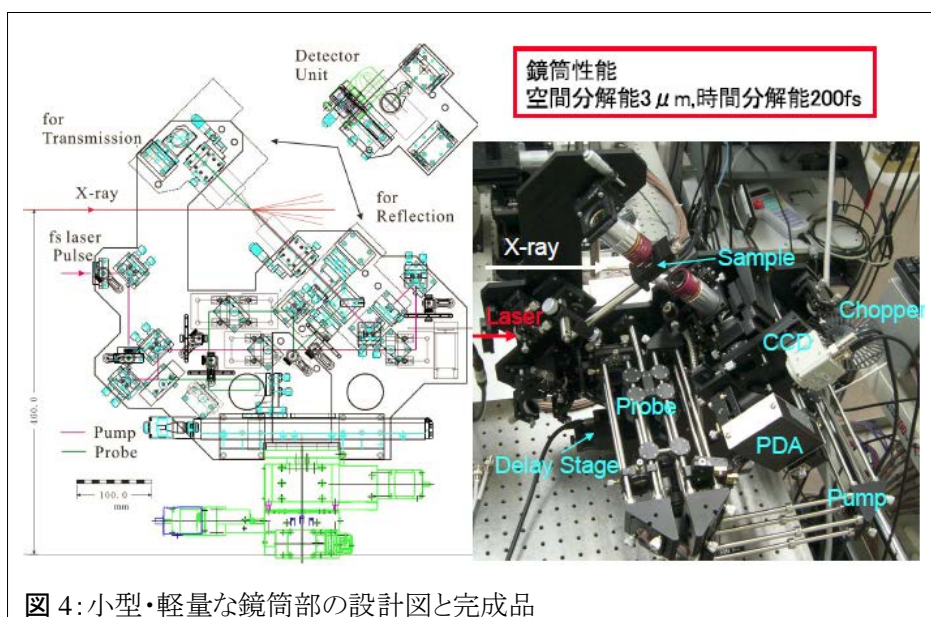


図 4: 小型・軽量の鏡筒部の設計図と完成品

筑波大学と理化学研究所と連携を密にするために、運営委員会を三度開催し、開発の進捗状況の報告と運営方針を決定した。さらに、放射光を用いた時間分解計測技術、および、レーザーを用いたイメージング技術の最先端情報を得るために、筑波大学において研究会「先端光計測と光応答性材料」を開催した。

【9】 戦略イニシャティブ(A)に関する活動

平成20年度の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)」のメンバーとして、拠点形成に向けた活動を行った。第一回学際物質科学研究会「ナノ分子磁性体の科学・物理・応用」(2008/11/28-29)および第二回学際物質科学研究会「先端光科学と光応答性材料」(2009/3/13-14)を主催した。また、啓蒙活動として講習会「LabViewつてなに」(2008.10.1)を開催した。また、南京大学電子工学科と数理物質科学研究科との間に研究教育に関する協定を結んだ。

<論文>

1. Y. Moritomo, F. Nakada and Y. Kurihara, "Valence-differential spectroscopy of Co-Fe cyanide films", *Appl. Phys. Lett.*, 94, 111914 (2009) (3 pages)
2. J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, T. Shibata and Y. Moritomo, "Guest-host interaction of $K_{0.34}Co[Fe(CN)_6]_{0.75} \cdot zH_2O$ as investigated by a charge-density analysis", *Phys. Rev. B* 79, 132105 (2009) (4 pages)
3. Y. Moritomo and T. Shibata, "Electric pressure-induced ferromagnetism mediated by Prussian blue junction", *Appl. Phys. Lett.*, 94, 043502 (2009) (3 pages)
4. X. J. Liu, Y. Moritomo, T. Matsuda, H. Tokoro and S. Ohkoshi, "Pressure-Induced Octahedral Rotation in $RbMn[Fe(CN)_6]$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 78(2009)103602 (4 pages).
5. H. Kamioka, Y. Moritomo, W. Kosaka and S. Ohkoshi, "Charge transfer processes in cyano-bridged transition metals", *phys. stat. sol.* 6, 116-119 (2009).
6. Y. Moritomo, T. Nakagawa, Y. Fukuyama, N. Yasuda, H. Oosawa, J. E. Kim, H. Kamioka, K. Kato, Y. Tanaka, S. Kimura, F. Nakada, S. Ohkoshi, H. Tanaka and M. Takata, "Photoinduced dynamics of prussian blue type cyanide", *J. Phys.* 148, 012028(2009).
7. H. Kamioka, F. Nakada, K. Igarashi, Y. Moritomo, "Transient photo-induced phenomena in vacancy-controlled Co-Fe cyanides", *J. Phys.* 148, 012031(2009).
8. Y. Moritomo, T. Nakagawa, Y. Fukuyama, N. Yasuda, H. Oosawa, J. E. Kim, H. Kamioka, K. Kato, Y. Tanaka, S. Kimura, F. Nakada, S. Ohkoshi, H. Tanaka, M. Takata, "Photoinduced dynamics of prussian blue type cyanide", *J. Phys.* 148, 012028 (2009).
9. R. P. Panguluri, Sh. Xu, Y. Moritomo, I. V. Solovyev and B. Nadgorny, "Disorder effects in half-metallic Sr_2FeMoO_6 single crystals", *Appl. Phys. Lett.* 94, 012501 (2009).
10. N. Yasuda, H. Murayama, Y. Fukuyama, J. E. Kim, S. Kimura, K. Toriumi, Y. Tanaka, Y. Moritomo, Y. Kuroiwa, K. Kato, H. Tanaka and M. Takata, X-ray diffractometry for the structure determination of a submicrometre single powder grain, *J. Synchrotron Radiation*, 16(2009) 352-357.
11. Y. Moritomo, F. Nakada, J. E. Kim and M. Takata, "Desorption-eraser of the Spin State Transition in Prussian Blue Cyanide" *Appl. Phys. Ex.*, 1, 111301 (2008) (3 pages)

12. K. Igarashi, F. Nakada and Y. Moritomo, "Electronic structure of hole-doped Co-Fe cyanides: $\text{Na}_{1.60-\delta}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.90} \cdot 2.9\text{H}_2\text{O}$ ($0.0 < \delta < 0.85$)", *Phys. Rev. B*, **78**, 235106 (2008).
13. T. Shibata, F. Nakada, H. Kamioka and Y. Moritomo, "Electronic and magnetic properties of valence-controlled Ni-Fe cyanides", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **77**, 104714 (2008) (5 pages)
14. Y. Moritomo, F. Nakada, H. Kamioka, J. E. Kim, M. Takata, "Desorption-Induced First-Order Phase Transition in a Cyano-Bridged Compound", *Appl. Phys. Lett.*, **92** 141907 (2008). (3 pages)
15. J. E. Kim, Y. Ohishi, Y. Moritomo, K. Kato, M. Takata and S. Ohkoshi, "Pressure-temperature phase diagram for charge-transfer transition in $\text{Cs}[\text{Co}(\text{3-cyanopyridine})_2][\text{W}(\text{CN})_8]\text{H}_2\text{O}$ ", *Phys. Rev. B*, **77**, 012101 (2008) (4 pages)
16. H. Kamioka, Y. Moritomo, W. Kasaka and S. Ohkoshi, "Dynamics of charge-transfer pairs in the cyano-bridged $\text{Co}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$ transition metal compound", *Phys. Rev. B*, **77**, 180301 (R) (2008) (4 pages)
17. H. Kamioka, Y. Moritomo, W. Kasaka and S. Ohkoshi, "Charge-transfer dynamics in cyano-bridged $\text{M}_A\text{-Fe}$ system ($\text{M}_A = \text{Mn, Fe and Co}$)", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **77**, 093710 (2008). (4 pages)
18. F. Nakada, H. Kamioka, Y. Moritomo, J. E. Kim, M. Takata, "Electronic phase diagram of valence-controlled cyanide: $\text{Na}_{0.84-\delta}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.71} \cdot 3.8\text{H}_2\text{O}$ ($0 < \delta < 0.61$)", *Phys. Rev. B*, **77**, 224436 (2008) (7 pages)
19. H. Tokoro, T. Motosuda, T. Nuida, Y. Moritomo, K. Ohoyama, E. d. Loutete, K. Boukheddaden and S. Ohkoshi, Visible-light-induced reversible photomagnetism in rubidium manganese hexacyanoferrate, *Chem. Mater.*, **20**, 423-428 (2008).
20. Y. Fukuyama, N. Yasuda, J. E. Kim, H. Murayama, Y. Tanaka, S. Kimura, K. Kato, S. Kohara, Y. Moritomo, T. Matsunaga, R. Kojima, N. Yamada, H. Tanaka, T. Ohshima and M. Takata, Time-Resolved Investigation of Nanosecond Crystal Growth in Rapid-Phase-Change Materials: Correlation with the Recording Speed of Digital Versatile Disc Media, *Applied Physics Express*, **1**, 045001 (2008) (3 pages).
21. K. Kato, Y. Moritomo, M. Takata, H. Tanaka and N. Hamada, Visualization of charge ordering in a half-doped manganite by an electrostatic potential analysis, *Phys. Rev. B*, **77** 081101(R) (2008) (4 pages).
22. Y. Fukuyama, N. Yasuda, J. E. Kim, H. Murayama, S. Kimura, H. Kamioka, Y. Moritomo, K. Toriumi, T. Ohshima, H. Tanaka, Y. Tanaka, K. Kato, T. Ishikawa and M. Takata, Ultra-high-precision time control system over any long time delay for laser pump and synchrotron x-ray probe experiment, *Review of Scientific Instruments*, **79**, 045107 (2008) (4 pages)
23. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, A. Aiba, M. Uramoto, Y. Morimoto, M. Hirano, L. Skuja, H. Hosono, Diffusion and reactions of interstitial oxygen species in amorphous SiO_2 , *Journal of Non-Crystalline Solids* **354**, 224-232 (2008)

< 著書 >

1. 守友 浩、「4章2節 遷移金属錯体の光誘起相転移」、錯体化学会選書「金属錯体の現代物性化学」山下正廣、小島憲道編著、三共出版

<学位論文>

1. 修士論文 中田文也、「ゲスト分子濃度制御によるシアノ錯体の物性研究」
2. 修士論文 柴田恭幸 「膜接合による Prussian blue 錯体の電圧価数制御」

<講演>

1. Y. Moritomo, "Time-resolved spectroscopy of cyano-bridged compound", ICROM2008@Tokyo, 2008/4/3-4 (招待講演)
2. Y. Moritomo, "Photoinduced dynamics of the Prussian blue type cyanides", PIPT2008@Osaka, 2008/11/11-15 (招待講演)
3. Y. Moritomo, "Charge & lattice dynamics in Prussian blue type cyanides" MOLMAT@toulouse. 2008/7/8-11
4. Y. Moritomo, "Phase control of Prussian blue analogue", seminar@Univ. of Nanjing, 2008/6/2-6 (招待講演)
5. 守友 浩、「ホスト-ゲスト相互作用を利用した Co-Fe 系シアノ錯体膜の物性制御」特定領域「配列ナノ空間」研究会@大阪、2008/6/7
6. 守友 浩、「物性物理学の研究対象としてのプルシャンブルー錯体」、「ナノ分子磁性体の化学・物理・応用」@筑波、2008/11/28-29.(招待講演)
7. 守友 浩、「プルシャンブルー格子のゲストを通じた物性制御」、東北大学 G-COE 研究会@東北、2008/12/19-21..(招待講演)
8. 守友 浩、田中義人、「フェムト秒時間分解顕微鏡の本機への組込を光応答性物質の探索」、第3回 XFEL 利用推進 WS@東京、2009/3/19
9. Y. Moritomo, "Functionality of Prussian blue lattice by guest-host interaction", ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10. (招待講演)
10. 守友 浩、「プルシャンブルー錯体の機能探索」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14 (招待講演)
11. 上岡隼人「プルシャンブルー錯体膜の時間分解分光」「ナノ分子磁性体の化学・物理・応用」@筑波、2008/11/28-29
12. 金廷恩、守友 浩、加藤健一、高田昌樹、「シアノ錯体における脱水による電子密度レベルでの構造変化」ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
13. 福山祥光、安田伸広、中川剛志、大沢仁志、金 廷恩、加藤健一、木村滋、田中義人、鳥海幸四郎、守友浩、高田昌樹、「SPring-8(BL40XU)の時間分解 X 線回折装置の現状とシアノ錯体への応用」ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
14. 上岡隼人、中田文也、五十嵐一泰、守友 浩、「価数制御された Co-Fe シアノ錯体膜のフェムト秒分光」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
15. 中田文也、守友浩、「プルシアンブルー型シアノ錯体の価数制御分光」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
16. 金廷恩、加藤健一、高田昌樹、柴田恭幸、守友浩、「結晶水制御したシアノ錯体の電子密度レベルでの構造変化」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
17. 五十嵐一泰、松田智行、金廷恩、守友浩、「Co-Fe シアノ錯体の構造のカチオン濃度依存性」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30

18. 柴田恭幸, 五十嵐一泰, 守友浩、「プルシアンブルー界面を利用した電圧誘起磁性制御」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
19. 松田智行, 金延恩, 大山研司, 守友浩、「プルシアンブルー格子の熱応答のスケール則」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
20. 木村滋, 安田伸広, 福山祥光, 金延恩, 村山美乃, 鳥海幸四郎, 田中義人, 守友浩, 黒岩芳弘, 加藤健一, 田中均, 高田昌樹、「反応現象の X 線ピンポイント構造計測 I—粉末 1 粒からの結晶構造解析—」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
21. 田中義人, 福山祥光, 安田伸広, 金延恩, 村山美乃, 小原真司, 大沢仁志, 中川剛志, 木村滋, 加藤健一, 上岡隼人, 守友浩, 松永利之, 児島理恵, 山田昇, 鳥海幸四郎, 大島隆, 田中均, 高田昌樹、「反応現象の X 線ピンポイント構造計測 II—DVD 材料の高速相変化の観測—」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
22. 柴田恭幸, 中田文也, 上岡隼人, 守友浩、「価数制御された Ni-Fe シアノ錯体薄膜の電子構造」、日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
23. 上岡隼人, 中田文也, 守友浩, 高坂亘, 大越慎一、「M-Fe シアノ錯体(M=Mn, Fe, Co)における過渡吸収スペクトルの観測」日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
24. 石井賢司, 稲見俊哉, 大和田謙二, 葛下かおり, 水木純一郎, 村上洋一, 石原純夫, 遠藤康夫, 前川禎通, 廣田和馬, 守友浩、「 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ の共鳴非弾性 X 線散乱における偏光依存性」日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
25. 中田文也, 上岡隼人, 金延恩, 守友浩, 高田昌樹、「シアノ錯体のゲスト水濃度による物性制御」、日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
26. 金延恩, 守友浩, 中田文也, 加藤健一, 高田昌樹、「放射光粉末法によるシアノ錯体ナノ空間中の水位置の決定」、日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
27. 柴田恭幸, 五十嵐一泰, 守友浩、「プルシアンブルー界面を利用した電圧誘起磁性制御」、日本応用物理学会@つくば、2009/3/30-4/2
28. 梶原浩一, 三浦泰祐, 上岡隼人, 平野正浩, Linards Skuja, 細野秀雄、「アモルファス SiO_2 中の格子間酸素分子の発光における同位体効果」、日本応用物理学会@船橋、2008/3/27-30

ポスター発表(主要なもの)

1. H. Kamioka, F. Nakada, K. Igarashi, Y. Moritomo, "Transient photoinduced phenomena in valence-controlled Co-Fe cyanides", PIPT2008@Osaka, 2008/11/11-15.
2. 松田智行, 金延恩, 大山研司, 守友浩「プルシアンブルー型錯体の負の熱膨張係数」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
3. 松田智行, 劉曉俊, 所ひろ子, 大越慎一, 守友浩「プルシアンブルー型 Mn-Fe 錯体の圧力誘起八面体回転」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
4. 中田文也, 上岡隼人, 守友浩「価数制御された Co-Fe シアノ錯体の電子相図」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
5. 中田文也, 金延恩, 高田昌樹, 守友浩「プルシアンブルー型 Co-Fe 錯体のホストゲスト相互作用」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
6. 柴田恭幸, 守友浩「プルシアンブルー型錯体膜の電圧価数制御」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
7. 柴田恭幸, 中田文也, 上岡隼人, 守友浩「プルシアンブルー型 Ni-Fe 錯体膜の電子構造」、ナノ分子磁性体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29

8. 五十嵐一泰、中田文也、守友浩「 $\text{Na}_{1.6}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.9}2.9\text{H}_2\text{O}$ 膜の電子構造、ナノ分子磁体体の化学・物理・応用@筑波、2008/11/28-29
9. 上岡隼人、中田文也、五十嵐一、守友 浩「Time-resolved spectroscopy of Fe-Co cyanide films」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
10. 中田文也、金延恩、高田昌樹、守友 浩「Control of the spin state transition by guest water in Prussian-blue type Co-Fe cyanide」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
11. 中田文也、守友 浩「Valence-differential spectroscopy of Co-Fe Prussian blue analogues」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
12. 五十嵐一泰、中田文也、上岡隼人、守友 浩「Variation in the electronic structure of hole-doped Co-Fe cyanides」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
13. 柴田恭幸、守友浩 「Prussian Blue Junction and Electric Pressure-Induced Ferromagnetism」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
14. 柴田恭幸、中田文也、上岡隼人、守友浩 「Electronic and Magnetic Properties of Valence-Controlled Ni-Fe Cyanide」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
15. 松田智行、劉曉俊、所ひろ子、大越慎一、守友浩「Observation of Octahedral Rotation under Pressure in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
16. 松田智行、金延恩 1、大山健司 2、守友浩、「Negative Thermal Expansion in Metal Hexacyanoferrates」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
17. 栗原祐太郎、中田文也、守友浩、「Valence-differential spectroscopy of Fe-Fe cyanide」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
18. X.W. Wu, D.J. Wu, X.J. Liu「Optical investigation on sulfur doping effects in titanium dioxide nanoparticles」先端光計測と光応答材料、2009/3/13-14
19. H. Kamioka, F. Nakda, K. Igarashi, Y. Moritomo「Time-resolved spectroscopy of Fe-Co cyanide films」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
20. F. Nakada, J. E. Kim, M. Takata, Y. Moritomo「Control of the spin state transition by guest water in Prussian-blue type Co-Fe cyanide」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
21. F. Nakada, Y. Moritomo「Valence-differential spectroscopy of Co-Fe Prussian blue analogues」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
22. K. Igarashi, F. Nakada, H. Kamioka, Y. Moritomo「Variation in the electronic structure of hole-doped Co-Fe cyanides」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
23. T. Shibata, Y. Moritomo 「Prussian Blue Junction and Electric Pressure-Induced Ferromagnetism」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
24. T. Shibata, F. Nakada, H. Kamioka, Y. Moritomo 「Electronic and Magnetic Properties of Valence-Controlled Ni-Fe Cyanide」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
25. T. Matsuda, X. J. Liu, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Y. Moritomo「Observation of Octahedral Rotation under Pressure in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
26. T. Matuda, J. E. Kim, K. Ooyama, Y. Moritomo 「Negative Thermal Expansion in Metal Hexacyanoferrates」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
27. Y. Kurihara, F. Nakda, Y. Moritomo「Valence-differential spectroscopy of Fe-Fe cyanide」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
28. X.W. Wu, D.J. Wu, X.J. Liu「Optical investigation on sulfur doping effects in titanium dioxide nanoparticles」 ISIM2009@Tsukuba, 2009/3/9-10
29. H. Kamioka, Y. Moritomo, W. Kasaka, S. Ohkoshi, "Time-resolved spectroscopy of Fe-Co nano particle", ICR0M2008, @Tokyo, 2008/4/3-4

30. F. Nakada, H. Kamioka, J. E. Kim, Y. Moritomo, Electronic phase diagram of valence-controlled Co-Fe cyanide, ICROM2008, @Tokyo, 2008/4/3-4
31. 中川剛志, 福山祥光, 安田伸広, 大澤仁志, 金廷恩, 加藤健一, 中田文也, 上岡隼人, 田中義人, 木村滋, 田中均, 高田昌樹, 大越慎一, 守友浩・「Structural dynamics of Co-Fe cyanide film as investigated by Synchrotron-radiation X-ray pulse」、日本物理学会年次大会@東京、2009/3/27-30
32. 五十嵐一泰, 中田文也, 守友浩、「欠損の少ないCo-Feシアノ錯体の価数制御」、日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
33. 上岡隼人, 中田文也, 守友浩、「価数制御された Co-Fe シアノ錯体膜における過渡吸収スペクトルの観測」、日本物理学会分科会@盛岡、2008/9/20-23
34. H. Kamioka Y. Moritomo, W. Kosaka , S. Ohkoshi, "Charge transfer processes in cyano-bridged transition metals., The 8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, EXCON'08@Kyoto, 2008/6/22-27

<受賞>

1. 柴田恭幸: 第2回 ISIMS ポスター賞
2. 中田文也: 第5回数理工物質科学研究科長賞
3. Y. Moritomo: Outstanding Referee for the Journal of the American Physical Society

<特許>

1. 守友 浩、上岡隼人、「シアノ架橋金属錯体の微細加工方法およびシアノ架橋金属錯体の微細加工装置」、特願 2008-280711、高輝度光科学研究センター、2008/10/31
2. 守友 浩、柴田恭幸、「電圧駆動素子、電池、表示装置、磁性制御装置および反転対称性制御装置」、特願 2008-284295、筑波大学、2008/11/5
3. 守友 浩、上岡隼人、「ポンプ・プローブ型の測定装置」、特願 2009-052199、筑波大学、2009/3/5

<その他>

1. 守友 浩、第53回物性若手夏の学校講師「構造解析の基礎と実際、そして、構造物性の最前線」那須、2008/8/7-11

VIII-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
講師	神田晶申
助教	森下將史
研究員	後藤秀徳
大学院生	山岸徹 (数理物質研究科2年)、乾由美子、田中翔、初見慎也 (同1年)

低温物性実験グループでは、単原子接合や単分子接合の電気伝導、グラファイト超薄膜の電気伝導、サイズがコヒーレンス長以下の微小超伝導体における超伝導渦糸系、微小ジョセフソン接合など様々なナノスケピック構造の電子輸送現象の研究および吸着³He薄膜の核磁性の研究を行っている。

大塚および神田は学際物質科学研究センター量子制御コアの担当であり、2006年度から大阪大学および東京理科大学との三大学連携融合事業「アトミックテクノロジー創出事業」のメンバーとして、国際会議 ISAT-3 (東京国際交流館) や3大学連携学生研究会 (長万部) の開催に係わった。また、同事業の中間評価を受けるとともに、その成果に基づく新たな展開への準備を開始した。平成19年度にスタートした筑波大学プレ戦略イニシアティブ「学際物質科学研究拠点」(代表:大塚) は、20年度7月から戦略イニシアティブ(A)となり、国際シンポジウム (ISIMS-2009)の開催の他、研究会「スピントロニクスをめぐるあたらしい物理現象と魅力的な素材」他の研究会の開催などにあたった。

【1】MBJ法による単分子伝導の研究 (乾、浦野、大塚)

(1) 超伝導 MBJ による伝導チャネル解析

昨年度までにニオブ及び鉛を電極とした水素分子架橋系の電気伝導特性を調べてきた。その結果を低温物理学国際会議他で発表した。多重アンドレーエフ反射に基づくチャネル解析のベンゼン分子架橋系へ適用すべく実験を開始した。

(2) グラファイトナノコンタクトの電気伝導

多様な機能設計が可能な有機分子の単分子接合系は分子デバイスの観点で多くの興味を持たれている。しかし、これまでに行われた実験では、共役分子系についても伝導度が著しく低く、応用の観点からは大きな問題となる。この抵抗の原因は電極金属とのリンク部にあると考えられ、分子のみならず電極材料の選定が必要となる。我々は通常電極に使用される金や白金の代わりに炭素同位体であるグラファイトを電極に使用できないかと考え、その予備実験を行ない以下の知見を得た。(1)電極間隔の変化に伴うコンダクタンスの変化は金属のナノコンタクトに比べ桁違いに少ない。ただし、グラファイトの層間を剥離する方向に破断するほうが層に垂直に破断する場合より変化は大きい。

(2)IV特性には非直線性が見られ、微分コンダクタンスはほぼバイアス電圧に比例して増加する。また、高抵抗接合ではゼロバイアス付近で大きなコンダクタンスの急激な減少がみられる。

【2】単層・多層グラフェンの電気伝導 (田中、長井、後藤、神田)

(1) グラフェンの移動度とバンドギャップエンジニアリング

高速応答を目指した薄膜トランジスタ材料として単層・多層グラフェンの電気伝導を調べた。単層・多層グラフェンは、移動度の高さ、素子作製の自由度の高さにより新たな2次元電子材料としての可能性を持つことに注目し、グラフェンのデバイスプロセスと基礎伝導特性を検討した。特に、グラフェンに高効率トッパゲート、バックゲートのデュアルゲートを取り付ける方法を確立し、2層グラフェンにおいて理論的に予測されてきた電界誘起バンドギャップの観測に初めて成功した。観測されたギャップ値は最大0.5eVに達し、他グループの報告値(0.01eV)よりもはるかに大きい。また移動度が小さな試料ではバンドギャップも小さくなることを見出した。これは、膜内の乱れによってギャップ内伝導が生

じていることに起因すると考えられる。さらに、グラフェンデバイスにおいて移動度を低減させる要因を検討した。多数の単層・多層グラフェンの低温移動度を比較した結果、垂直電界侵入長 λ （4層程度）と同程度以下の厚さをもつ膜の移動度がほとんど温度依存しないのに対し、 λ より十分厚い膜の移動度が低温で上昇した。このことは、膜上面にある吸着分子・レジストなどの汚れとリップルが移動度を低減させる主要因であることを示す。すなわち、グラフェン上に付着した汚れや吸着分子を除去することが、基板を改良・除去することよりも、移動度の向上には効果的である。

(2) グラフェンにおけるスピン伝導

多層グラフェンにおけるスピン伝導を検討した。 λ と同程度の厚さをもつグラフェンの強磁性体接合の非局所スピン信号の解析から、多層グラフェンのスピン緩和長が単層グラフェンよりも極めて長いことを明らかにした。これは上記の移動度の膜厚依存とも関連し、多層膜では電子散乱の要因が減少していることに起因すると考えられる。さらに、 λ よりも厚い膜では、スピンバルブ効果がゲート電圧によって変調できることを示し、その原因が、コンタクト抵抗のゲート変調に起因する可能性があることを指摘した。グラフェンではRashbaスピン軌道相互作用が極めて小さいので、コンタクト抵抗のゲート変調がスピン依存伝導制御に有効な唯一の方法となる可能性がある。

(3) グラフェンにおける超伝導近接効果

グラフェンの超伝導接合において、近接効果による超伝導電流をゲート電圧によって変調させることに成功した。単層グラフェンの場合には超伝導電流の温度依存性は従来のshort, dirtyな接合に適用されるKulik-Omelyanchuk理論でよく説明できることを見出した。一方で、多層グラフェン（5層以上）においては、超伝導電流は $\exp(-T/T_0)^2$ に比例して温度低下とともに急激に増加するが、これは従来のSNS接合の振る舞いとは大きく異なる。理論家と検討を行い、多層グラフェンの超伝導電流は、膜に垂直な方向の電界遮蔽によって各膜が順次超伝導転移を起こすとするモデルでうまく記述できることを明らかにした。

(4) グラフェンへの化学修飾による新規機能性物質の創生

グラファイト超薄膜に各種原子分子のインターカレーションや表面吸着を施すことによって新機能性を発現させ、それをゲート電圧によって制御することを最終目標とし、予備実験を行った。インターカレーション（表面吸着）させる物質として、アルカリ金属であるカリウムを選定した。カリウムは、バルクのグラファイトにインターカレート（C 8 K）すると極低温で超伝導となり劇的な物性変化をもたらすことが知られている。グラファイトを原子レベルまで薄くしたグラフェンでは、低次元化とゲート電界印加により、C 8 Kからの物性変調が期待される。特に、超伝導転移温度の上昇やゲート変調が観測されると興味深い。一方で、単体カリウムやC 8 Kは空气中で不安定であるために、電気伝導測定用グラフェン試料の作製プロセス、測定プロセスをカリウム試料に最適化する必要がある。本研究では、以下に示す手順によって、試料作製・極低温測定を行う方法を確立した。①配線済みグラフェン試料上面にカリウムを蒸着、②不活性ガスで満たしたグローブボックスに試料を搬送し、必要に応じてチューブ炉でアニール③試料を不活性ガスでシール、④試料を低温冷却装置まで搬送、⑤低温冷却装置を真空にし、冷却・測定を実行。4 Kまでの測定で、カリウム蒸着によって移動度が減少すること、電荷中性点（キャリア密度が最小になるゲート電圧値）がマイナスに移動することが観測された。これらのことは、カリウムによって電子がドープされるとともに、荷電不純物が増えることで散乱、電荷中性点での状態密度が増えたことに起因すると考えられる。今後、希釈冷凍機を用いて極低温測定を行うとともに、試料作製プロセスの更なる改良を行う予定である。

本研究は、塚越一仁、宮崎久生（産総研）、小高隼介、青柳克信（東工大）、林正彦（秋田大）、吉岡英生（奈良女子大）各氏との共同研究である。

【 3 】メゾスコピック超伝導体における渦糸量子状態の制御（初見、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、磁場を印加

すると、バルクとは異なる特殊な超伝導状態が出現する。我々は、Multiple-small-tunnel-junction (MSTJ) 法と呼ぶ独自の方法を使って、新奇渦糸状態の実験的検証を行っている。MSTJ法では、メゾスコピック超伝導体の複数箇所 SIN トンネル接合を取り付け、その箇所のトンネル分光から超伝導電流密度の空間分布に関する情報を得る。得られる情報は部分的なものであるが、試料形状の対称性を考慮することによって、渦糸状態を予測することが出来る。また、実験結果を、理論計算結果と比較することで、実験結果の正当性を評価できる。前年度までに、巨大渦糸状態、多重渦糸状態—巨大渦糸状態間の転移（2次転移）、非対称リングにおける1次元渦糸の存在を実験的に明らかにしてきた。今年度は、新規渦糸状態を磁場以外の外部パラメタによって制御することを目的として実験を行った。

正方形の超伝導体にリード線を取り付け、超伝導電流印加によって渦糸状態を制御することを試みた。渦糸状態はMSTJ法によって検出する。試料を図1に示す。希釈冷凍機を用いた測定の結果、渦糸の侵入・排出磁場は印加する超伝導電流に複雑に依存することがわかった。その温度依存の詳細な解析と我々の以前の実験結果との比較から、電流印加による巨大渦糸—多重渦糸状態間転移が起こっていることを示した。また、多重渦糸状態に電流を流し込むことで、本来縮退している状態間の縮退を解き、かつ、電流値によって基底状態を入れ替えることができることを明らかにした(図2)。さらに、電流印加によって、渦糸の排出、導入を誘起できることも示した。これらの実験結果は、時間依存ギンツブルグーランダウ理論に基づく数値計算で再現することができる。

本研究は、M.V. Milošević, F.M. Peeters (アントワープ大学 (ベルギー))、林正彦 (秋田大) 各氏との共同研究である。

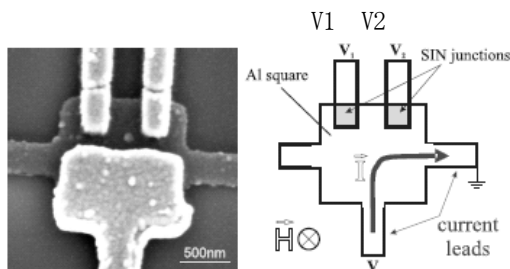


図1: メゾスコピック超伝導正方形試料のSEM写真と概略図

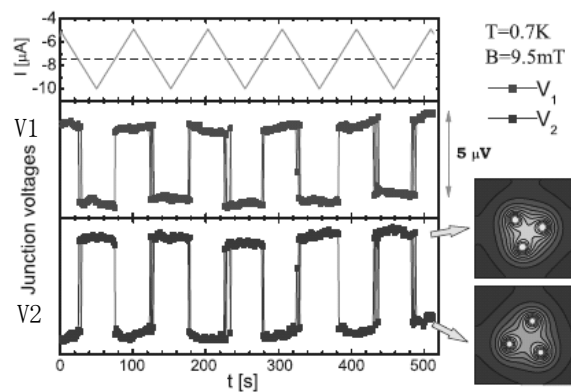


図2: 電流印加による多重渦糸状態間転移を示す実験データ。上図は印加電流、中、下図はMSTJ測定電圧を表す。

【4】トンネル接合型マイクロ SQUID の開発 (山岸、中嶋、大塚)

高抵抗の微小トンネル接合を用いた小型 SQUID の開発を進めた。前年度までに $2\mu\text{m}$ 四方のリングをもつマイクロ SQUID の基礎特性を明らかにし、今年度はやや大きなリングをもつ素子の特性を調べた後、これを微小な磁性体の磁化測定に応用した。

SQUID 素子は電子線リソグラフィと Al の斜め蒸着法によって作製した。リングの有効面積は $4, 204, 404 (\mu\text{m})^2$ の3種、接合面積は約 $0.01 (\mu\text{m})^2$ 、接合抵抗は $10\sim 280 \text{ k}\Omega$ であった。希釈冷凍温度域での測定の結果、いずれの素子も電圧ゼロの超伝導分枝はなく低電流領域でも有限の抵抗を有し、その抵抗値は垂直磁場に対して周期的に変化した。そこで、常磁性塩であるクロムカリヨウバン(CPA)の微結晶(質量約 $0.3\mu\text{g}$)を小型 SQUID の近傍に置き、磁場を SQUID 面にほぼ水平な方向で掃引した。試料の誘導磁化によって生じる垂直磁場のために SQUID 素子の抵抗は周期的に変動し、これを解析することによって試料の磁化を求めることができる。実験の結果、 100mK 以上の温度領域では $J=3/2$ のブリルアン関数

とほぼ一致する等温磁化曲線と Curie-Weiss 型磁化率を得るとともに、約 70mK 以下では反強磁性転移に伴う磁化曲線及び帯磁率の構造が見られた。このように今回作製した小型 SQUID は $0.1 \mu\text{g}$ オーダーの微小磁性体の帯磁率および磁化過程の測定に十分利用できることが示された。また、測定時の熱発生はブリッジ型マイクロ SQUID よりけた違いに少なく、試料への熱的影響を与えずに測定できるという利点を有する。また、超伝導転移温度の高い Nb を利用した小型 SQUID 作製のために、超高真空 Nb 蒸着装置を立ち上げた。

【 5 】 導電性高分子の低温電気伝導 (庄司、大塚)

ポリアセチレンを代表とする導電性高分子の電気伝導度は化学ドーピングによって 7 桁以上も増加する。しかし、そのような試料の伝導率も温度の低下と共に減少し、電気抵抗は絶対零度に向けて発散する。この意味で真に金属的な電気伝導は得られていなかった。しかし、最近ようやく残留抵抗比が 1 以上の高分子系の実現が報告されるに至った。導電性高分子は有機デバイスへの応用の他、Little による高温超伝導体の分子設計など基礎物理の対象としても興味深い系である。我々は高分子の伝導、特に極低温における伝導特性の解明を目的として研究をスタートした。本年度は第 1 歩として、ポリチオフェン、ポリフェニレン、ポリフルオレンを用いて薄膜試料の作製、ドーピング、FET 特性の評価などの基礎的な実験を行った。なお、本研究では学際物質科学研究センター神原貴樹教授の協力をいただいた。

【 6 】 ヘリウム3単原子層膜を用いた強フラストレーション量子スピン系の研究 (森下)

フラストレートした量子スピン系においては、基底状態として一つの状態が定まらず、スピン液体などが期待される。グラファイトは原子レベルで平坦な表面をもち、ここに吸着したヘリウム3 (^3He) 薄膜もよく定義された層構造をもつ。 ^3He 原子は核スピン $1/2$ をもつため、 ^3He 単原子層固相薄膜は 2 次元量子スピン系のモデル物質を与える。この系の磁性は、複数の ^3He 原子が位置を交換して生ずる交換相互作用に由来するが、原子間の強いハードコア斥力のために、3 体以上の原子が循環的に交換して生ずる多体交換 (リング交換) 相互作用が重要となる。ここで、偶数個の原子の交換は反強磁性相互作用を、奇数個の交換は強磁性相互作用を生む。これらの優劣は面密度に強く依存し、この系の磁性は反強磁性から強磁性まで変化する。この系の特徴は、このリング交換の競合により新たなフラストレーションが生まれ、フラストレーションが非常に強くなっていることにある。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共同利用設備を用いて行われている。

(1) ^3He 固相薄膜熱容量の異常な磁場依存性

^3He 固相薄膜の熱容量が弱い磁場で異常な変化を示すことについて、引き続き調査を行っている。磁場は吸着基盤であるグラファイトの表面に平行にかけている。最大磁場は 600 Oe で、 $47 \mu\text{K}$ の Zeeman エネルギーに相当し、第 2 原子層においては、交換相互作用に比べ一桁以上小さい。

吸着第 2 原子層での測定において吸着第 2 層固相スピン系以外からの余計な寄与 (以下「余剰熱容量」と呼ぶ) が詳細な議論の妨げとなっていた。流体相試料の測定から余剰熱容量の温度・磁場依存性の詳細を抽出し、これが、i) 吸着第 1 層固相スピン系、ii) 基盤吸着ポテンシャルの周期性の乱れのために生じたアモルファス状 ^3He 、iii) サンプルセル等に用いている銀の核スピン系、からの寄与の合計として非常に良く説明できることを示した。これにより、この余剰熱容量を差し引いて吸着第 2 原子層からの寄与のみを取り出し精密な議論をすることが可能となった。

磁性が反強磁性から強磁性に移行し強磁性が成長していく面密度 23 nm^{-2} における熱容量は、ほとんど磁場依存性を示さず、余剰熱容量の差し引きが正しく行われていることを示唆する。一方、より高面密度の 26 nm^{-2} 、 35 nm^{-2} と強磁性を示す領域では、高温域、低温域の振る舞いに大きな磁場変化はないが、ピークを与える温度やピークの高さが磁場に依存している。 26 nm^{-2} では磁場の増大に対し、一旦、ピークが小さくなった後、低温にシフトしながら増大する。 35 nm^{-2} では 300 Oe の磁場でピークの高さが半分程度に減少する。これらの結果は、磁場中でエントロピー変化が減少することを意味する。実際、測定温度領域でのエントロピー変

化は、300 Oe の磁場中ではゼロ磁場中に比べ 20%程度減少している。強磁性でありながら、磁場が短距離秩序の成長を阻害する異常な結果になっている。従来、これらの面密度では、強磁性相互作用を与える3体交換が主となり、基底状態は全てのスピンの整列した単純な強磁性状態と考えられてきたが、リング交換の競合はまだ生き残り、より複雑なスピン構造をとっている可能性が考えられる。さらに、面密度 18 nm^{-2} の“4/7相”と呼ばれる整合固相では、上記のいずれとも異なる磁場変化が観測される。この面密度では磁性は反強磁性的で幾何学的フラストレーションが生じる上、リング交換の競合に由来するフラストレーションもひととき強いと考えられている。強いフラストレーションを反映して、ゼロ磁場で熱容量はブロードなダブルピーク構造を示すが、磁場の増大とともに低温ピークがその高さを増大させながら高温へとシフトしていき、最終的には高温ピークとマージしてシングルピークに近い振る舞いへと移行する。このとき、強磁性相とは逆に磁場がスピン短距離秩序の成長を促進させている。反強磁性相であることを考慮すると異常な結果と言える。磁場によりフラストレーションが弱められている可能性が指摘できる。もう一つ重要なのは、600 Oe の磁場中で観測されたスピンエントロピー変化が、ゼロ磁場で低温域を T -linear な温度依存性と仮定した際のエントロピー変化を遥かに越える点である。様々な不確定性から全エントロピー変化を観測しているのか否かを結論することは難しいが、この結果は少なくともゼロ磁場ではまだ低温に大きなスピン自由度が残っていることを意味し、従来考えられていたよりもさらにフラストレーションが強いことを示している。

(2) グラファイト上吸着 ^3He 固相薄膜の熱緩和とスピン相関

グラファイト上吸着 ^3He 固相薄膜は 0.1 mK 以下の低温までグラファイト基盤に追従して冷却されるが、その熱伝導機構は明らかになっていない。これは、グラファイト基盤と ^3He 固相薄膜との間に直接熱をやりとりする機構が無いためである。本研究では、この機構を明らかにするとともに、スピン系に関する情報を得ることを目的として、緩和法を用いてグラファイト基盤 - ^3He 固相薄膜間の熱伝導を測定している。これまでの測定によると、熱は ^3He 薄膜面内をフォノンやスピン素励起といった準粒子により巨視的な距離にわたり流れ、局所的にグラファイト基盤へと流れ込んでいる。

基盤へと熱が流れ込む局所スポットは、グラファイト中に含まれる磁性・非磁性の不純物が関与しているものと考えられる。灰分分析から不純物の元素組成は明らかになっているが、その形状や化学組成などは明らかになっていない。観測された熱伝導と灰分分析の結果から不純物は大きさ数百 nm 以上の大きなクラスターを形成していると推測されるが、にわかには信じがたい大きさである。そこで、走査型電子顕微鏡(SEM)による劈開表面の観察を行ったところ、直径数百 nm から 10 μm の広い分布をもった不純物クラスターが 0.1 mm 程度の間隔で不規則に分布していることが観測された。エネルギー分散型 X 線分光(EDS)により不純物クラスターの組成分析を行うと、Al, Ca, Si, Fe などが多量に検出され、灰分分析の結果と一致している。約 1 mK 以下の低温域では、磁性をもった不純物クラスターが熱伝導に寄与していると考えられるため、グラファイト基盤の磁化測定も行った。グラファイト結晶子が磁場に対し若干傾いて分布することに由来する反磁性磁化と同時に強磁性磁化も観測された。グラファイトにおいては graphene や端状態に起因する強磁性の出現が期待されているが、今回観測された強磁性飽和磁化は、HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) で観測されているものにくらべ数倍大きい上、灰分分析から得られている磁性不純物の量とは矛盾せず、主に磁性不純物に由来していると考えられる。以上の結果は、提案されている熱緩和モデルと良く一致する。

さて、約 1 mK 以下の低温域では ^3He 薄膜面内をスピン素励起によって熱が運ばれていると考えられる。このとき、気体運動論から熱伝導 κ と熱容量 C の比 κ/C はスピン素励起の速さ v と平均自由行程 l に比例することが期待される ($\kappa/C \propto vl$)。ナイーブにはスピン素励起の平均自由行程を規定しているのはスピン相関長 ξ であるが、基盤グラファイトの結晶子の大きさ a_{gp} にも影響を受け、 $l^{-1} = \xi^{-1} + a_{\text{gp}}^{-1}$ の関係が成り立つことが期待される。測定された熱伝導・熱容量から、以上の関係を用いてスピン相関長を求めると図3のようになる。ここでは、 a_{gp} の値を 10 nm とし、 ^3He 薄膜の格子定数でスケールし、幾つかの面密度における 300 Oe の磁場中での変化を示している。面密度の増大に伴い温度依存性が強くなっていることが見てとれる。図には示さないが、面密度 26 nm^{-2} の強磁性相では磁場依存性はほとんど無いのに対し、面密度を減らすと顕著な磁場依存性が現れ、磁場とともにスピン相関長が増大する。この結果は、 18 nm^{-2} の試料でスピンエントロピーが磁

場とともに減少し、スピン短距離秩序が成長することと付合する。三角格子上スピン系について、4体以上のリング交換を考慮しない Heisenberg 系での理論計算ではあるが、その結果を図中に実線で示す。黒実線は強磁性、灰色実線は反強磁性の場合の計算結果である。観測結果はこれらに比べ非常に緩やかである。35 nm⁻²の強磁性相での温度依存性は理論と実験は似てはいるものの絶対値は全く合っていない。これらの相違はリング交換に由来するフラストレーションが非常に強いためにスピン相関の成長が抑えられており、面密度が大きいほどフラストレーションが弱いことを示唆している。一方、理論は反強磁性相の方が強磁性相に比べ相関長は著しく短いことを予測しているが、観測結果はこの予測とも一致しない。これもリング交換を考慮していないことに原因があるかも知れない。

最後に、十分な低温では平均自由行程が a_{sp} に等しくなるため、絶対零度に外挿した κ/C はスピン素励起の速さに比例することが期待される。絶対零度に外挿した κ/C は交換相互作用の強さに対応しており、相互作用が強いほど伝搬速度が増大するとのナイーブな予測と一致している。

以上は、³He 薄膜2次元スピン系を探る上で有用なツールを新たに手に入れたことを意味する。

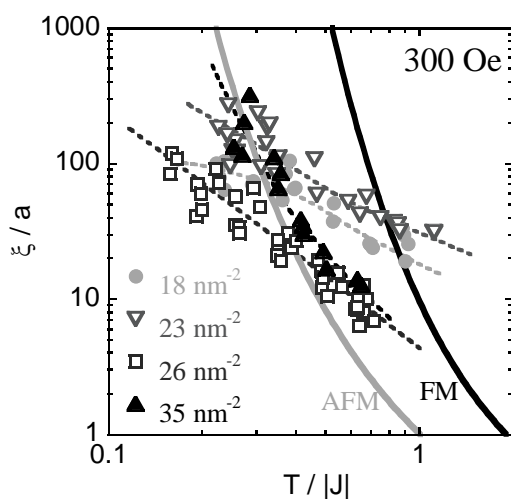


図3. 300 Oe の磁場中での熱伝導測定から得られた、幾つかの面密度におけるスピン相関長の温度変化。相関長は³He 薄膜の格子定数で、温度は交換相互作用の強さでスケールして示している。破線はガイドライン。2本の実線は、それぞれ強磁性(FM)、反強磁性(AFM) Heisenberg 系における理論計算の結果を示す。

<学位論文>

- ・ 山岸徹：トンネル接合型小型 SQUID 磁力計の開発（数理工学物質科学研究科、物理学専攻、修士論文、2009年3月）
- ・ 浦野敬太： グラファイトナノコンタクトの伝導測定（自然科学類、卒業論文、2009年）
- ・ 庄司 裕： 導電性高分子の低温電気伝導測定（自然科学類、卒業論文、2009年）
- ・ 長井超星： グラフェンへのアルカリ金属吸着と電気伝導測定（自然科学類、卒業論文、2009年）
- ・ 中嶋祐奈： Nb マイクロ SQUID の作製（自然科学類、卒業論文、2009年）

<論文>

1. H. Goto, A. Kanda, T. Sato, S. Tanaka, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi: Gate control of spin transport in multilayer graphene, Appl. Phys. Lett. 92, 212110 (2008).
2. 神田晶申： グラフェン，電気情報通信学会ハンドブック「知識ベース」、S2 群2 編ナノエレクトロニクス
3. 神田晶申： グラフェンをめぐる展開、パリティ、2009年1月号（第24巻第1号）、pp. 33-36
4. T. Sato, S. Tanaka, H. Goto, A. Kanda, Y. Ootuka, H. Miyazaki, S. Odaka, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi: Observation of gate-controlled superconducting proximity effect in microfabricated thin graphite films, Journal of Physics Conference Series, 109, 012301 (2008).

5. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda: Superconducting proximity effect through graphene and graphite films, *Journal of Physics Conference Series*, 109, 012014 (2008).
6. 神田晶申、塚越一仁: グラファイト超薄膜の超伝導近接効果、*表面科学*, Vol. 29, No. 5, 315-320 (2008).
7. T. Sato, A. Kanda, T. Moriki, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, H. Miyazaki, S. Odaka, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi: A different type of reentrant behavior in superconductor/thin graphite film/superconductor Josephson junctions, *Physica C* 468, 797-800 (2008).
8. S. Odaka, H. Miyazaki, T. Moriki, T. Sato, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, Y. Aoyagi: Coulomb Blockade Oscillations in Patterned Ultrathin Graphite Films, *Jap. J. Appl. Phys.* 47(1), 697-699 (2008).
9. H. Miyazaki, S. Odaka, T. Sato, S. Tanaka, H. Goto, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, Y. Aoyagi: Inter-Layer Screening Length to Electric Field in Thin Graphite Film, *Applied Physics Express* 1, 034007 (2008).
10. H. Miyazaki, S. Odaka, T. Sato, S. Tanaka, H. Goto, A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, Y. Aoyagi: Coulomb Blockade Oscillations in Narrow Corrugated Graphite Ribbons, *Applied Physics Express* 1, 024001 (2008).
11. T. Sato, T. Moriki, S. Tanaka, A. Kanda, H. Miyazaki, S. Odaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi: Gate-controlled superconducting proximity effect in ultrathin graphite films, *Physica E* 40, 1495-1497 (2008).
12. A. Kanda, S. Hatsumi, R. Furugen, Y. Ootuka: Detecting superconducting states in nanoscale superconductors using multiple-small-tunnel-junction method, *Journal of Physics Conference Series*, 109, 012016 (2008).
13. R. Furugen, S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda: Vortex states in mesoscopic superconducting squares with engineered pinning, *Journal of Physics Conference Series*, 109, 012010 (2008).
14. J. Berger, A. Kanda, R. Furugen, Y. Ootuka: Location of flux-induced vortex, *Physica C* 468, 848-851 (2008).
15. R. Furugen, S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda: Stability of vortex states in mesoscopic superconducting squares with artificial pinning, *Physica C* 468, 1301-1304 (2008).
16. S. Hatsumi, A. Kanda, R. Furugen, Y. Ootuka, M. Hayashi: Experimental determination of vortex configuration in a mesoscopic superconducting square with artificial pinning centers, *Journal of Physics, Conference Series*, 150 022024 (2009).
17. Y. Ootuka, T. Yamagishi, K. Suzuki, Y. Miyagawa, T. Maekawa and A. Kanda, A micro SQUID using ultra-small tunnel junctions, *J. Phys. : Conf. Ser.* 150 Volume 150 (2009) 012033.
18. Y. Sakaguchi, F. Shimogishi, M. Watanabe, Y. Inui, A. Kanda and Y. Ootuka, Conduction-channel analysis of hydrogen-molecule bridge between superconducting electrodes, *J. Phys. : Conf. Ser.* 150 Volume 150 (2009) 022069.
19. M. Morishita, Heat Capacity of Kagome ^3He Monolayer Film on Graphite, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 150, 032065 (2009).
20. M. Morishita, Heat Capacity of ^3He Solid Films on Graphite in Weak Magnetic Fields, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 150, 032066 (2009).
21. M. V. Milosevic, A. Kanda, S. Hatsumi, F. M. Peeters, Y. Ootuka: Local Current Injection into Mesoscopic Superconductors for the manipulation of quantum states, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
22. H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, A. Kanda, M. Otani, S. Okada: Shutting off the current in bilayer graphene, submitted to *Nat. Nanotechnol.*

<著書>

1. A. Kanda, Y. Ootuka, K. Kadowaki, F.M. Peeters: Novel Superconducting States in Nanoscale Superconductors, in "The Oxford Handbook of Nanoscience and Technology (volume I)", to be published from Oxford University Press (New York, Jul. 2009).
2. 神田晶申: 単層・多層グラフェンにおける超伝導近接効果、「グラフェンの機能と応用展望」第 7 章

(徳本洋志、斉木幸一郎監修、シーエムシー出版、印刷中)

<講演>

国際会議

1. H. Goto, A. Kanda, T. Sato, S. Tanaka, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Spin and Charge Transport in Multilayer Graphene, 25th International Conference on Low Temperature Physics, RAI Convention Center, Amsterdam, Netherland, 2008. 8. 6-13
2. A. Kanda, H. Goto, S. Tanaka, T. Sato, Y. Ootuka, H. Miyazaki, S. Okada, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Experimental Study of Cooper-Pair Transport in Multilayer Graphene, 25th International Conference on Low Temperature Physics, RAI Convention Center, Amsterdam, Netherland, 2008. 8. 6-13.
3. Y. Ootuka, T. Yamagishi, T. Maekawa, A. Kanda, A micro SQUID using ultra-small tunnel junctions, 25th International Conference on Low Temperature Physics, RAI Convention Center, Amsterdam, Netherland, 2008. 8. 6-13.
4. A. Kanda, S. Hatsumi, R. Furugen, Y. Ootuka, M. Hayashi, Experimental Determination of Vortex Positions in a Mesoscopic Superconducting Square with Artificial Pinning Centers, 25th International Conference on Low Temperature Physics, RAI Convention Center, Amsterdam, Netherland, 2008. 8. 6-13.
5. Y. Ootuka, Y. Sakaguchi, F. Shimogishi, Y. Inui, A. Kanda, Conduction-channel analysis of hydrogen-molecule bridge between superconducting electrodes, 25th International Conference on Low Temperature Physics, RAI Convention Center, Amsterdam, Netherland, 2008. 8. 6-13.
6. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda: Theory of superconducting proximity effect in graphene films, 25th International Conference on Low Temperature Physics, Amsterdam (Netherlands), 2008. 8. 6-13.
7. M. Morishita, Heat Capacity of ^3He Solid Films on Graphite in Weak Magnetic Fields, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, 2008. 8. 9.
8. M. Morishita, Heat Capacity of Kagome ^3He Monolayer Film on Graphite, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, 2008. 8. 9.
9. N. Kokubo, S. Okayasu, A. Kanda, B. Shinozaki: Scanning SQUID microscope study for vortices confined in small superconducting disks, 25th International Conference on Low Temperature Physics, Amsterdam (Netherlands), 2008. 8. 6-13.
10. A. Kanda, H. Goto, S. Tanaka, Y. Nagai, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Unconventional temperature dependence of proximity-induced supercurrent in multilayer graphene, ICTP Conference Graphene Week 2008, Trieste (Italy), 2008. 8. 25-29.
11. H. Goto, A. Kanda, S. Tanaka, Y. Nagai, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Long spin coherence length in multilayer graphene, ICTP Conference Graphene Week 2008, Trieste (Italy), 2008. 8. 25-29.
12. H. Goto, A. Kanda, T. Sato, S. Tanaka, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Coherent spin conduction in multilayer graphene, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, 2008. 9. 23-26.
13. S. Tanaka, H. Goto, Y. Nagai, A. Kanda, Y. Ootuka, H. Miyazaki, S. Odaka, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Temperature dependence of critical supercurrent in superconducting proximity effect of multilayer graphene, 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), Tsukuba, 2008. 10. 27-29.
14. A. Kanda, K. Tsukagoshi, H. Miyazaki, H. Goto, S. Odaka, S. Tanaka, Y. Nagai, Y. Ootuka, Y. Aoyagi: Electron transport in single and multilayer graphene (invited), 2008 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2008), Fukuoka, 2008. 10. 27-30.
15. S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda, Effect of current injection on vortex states in mesoscopic superconductors, 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), Tsukuba, 2008. 10. 27-29.
16. A. Kanda, K. Tsukagoshi, H. Miyazaki, H. Goto, S. Odaka, S. Tanaka, Y. Nagai, Y. Ootuka, Y.

- Aoyagi, Electron transport in single and multilayer graphene, 2008 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2008), Fukuoka, 2008. 10. 27-30.
17. A. Kanda: Mesoscopic Superconductivity (invited), 3rd International Autumn Seminar on Nanoscience and Engineering in Superconductivity for Young Scientists, Tsukiji (Tokyo), 2008. 11. 24-26.
 18. Akinobu Kanda, Hidenori Goto, Sho Tanaka, Yukitoshi Nagai, Youiti Ootuka, Hisao Miyazaki, Shunsuke Odaka, Yoshinobu Aoyagi, Kazuhito Tsukagoshi: Spin and charge transport in multilayer graphene (invited), 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop (AHNW), Hawaii, 2008. 12. 7-12.
 19. Akinobu Kanda, Hidenori Goto, Sho Tanaka, Yukitoshi Nagai, Youiti Ootuka, Hisao Miyazaki, Shunsuke Odaka, Yoshinobu Aoyagi, Kazuhito Tsukagoshi, Spin and charge transport in multilayer graphene, 13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop (AHNW), Hawaii, 2008. 12. 7-12.
 20. M. Morishita, "Heat Capacity of Two-Dimensional Quantum Spins in Helium-3 Solid Films n Graphite", International Workshop on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2009WS), Honolulu, 2009. 1. 13.
 21. H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, Y. Ootuka and S. Nomura, Optical mapping of the boundary of a two-dimensional electron gas by a near-field optical microscopy, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 -ISNTT2009-, Atsugi (Kanagawa), 2009. 1. 20-23.
 22. A. Kanda: Manipulation of vortex states in mesoscopic superconductors by supercurrent injection (invited), Workshop on Nanostructured Superconductors, University of Antwerp, Campus Drie Eiken, Antwerp (Belgium), Feb. 10, 2009.
 23. A. Kanda: Spin and Cooper-pair transport in multilayer graphene (invited), Okazaki Conference 2009, From Aromatic Molecules to Graphene: Chemistry, Physics and Device Applications, Okazaki, 2009. 2. 21-23.
 24. Yamagishi T, Nakashima Y and Ootuka Y, Magnetization curve measurement using a small SQUID, 3rd International Symposium on Atomic Technology/3rd Polyscale Technology Workshop (ISAT-3/ PTW-3), 東京国際交流館, 2009. 3. 5-6.
 25. Inui Y, Sakaguchi Y, Urano K, Shimogishi F, Watanabe M, and Ootuka Y, Electrical Transport through Hydrogen Molecular Bridges: Conduction Channel Analysis, 3rd International Symposium on Atomic Technology/3rd Polyscale Technology Workshop (ISAT-3/ PTW-3), 東京国際交流館, 2009. 3. 5-6.
 26. Toru Yamagishi, Yuna Nakashima, Youiti Ootuka, Magnetization Measurement of Small Specimen Using a Micro-SQUID at Very Low Temperature, Second International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2009), 筑波国際会議場, 2009. 3. 9-10.
 27. A. Kanda, H. Goto, S. Tanaka, Y. Nagai, Y. Ootuka, S. Odaka, H. Miyazaki, K Tsukagoshi, Proximity induced supercurrent in multilayer graphene, APS March Meeting, Pittsburg (USA), 2009. 3. 16.
 28. M. V. Milosevic, A. Kanda, S. Hatsumi, F.M. Peeters, Y. Ootuka, Current-driven quantum switch, 2009 APS March Meeting, Pittsburg (USA), 2009. 3. 20.

国内会議

1. 神田晶申: 超伝導-グラフェン-超伝導接合の実験的研究 (招待講演)、超伝導・グラフェン・強磁性等接合系に関する研究会、秋田、2008. 4. 16-17.
2. 坂口勇也、下岸史明、乾由美子、大塚洋一: 超伝導サブギャップスペクトロスコーピーによる水素分子接合系の伝導チャネル解析、ナノリンク分子の電気伝導第4回領域研究会、函館・花菱ホテル、2008. 7. 3-5.
3. 神田晶申: 多層グラフェンにおける超伝導近接効果 (招待講演)、研究会「不均一超伝導超流動状態と量子物理」、京都大学基礎物理学研究所、2008. 7. 31-8. 2.
4. 大塚洋一: ナノサイエンスと低温: e と h の物理、アトミックテクノロジー三大学学生研究会、東京理科大学長万部キャンパス、2008. 8. 21.

5. 初見慎也, 大塚洋一, 神田晶申: 2×2 の微細孔を持つメゾスコピック超伝導体における渦糸配置の MSTJ 法による検出, 日本物理学会, 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 21.
6. 山岸徹, 中嶋佑奈, 大塚洋一: トンネル接合型マイクロ SQUID の開発, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 21.
7. 宮崎久生, 小高隼介, 田中翔, 後藤秀徳, 神田晶申, 塚越一仁, 大塚洋一: 数層グラフェンの強電場下における電気伝導, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 22.
8. 田中翔, 後藤秀徳, 長井超星, 神田晶申, 大塚洋一, 宮崎久生, 小高隼介, 塚越一仁, 青柳克信: 多層グラフェンにおける電気伝導の層数効果, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 22.
9. 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 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 20-23.
10. 森下将史, 「グラファイト上吸着 3He 固相薄膜の磁場中熱容量 II」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008. 9. 22.
11. 大塚洋一: アトミックテクノロジー創出事業の成果: 概要説明, アトミックテクノロジー創出事業外部中間評価, 東京理科大学森戸会館, 2008. 9. 28.
12. 山岸徹, 中嶋佑奈, 大塚洋一: Continuous Measurement of Magnetization using mini-SQUID、学際物質科学研究会「ナノ分子磁性体の化学・物理・応用」、筑波大学, 2008. 11. 28.
13. 森下将史, “Heat Capacity of 3He Solid Films on Graphite in Weak Magnetic Fields”、科学研究費補助金特定領域研究「スーパーグリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成 20 年度研究成果報告会, 奈良県新公会堂, 2008. 12. 19.
14. 福山 寛, 森下将史, “Recent Progress of Experimental Studies on Two Dimensional Helium Three”、科学研究費補助金特定領域研究「スーパーグリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成 20 年度研究成果報告会, 奈良県新公会堂, 2008. 12. 20.
15. 森下将史, “Heat Capacity of Kagome 3He Monolayer Film on Graphite”、科学研究費補助金特定領域研究「スーパーグリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成 20 年度研究成果報告会, 奈良県新公会堂, 2008. 12. 20.
16. 神田晶申: 劈開法で得た単層・多層グラフェンの電気伝導特性 (招待講演)、(財) 新機能素子研究開発協会新技術探索会議分科会、東京、2008. 12. 25.
17. 神田晶申: グラフェンのスピンドバイス (招待講演)、日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会第 53 回研究会、京都、2009. 1. 8-9.
18. 神田晶申: 劈開法で得たグラフェンの電気伝導 (招待講演)、「第 1 回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究」研究会、福岡、2009. 1. 23.
19. 森下将史、「グラファイト上吸着ヘリウム 3 固相薄膜 2 次元量子スピン系の熱容量」、第 5 回フラストレーション東京セミナー、東京大学、2009. 1. 29.
20. 神田晶申: グラフェンの伝導機構 (招待講演)、科学技術未来戦略ワークショップ「次世代を拓くナノエレクトロニクス～2030 年の先を求めて～」、科学技術振興機構 研究開発戦略センター、2009. 3. 9.
21. 神田晶申: ナノ構造超伝導体への局所電流注入による磁束状態制御 (招待講演) 日本物理学会第 64 回年次大会シンポジウム「ナノ構造超伝導体における磁束物理」、立教大学、2009. 3. 26.
22. 初見慎也, 神田晶申, 大塚洋一, M.V. Milosevic, F.M. Peeters: 正方形メゾスコピック超伝導体における局所電流注入による渦糸状態操作、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009. 3. 28.
23. 伊藤宙陸, 柴田祐輔, 柏谷聡, 大塚洋一, 野村晋太郎、極低温近接場光学顕微鏡を用いた 2 次元電子系境界の光応答マッピング、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009. 3. 27.
24. 森下将史、「グラファイト上吸着ヘリウム 3 薄膜の磁気熱緩和」、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009. 3. 30.
25. 宮崎久生, Seungchol Choi, 小高隼介, 神田晶申, 塚越一仁, 青柳克信: 2 層グラフェンにおける電場誘起バンドギャップエンジニアリング、第 56 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、2009. 4. 1.
26. 小高隼介, 宮崎久生, 神田晶申, 森田康平, 田中 悟, 宮田耕充, 片浦弘道, 塚越一仁, 青柳克信: SiC 基板上成長の多層エピタキシャルグラフェントランジスタ、第 56 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、2009. 4. 1.

X 物理教育および物理教育の研究

【1】物理教育（中井直正）

物理学類が発足して2年目であり、3年生と4年生が自然学類物理学主専攻に所属し、1年生と2年生が物理学類に所属している。新学類の制度としては大きな混乱もなく、おおむね順調に経緯している。

教育の向上に関してはカリキュラム委員会を中心によく検討し、具体案を物理学類教員会議で諮って審議している。従来の知識の伝達だけではなく、独創的な研究や優れた仕事を行うには何が大切かを学び習得してもらえ教育を目指して「課題探求実習」を含む教育の大幅な改善を検討している。第一学群棟の耐震工事とそれに伴う設備更新によって、講義用教室は明るい環境と個別冷暖房、視聴覚機材の充実など大幅な環境改善が図られた。また物理学類として大学の経費補助のもと物理学実験の実験装置の充実や老朽化対策などの改善も図った。

大学入試は物理学類になって以降、主要入試である前期入試が順調に志願者を増やし、志願倍率も実質倍率も徐々に単調増加している。これは他の数学類、化学類、地球学類も共通であって、個別学類になったので高校生から内容が見えやすくなったことと全国的に受験生の理学系への回帰現象による。また本学類として入試そのものの改善として、高校教育において過度の暗記から解放し「なんでだろう、不思議だな」と高校生が思えるような環境を整備するため、入学試験において教科書の持込を可とする方向性を検討している。

【2】体験学習（初貝安弘）

高校生に大学における自然科学の教育研究の内容を知ってもらうために毎年実施している体験学習を本年度も8月7日(木)に実施した。旧自然学類の物理学類、数学類、化学類と一緒に体験学習を行った。全体的な紹介のあと各学類に分かれて、それぞれのプログラムで実施した。物理学類では、講義、物理学実験、在学生との懇談、センターの見学等を実施した。参加者数はアンケート回収数で27名と少なめであった。体験学習の具体的な内容とスケジュールは以下の通りである。

9:30～ 9:40	実行委員長（新井化学類長）挨拶及び事務連絡
9:50～10:10	物理学類説明、実験内容説明、アンケート(中井物理学類長)
10:20～11:00	【講義1】 量子論と凝縮系物理学（初貝安弘）
11:10～11:50	【講義2】 素粒子物理（石塚成人）
11:50～12:50	昼 食
12:50～13:00	実験の組み分け（初貝安弘）
13:00～15:30	【物理実験】
	① エレクトロニクス（東山和幸）
	② 放射線と宇宙線（小松原哲郎）
	③ 光の干渉（冨本慎一）
16:30～18:00	プラズマ研究センター・計算科学研究センター見学（希望者）

（ ）内は担当者であるが、その他にも多数の学生諸氏、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取りやすくし、その後の実験や在校生との懇談で受講生が相談しやすい雰囲気造りを心がけてもらった。

事後に行ったアンケート集計結果は総合評価が3点満点中2.81点であり、総じて好評であったと考えられる。

【3】カリキュラム関係（初貝安弘）

昨年度から行っている夏休みに導入した物理学 AI、BI の再履修クラスは本年も順調に行われた。また、総合科目「初めて学ぶ物理学 I, II, III」、「現代物理学への招待」も成功のうちに行われた。

物理学類の筑波スタンダードの中でも謳われている学生の能動的な学習を喚起するための授業の在り方について検討を進め、その一環として「課題探求型授業」を試行した。この授業は、教員が参考に与えた研究テーマについて、学生が主体となって研究し解決していく内容である。本年度は①「計算機を用いてヘリウム原子の束縛エネルギーを求める」(矢花・橋本) ②「粉流体のシミュレーションとその統計力学的解析」(有光) ③「おもちゃの物理、倒立振り子、電気回路のカオス、楽器の物理など」(新井・小沢)を行った。能動的授業の新しい取組みの一環として、本授業を位置づけ、今後、検討を

さらに進めて行く事とした。

社会において科学技術分野で活躍するのに必須の英語の強化の観点から、ネイティブによる授業をさらに推進すべく英語を母国語とする講師の授業を整備することとした。また、英語の基礎力を養うため e-learning の導入に向け作業を開始した。

学類、学系の FD 活動の一環として学生による授業アンケートの結果に基づき授業改善にむけての学生と意見交換を行った。

平成 21 年度教員免許更新講習に対する物理学類提供科目として 「現代物理学 I」を行うこととなった。素粒子物理と物性物理に関する講義の後、実習として KEK 見学をすることとなった。

《大学院資料》

大学院生・卒業研究生・学振特別研究員 員数表

平成20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	2	4	2	2	2	12	6		{ 1 }	[6]	18 { 1 } [6]
宇宙理論	3	4	1	4	2	14	5		{ 3 }	[2]	19 { 3 } [2]
原子核理論	3	1	2	1	0	7	1		{ }	[4]	8 { 0 } [4]
凝縮系理論	3	2	1	2	1	9	4	1	{ }	[7]	14 { 0 } [7]
計算物性物理 (創)	2	3	0	1	2	8	3		{ }	[2]	11 { 0 } [2]
計算生命理論	0	2	1	2	0	5	2		{ }	[3]	7 { 0 } [3]
素粒子実験	10	5	0	1	2	18	2		{ }	[16]	20 { 0 } [16]
宇宙観測	4	4	1	2	2	13	6		{ 1 }	[10]	19 { 1 } [10]
原子核高エネ	5	3	1	2	2	13	2		{ }	[5]	15 { 0 } [5]
原子核低エネ	3	0	1	1	2	7	3		{ }	[4]	10 { 0 } [4]
磁性物性	4	4	0	0	1	9	0		{ }	[3]	9 { 0 } [3]
半導体物性 (創)	6	6	0	1	3	16	7		{ 1 }	[10]	23 { 1 } [10]
強相関物性	2	2	0	0	0	4	0		{ }	[4]	4 { 0 } [4]
表面物性	0	0	0	0	0	0	0		{ }	[0]	0 { 0 } [0]
低温物性	3	1	0	0	0	4	4		{ }	[4]	8 { 0 } [4]
プラズマ	3	6	2	1	0	12	11		{ }	[6]	23 { 0 } [6]
合計	45	38	12	18	14	127	46	1	{ 5 }	[74]	174 { 5 } [74]
(創)	8	9	0	2	5	24	10		{ 1 }	[12]	34 { 1 } [12]

*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) 小口 悠 [谷口 伸彦]
Quantum transport properties through a quantum dot with two-fold orbital degeneracy and orbital asymmetry in electron-electron interactions
(二重軌道縮退量子ドット系の量子輸送特性と電子間相互作用の軌道非対称性)
- 2) 齋藤 卓 [石橋 延幸]
Study of Higher Spin Gauge Theory using Matrix Models
(行列模型を用いた高いスピンを持つ場の理論の研究)
- 3) 保田 誠司 [梅村 雅之]
Theoretical Study on Compound Chondrule Formation
(複合コンドリュール形成に関する理論的研究)
- 4) Rogel Mari Dionisio Sese [梅村 雅之]
The Study on Spectral Energy Distribution of Massive Circumstellar Disks Using Radiative Transfer Calculations
(輻射輸送計算を用いた大質量星周円盤のスペクトル・エネルギー分布の研究)
- 5) 中村 浩二 [金 信弘]
Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions
(重心系エネルギー1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク単一生成断面積の測定)
- 6) 木村 直樹 [受川 史彦]
Study of the Top Quark Production Mechanism in 1.96-TeV Proton-Antiproton Collisions
(重心系エネルギー1.96 TeV の陽子・反陽子衝突におけるトップ・クォーク生成機構の研究)
- 7) 萩原 健三郎 [中井 直正]
Development of a Wideband Software Spectrometer and a Study of the Ammonia Absorption Line of the Galaxy NGC 3079
(広帯域ソフトウェア分光計の開発と銀河NGC3079のアンモニア吸収線の研究)
- 8) 三木 健太郎 [三明 康郎]
Azimuthal Anisotropy Measurement of Neutral Pion and Direct Photon in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX
(RHIC-PHENIX $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV 金・金衝突実験における中性パイ中間子及び直接光子の方位角異方性の測定)

【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) 高井 健太郎 [岡田 晋]

Theoretical Study on the Electronic Structure of the Vacancies in Compressively Strained Ge

(圧縮歪みを受けたGe中原子空孔における電子構造の理論的研究)

2) 後藤 健 [舛本 泰章]

Optical properties of novel semiconductor nanostructures: wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires

(新しい半導体ナノ構造 -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)

【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) 小川 竜矢 [石橋 延幸]
Marginal Deformation を用いた Open String Field Theory の一般的な解析解の構成と
タキオン凝縮
- 2) 市川 知宏 [梅村 雅之]
銀河の遠赤外放射輸送モデルの構築と星形成矮小銀河への応用
- 3) 成田 亮太 [梅村 雅之]
銀河団を用いたバリオン音響振動検出の可能性
- 4) 和田 崇之 [梅村 雅之]
大質量星周りのダストガス円盤の電離構造
- 5) 並木 翔平 [矢花 一浩]
時間依存密度汎関数理論による強レーザー場と表面の相互作用に関する研究
- 6) 大日向 正志 [有光 敏彦]
量子散逸系を扱う正準演算子形式に基づくスクイーズド真空の研究 --- Schrödinger 描像で
の定式化 ---
- 7) 畔柳 成秀 [舘野 賢]
生体機能高分子における物質輸送機構の計算科学的解析
- 8) 姜 志始 [舘野 賢]
Computational analyses of metal-binding active sites responsible for electron transfer
in proteins(タンパク質の電子移動を担う金属結合サイトの計算科学的解析)
- 9) 須藤 裕司 [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ビームテストによる性能試験と π^0 中
間子生成事象の再構成
- 10) 武政 健一 [金 信弘]
ニュートリノ崩壊探索実験のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の
開発研究
- 11) 生野 利典 [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ビームテストによるエネルギー較正と
基本性能評価
- 12) 秦野 博光 [受川 史彦]
Super-LHC 用 P 型シリコンマイクロストリップセンサーの放射線耐性の評価
- 13) 目黒 立真 [受川 史彦]
ATLAS 実験 SCT シリコン飛跡検出器による精密飛跡再構成

- 14) 荒井 均〔中井 直正〕
広帯域デジタル電波分光計の安定化
- 15) 扇野 光俊〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡によるオリオン KL 天体のアンモニア観測
- 16) 平井 克明〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡の連続波観測システムの開発
- 17) 丸山 理樹〔中井 直正〕
つくば 32m アンテナの性能評価と天体電波強度較正
- 18) 坂田 洞察〔三明 康郎〕
LHC-ALICE 実験における反応平面と Back-to back ジェット軸の測定分解能の評価
- 19) 佐野 正人〔江角 晋一〕
LHC-ALICE 実験における遷移輻射検出器の評価と D/B 中間子識別能力
- 20) 前田 清隆〔小野田 雅重〕
三角格子系 Li_xNiO_2 の輸送現象と磁性
- 21) 後藤 育郎〔小野田 雅重〕
ペロブスカイト系 $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{TiO}_{3+y}$ の熱電特性
- 22) 菅原 麻美〔小野田 雅重〕
三角格子系 CoO_2 の積層不整と金属的性質
- 23) 柴田 恭幸〔守友 浩〕
膜接合による Prussian blue 錯体の電圧価数制御
- 24) 中田 文也〔守友 浩〕
ゲスト分子濃度制御によるシアノ錯体の物性研究
- 25) 山岸 徹〔大塚 洋一〕
トンネル接合型小型 SQUID 磁力計の開発
- 26) 坂越 祐介〔今井 剛〕
GAMMA 10 セントラル部電子加熱用 ECRH アンテナの高性能化研究
- 27) 室伏 規雄〔今井 剛〕
GAMMA10 ECRH 用 28GHz-1MW ジャイロトロンの電子銃と発振設計
- 28) 八代 勝也〔今井 剛〕
GAMMA10 アンカー部ダイバータ磁場配位における平衡計算
- 29) 水口 正紀〔吉川 正志〕
金中性粒子ビームプローブを用いた GAMMA10 セントラル部の低周波領域の揺動解析

- 30) 根岸 真佑〔吉川 正志〕
位相イメージング法を用いた GAMMA10 プラグ部における密度及び密度揺動の研究
- 31) 米田 良隆〔吉川 正志〕
GAMMA10 における電位生成時の固体水素ペレット入射の研究

【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・物質創成先端科学専攻

- 1) 高田 幸宏〔白石 賢二〕
2次元電子ガスー量子ドット結合系の電子構造
- 2) 田中 朝紀〔白石 賢二〕
たんぱく質環境下でのプロトン親和性の理論的考察
- 3) 五十嵐 真之〔岡田 晋〕
密度汎関数理論に基づく Si(001)表面におけるステップ構造の研究
- 4) 井門 靖樹〔舩本 泰章〕
(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
- 5) 梅澤 康昭〔野村 晋太郎〕
金一次元格子構造を有するグラフェンのラマン分光
- 6) 櫻井 蓉子〔野村 晋太郎〕
量子ドットー電子ガス結合系における C-V 及び I-V 特性
- 7) 藤咲 健二〔野村 晋太郎〕
量子ドットアレーの C-V 特性と発光特性

物理学セミナー

平成20年度

	開催日	講師	題目
第1回	9月3日	中井 直正 (宇宙観測)	南極からの天文学
第2回	9月10日	久保 敦 (物性実験)	ナノスケール光物性における最近の展開：表面プラズモンとプラズモニクスを主題にして
第3回	9月24日	八田 佳孝 (素粒子理論)	高エネルギー散乱で見る量子色力学
第4回	10月8日	宮崎 州正 (凝縮系理論)	分子の世界の渋滞学-ガラス転移の物理-
第5回	10月22日	受川 史彦 (素粒子実験)	物理法則と対称性について
第6回	10月29日	橋本 幸男 (原子核理論)	原子核の三次元的回転運動
第7回	11月5日	小松原 哲郎 (原子核実験)	ガンマ線分光によるアルミニウム26宇宙元素合成の研究
第8回	11月12日	森 正夫 (宇宙理論)	高精度数値シミュレーションで探る宇宙の物質循環過程
第9回	11月19日	北條 仁士 (プラズマ)	マイクロ波プラズマ診断シミュレータの開発とその応用

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 4,339,300 円
2. TA経費 数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻(物理学分野)分
707,800 円

平成20年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	教授	中井 直正	日本学士院賞	(1) Nakai,N., et al. 1993 "Extremely-high-velocity H ₂ O maser emission in the galaxy NGC4258", Nature 361, 45. (2) Miyoshi,M., Nakai,N., et al. 1995 "Evidence for a Black-Hole from High Rotation Velocities in a Sub-Parsec Region of NGC4258", Nature 373, 127. (3) Herrnstein,J.R., Nakai,N., et al. 1999 "A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk", Nature 400, 539.	6月
2	助教	八田 佳孝	日本物理学会若手奨励賞	Correlation of small-x gluons in impact parameter space	10月
3	教授	青木 慎也	井上學術賞	格子QCDの相構造の解明クォークと核力の研究	2月

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	大塚 洋一	17069004	固定電極にリンクしたナノスケール導体の電気伝導特性	23,300
" 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	35,800
" 計	教授	白石 賢二	18063003	第一原理量子論によるナノデバイス材料・界面の物性予測	13,400
" 公	准教授	宮崎 州正	19031027	コロイドゲルの生成ダイナミクスとレオロジー	2,900
" 公	教授	矢花 一浩	19019002	光に起因する電子・イオンダイナミクスに対する実時間シミュレーション法の開発	1,800
" 公	准教授	館野 賢	19019003	量子ハイブリッド分子動力学法による生体機能の量子デザイン	2,600
" 公	教授	初貝 安弘	20029004	量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序	1,100
" 公	教授	初貝 安弘	20046002	フラストレートした磁性体におけるベリー位相	1,000
" 公	教授	守友 浩	20045001	ホストゲスト相互作用を利用したC o - F e系シアノ錯体膜の物性制御	2,300
" 公	准教授	北條 仁士	20026003	相対論効果を考慮したI T E Rスケールプラズマの反射法シミュレーション研究	1,800
" 公	准教授	Boero Mauro	20051003	シトクローム酸化酵素の機能発現機構の量子構造生物学的解析	3,100
" 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	11,500
新学術領域研究	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の物質構造の解明	2,800
	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	24,700
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	三明 康郎	20224014	ジェット識別測定によるクォーク・グルーオンプラズマ物性の研究	8,700
"	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	10,900
基盤基盤(A) 一般	講師	瀬田 益道	19204016	南極天文学を切り開くサブミリ波サーベイ望遠鏡の開発	9,100
" "	教授	中井 直正	20244011	天の川のアンモニア掃天観測	20,700
" "	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	14,500
基盤研究(B) 一般	教授	金谷 和至	17340066	有限温度・有限密度QCDの非摂動論的研究	3,600
" "	教授	白石 賢二	18360017	ナノ界面理論の新展開とそのナノデバイスへの応用	3,700
" "	准教授	Boero Mauro	19340108	電子ダイナミクスに基づく生体分子触媒反応のシミュレーション	3,600
" "	講師	笹 公和	18360043	極微量放射性核種シリコン32の加速器質量分析による超高感度検出法の開発	2,100
" "	教授	青木 慎也	20340047	格子量子色力学による核力の研究	3,900
" "	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	5,400
基盤研究(C) 一般	教授	今井 剛	19560825	電子サイクロトロン加熱によるプラズマ能動制御と閉じ込め改善	1,600
" "	准教授	宮崎 州正	19540432	ガラス転移と動的相関長	1,300
" "	研究員	梅田 貴士	19549001	有限温度格子QCDによるチャーモニウム消失温度の研究	800
" "	教授	矢花 一浩	18540366	フェムト秒多電子ダイナミクスの第一原理シミュレーション	800
" "	准教授	蔵増 嘉伸	18540250	格子上の場の理論による標準理論の研究	700
" "	教授	石橋 延幸	20540247	D-ブレーンと閉じた弦の場の理論	700
" "	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	1,900
" "	准教授	石塚 成人	20540248	格子QCDによる共鳴状態の研究	1,400
" "	准教授	森 正夫	18540242	高精度ハイブリッドシミュレーションで探る銀河の発生学	800

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額(千円)
萌芽研究	講師	神田 晶申	19651044	グラファイト超薄膜のインターカレーションと電気伝導測定	500
"	教授	大塚 洋一	19654049	極微小トンネル接合高磁場SQUIDの開発と応用	1,200
"	教授	初貝 安弘	20654034	量子液体におけるバルクエッジ対応とエンタングルメントエントロピー	2,000
"	教授	舩本 泰章	20654026	同期励起光スピン偏極法の開拓と量子ドットへの応用	3,500
若手スタートアップ	講師	吉川 耕司	19840008	宇宙論的なバリオン進化の理論的研究	1,350
"	助教	久保 敦	20840005	ナノスケール凝縮系における表面プラズモンの超高速ダイナミクス	1,320
若手研究(B)	助教	富本 慎一	19740174	ディスク状半導体量子ドットにおける励起子輻射再結合寿命の研究	700
"	助教	吉田 恭	19740229	乱流統計理論の宇宙規模流体への展開	1,100
"	研究員	三宅 秀樹	18740149	中性B中間子の η' η' Ks崩壊の探索とCP非保存現象の研究	900
"	准教授	岡田 晋	19710087	ナノ物質系のネットワーク形状制御による新奇物性探索	1,200
"	助教	谷口 裕介	18740130	格子上の超対称性理論の数値的解析	600
"	講師	重田 育照	20750004	プロトン結合電子移動反応の実時間解析：量子キュムラント動力学法	1,600
"	講師	武内 勇司	20740122	スピン偏極度相関を用いたトックオーク対生成機構の解明	1,200
"	講師	丸山 和純	20740121	CDF実験におけるベクトルボソン融合事象に関する研究	900
"	助教	上岡 隼人	20740169	強磁性体Mn酸化物のスピン分極の実時間イメージング	1,400
"	研究員	村口 正和	20760019	量子ダイナミクスに基づく半導体デバイス界面におけるトンネル現象の理論的考察	1,900
"	準研究員	安田 裕介	20740120	(p, pn) 反応を用いた原子核内中性子運動量分布の測定	1,000
				合計	257,870

網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

平成20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	講師	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	助教	久保 敦	(独)科学技術振興機構	ナノ光学素子中のプラズモンダイナミクスのフェムト秒映像化	1,040,000
3	教授	守友 浩	文部科学省	フェムト秒時間分解顕微鏡の構築とMEM電子分布解析の高度化	13,500,000
4	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構	大学間連携VLBI観測事業に係る研究—先端的天文学研究の推進—	5,658,000
5	准教授	岡田 晋	ソニー株式会社	Graphene基礎物性研究に対する調査および理論的側面からの研究	1,050,000
6	講師	笹 公和	文部科学省	極微量放射性核種AMSによる原子力施設環境モニタリング研究	9,980,834
7	講師	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	4,810,000
合計					43,838,834

平成20年度 奨学寄付金

NO	職名	氏名	寄付者等名	寄付の目的	金額 (円)
1	講師	池沢 道男	財団法人 池谷科学技術振興財団	「Ⅲ-V族化合物半導体における単一等電子不純物の量子光物性」に対する研究助成	1,500,000
2	教授	舛本 泰章	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授 舛本泰章	「光スピン変換による量子情報通信の研究」に対する研究助成	5,033,000
3	講師	池沢 道男	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授 舛本泰章	「光スピン変換による量子情報通信の研究」に対する研究助成	1,375,000
4	教授	守友 浩	財団法人 テレコム先端技術研究支援センター	「ナノサイズ錯体の創生と高次光機能的の発現」に対する研究助成	1,000,000
5	教授	舛本 泰章	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授 舛本泰章	「光スピン変換による量子情報通信の研究」に対する研究助成	2,881
6	教授	白石 賢二	コハレントマテリアル株式会社	「シリコン表面の酸化特性に関する研究」に対する研究助成	300,000
7	准教授	小野田 雅重	財団法人 熱・電気エネルギー技術財団	「低次元伝導性複合結晶の高機能化の研究」に対する研究助成	1,000,000
8	講師	神田 晶申	財団法人 倉田記念日立科学財団	「ナノ構造超電導体における局所電流注入効果と磁束ダイナミクスの解明に関する研究」に対する研究助成	1,400,000
合計					11,610,881

平成20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	北條 仁士	株式会社日立製作所中央研究所	UHF-ECRプラズマ解析技術の研究	1,000,000
2	教授	白石 賢二	株式会社日立製作所中央研究所	MONOS型不揮発性メモリの電荷蓄積膜物理の研究	800,000
3	教授	白石 賢二	コハレントマテリアル株式会社	Si/SiO ₂ 界面の初期生成メカニズムに関する研究	420,000
4	教授	中井 直正	自然科学研究機構国立天文台	南極プロトタイプ望遠鏡によるサブミリ波銀河面サーベイ	1,120,000
合計					3,340,000

平成20年度 その他

NO	職名	氏名	民間等機関	研究題目	金額 (円)
1	教授	舛本 泰章	国際共同研究助成金 (情報通信研究機構)	量子情報通信に向けた高効率単一光子源の研究	9,800,000
合計					9,800,000

役 務 分 担

平成20年度

数理物質科学研究科物理学専攻長 物理学系長	金信弘
数理物質科学研究科学務委員（物理学専攻）	矢花一浩
数理物質科学研究科運営委員（物理学専攻）	金信弘，矢花一浩
物理学類長	中井直正
物理学類学務委員	初貝安弘
自然学類運営委員	中井直正，初貝安弘
物理学関係自己評価委員	金信弘（委員長），青木慎也，有光敏彦， 今井剛，受川史彦，梅村雅之，大塚洋一， 白石賢二，中井直正，舛本泰章，三明康郎， 矢花一浩，舘野賢
図書係	舘野賢
カリキュラム委員	初貝安弘（委員長），石橋延幸，今井剛， 受川史彦，梅村雅之，大塚洋一，中井直正， 矢花一浩，新井一郎，野村晋太郎
学類クラス担任（1年）	吉江友照，武内勇司
（2年）	守友浩，岡田晋
（3年）	今井剛，橋本幸男
（4年）	石塚成人，神田晶申
自然学類就職委員	石塚成人，神田晶申
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：吉江友照，武内勇司
学類学生委員会	吉江友照，武内勇司
ハラスメント委員/相談員	蔵増嘉伸
実験廃棄物取扱責任者	東山和幸

物理学系人事異動

(平20. 4. 1～平21. 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)
森正夫	准教授	平20. 4. 1	専修大学法学部准教授
永井誠	準研究員	平20. 6. 1	
岡本崇	助教	平20. 12. 1	Durham大学物理学科 Postdoctoral Research Associate

【物理学系を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
重田育照	講師	平20. 5. 15	兵庫県立大学ビコハ・イロジ-研究所 准教授
戸村友宣	助教	平20. 5. 15	数理物質科学研究科物理学専攻 研究員
丸山和純	講師	平20. 5. 31	高エネルギー加速器研究機構(素粒子 原子核研究所物理第三研究系) 准教授
長照二	教授	平20. 8. 27	
ボエロ・マウロ	准教授	平20. 11. 30	フランス国立科学研究センター (CNRS) Research Director
安田裕介	準研究員	平21. 3. 31	大阪大学核物理研究センター
稲倉恒法	準研究員	平21. 3. 31	計算科学研究センター任期付研究員

物理学系構成員

2008. 4. 1～2009. 3. 31

		教授	准教授	講師	助教	準研	技術
理 論	素粒子	青木(慎) 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) 毛利 八田		
	宇宙物理	梅村 [計七]	森 [計七] 牧野 [客員・計七]	吉川(耕) [計七]	岡本 [計七]		
	原子核	矢花 [計七]	丸山 [連携・物理]	橋本 [計七]		稲倉	
	物性	有光 白石 [計七] 初貝	岡田 [計七] 館野 [計七] 谷口(伸) BOERO 宮崎	重田 [TARA七]	吉田		
実 験	素粒子	受川 金	新井 [客員・物理]	武内 原 丸山	戸村		
	宇宙観測	中井		瀬田		永井	
	原子核	三明 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] 中條		安田	加藤
	磁性物性		小野田				
	半導体物性	舛本 蔡 [連携・物質創成] 馬場 [連携・物質創成]	野村 二瓶 [連携・物質創成]	池沢	富本		
	強相関物性	守友	川本 [連携・物理]		上岡		
	表面物性			東山	久保		
	低温物性	大塚 [学際七長]		神田 [学際七]	森下		
	プラズマ	今井 [フセ長] 長 坂本 [連携・物理] 三浦 [連携・物理]	假家 中嶋 [フセ] 北條 [フセ] 吉川(正) 藤田 [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, 比企						

年次研究報告 筑波大学物理学系

2008（平成20）年度

発行 2009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