

ISSN 0915-5317

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF INSTITUTE OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2009 (平成21) 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	25
III	宇宙物理理論グループ	52
IV	宇宙観測グループ	71
V	原子核理論グループ	77
VI	原子核実験グループ	89
VII	物性理論グループ	
VII-1	非平衡統計物理グループ	123
VII-2	量子物性理論グループ	130
VII-3	ナノ量子物性グループ	135
VII-4	ソフトマター理論グループ	141
VII-5	半導体ナノ物性グループ	146
VII-6	ナノ構造物性グループ	156
VII-7	生命物理グループ	163
VIII	物性実験グループ	
VIII-1	磁性物性グループ	177
VIII-2	半導体物性グループ	184
VIII-3	強相関物性グループ	199
VIII-4	表面物性グループ	209
VIII-5	低温物性グループ	215
IX	プラズマ研究グループ	227

— 教育活動 —

X	物理教育および物理教育の研究	258
	【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	261
物理学域資料	271

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 井上 貴史、植田 高寛、浮田 尚哉、佐々木 健志、土井 琢身、滑川 祐介、山崎 剛

大学院生 (13名)

【人事異動】佐々木健志氏(2009年4月1日)、植田高寛氏(2009年4月1日)、山崎剛氏(2009年1月1日)が素粒子理論グループに、それぞれ研究員として加わった。石井理修研究員が東京大学理学系研究科に研究員として(2009年3月31日)、松尾俊寛研究員が岡山光量子研究所に研究員として(2009年3月31日)、井上貴史研究員が日本大学生物資源科学部に助教として(2010年3月31日)、それぞれ転出した。

【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、超弦理論の研究、高エネルギー・ハドロン物理の研究の、3つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループでは、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。格子場の理論グループの研究者の大部分は、2006年7月に計算科学研究センターの次期並列計算機としてPACS-CSが導入されたのを契機として新たに立ち上げられた研究グループ PACS-CS Collaborationに参加している。PACS-CS Collaborationでは、計算科学研究センターのPACS-CSやT2K-Tsukubaを主要な計算機資源として、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的として、 $N_f = 2 + 1$ QCDの大規模シミュレーションを進めている。一方、研究者の一部は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)のIBM BlueGene/Lと日立SR-11000を用いて、格子上での厳密なカイラルを持つオーバーラップ・フェルミオン作用を用いた研究を展開しているJLQCD Collaborationにも参加して、研究を展開している。さらに、これらの大規模シミュレーションのためのCollaborationとしての研究と並行して、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、や、計算技術開発なども行われた。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の構築を推進した。

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弦の場の理論や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされる等の大きな発展があった。この状況の下で、弦の場の理論と次元正則化、重力理論／ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅等についての研究を行った。

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

【1】 格子場の理論

(青木 慎也、宇川 彰、金谷 和至、石塚 成人、藏増 嘉伸、吉江 友照、谷口 裕介、井上 貴史、植田 高寛、浮田 尚哉、佐々木 健志、土井 琢身、滑川 祐介、山崎 剛)

(1) PACS-CS Collaboration の活動

計算科学研究センターでは、平成 17 年度から 3 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である。平成 18、19 年度は物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くすることによって物理量のクォーク質量依存性を調べることが主要課題であった。平成 20 年度より PACS-CS プロジェクトの目標である物理点でのシミュレーションへの取り組みを開始し、平成 21 年度 reweighting 法を用いた物理点直上でのシミュレーションに成功した。また、物理点における体積効果を調べるために超並列クラスタ計算機 T2K-Tsukuba（計算ノード数 648、ピーク演算性能 94.Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始）を利用してより大きな空間サイズのシミュレーションを実行中である。以下に平成 21 年度における進展を述べる。

物理点直上での $N_f = 2 + 1$ QCD シミュレーション

昨年度に引き続き、PACS-CS プロジェクトの目標である物理点直上でのシミュレーションに取り組んだ。この計算では格子サイズ $32^3 \times 64$ 、格子間隔 $a \approx 0.09\text{fm}$ の格子上で非摂動的に $O(a)$ 改良された Wilson クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いた。これらのパラメータは平成 18、19 年度に行ったクォーク質量依存性を調べるための計算に使用したのと同じである。物理

点直上でのシミュレーションを行う上での最大の問題は、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点直上へのチューニングである。我々は reweighting 法を用いてこの問題を解決することに成功した（論文1）。図1左図は reweighting 因子の配位依存性を表している。異なる配位間のゆらぎは安定していることがわかる。図1右図では左図の reweighting 因子を用いて、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点へのチューニングを行った結果である。up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するためのインプットは π メソン、 K メソン、 Ω バリオンの質量である。それらのハドロン質量が誤算の範囲で実験値に正しくチューニングされていることが図1右図において見てとれる。本研究によって格子QCDにおける物理点直上のシミュレーションという長年の課題は解決された。

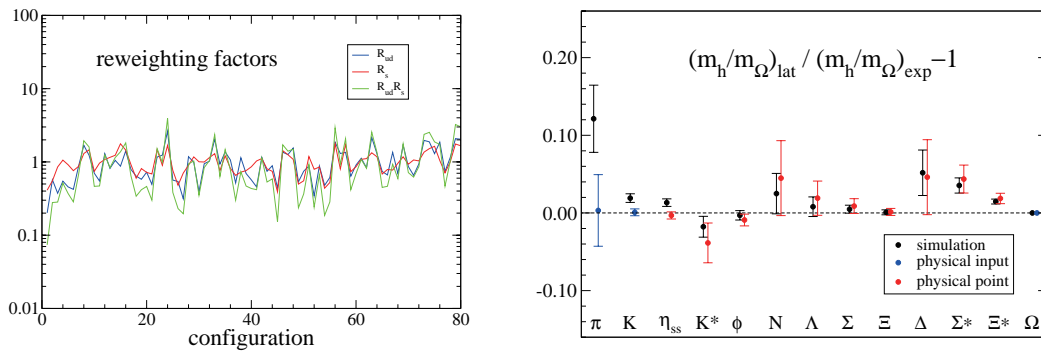


図1: 物理点直上での $N_f = 2 + 1$ QCD シミュレーション。左図: Reweighting 因子の配位依存性。 R_{ud} は up-down クォーク質量に対する Reweighting 因子を表し、 R_s は strange クォーク質量に対する Reweighting 因子を表す。 $R_{ud}R_s$ は両者の積。右図: ハドロン質量の実験値との比較。 Ω バリオンの質量で規格化されている。黒丸は reweighting によるチューニング前の結果。赤丸は reweighting によって物理点直上にチューニングされた結果。青丸は up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決めるためのインプットを表す。

ρ 中間子崩壊幅の計算

これまで生成された配位を用いて幾つかの興味深い物理量の計算も行っている。特筆すべきは、 ρ 中間子崩壊幅の計算である。ハドロン共鳴状態の深い理解の為には、ハドロン散乱位相を、格子上の数値計算により定量的に評価し、実験値と比較することが本質的な重要性を持つ。本研究では、 1^{-} の共鳴状態である ρ 中間子の研究を、2体 π の散乱位相から行った。最初のステップとして、410MeV の π メソン質量に相当する up-down クォーク質量で生成された配位を用いて散乱位相の高精度計算を行った。これから得られた崩壊幅の値は 113 ± 22 MeV であり、実験値 150 MeV をほぼ再現している。本研究の成果は本年度論文に纏める予定である。今後より小さなクォーク質量を用いた計算を実行し、クォーク質量依存性を調べる計画である。

格子QCDによる原子核の直接構成

また、平成21年度は格子QCDによる原子核の直接構成という新たな研究の

潮流を生み出した (論文 3)。格子 QCD における原子核相関関数の評価は膨大な数のクォークダイアグラムの計算を必要とするが、我々はこの問題を解決するために計算コストを大幅に削減する方法を提案した。この方法を用いて、軽い原子核の中でも比較的大きな束縛エネルギーを持つヘリウム原子核に対して、現実世界よりも重いクォーク質量を用いた試験的計算を行った。散乱状態と束縛状態を識別するためにはヘリウム原子核と自由核子のエネルギー差の体積依存性を調べなければならないが、格子の空間サイズ L を 24 から 96 まで変化させる計算を行った結果ヘリウム原子核が束縛しているという結論が得られた (図 2)。

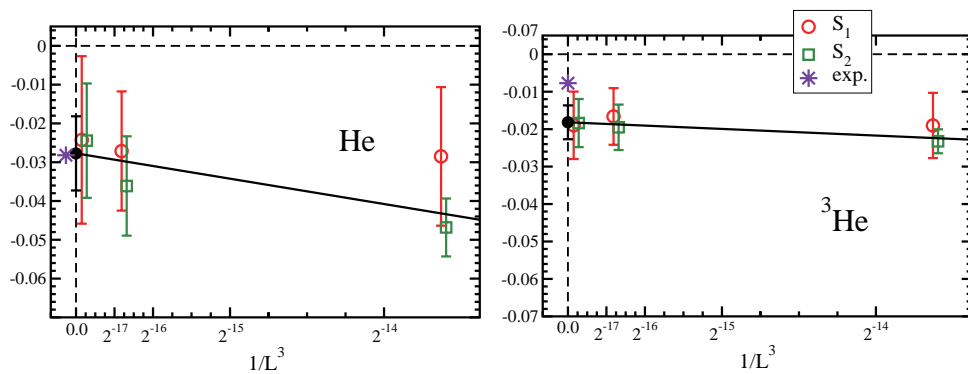


図 2: 格子 QCD による原子核の直接構成。左図は He 原子核と 4 個の核子の質量のエネルギー差の体積依存性。 L は格子の空間方向の長さ。 $S_{1,2}$ は原子核相関関数における演算子の選び方の違いを表す。黒線は空間体積無限大への外挿の様子。右図は ${}^3\text{He}$ 原子核と 3 個の核子の質量のエネルギー差の体積依存性。

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

2つの核子の間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に近距離での斥力(斥力芯と呼ばれている)を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。

青木、石井らは、東京大学の初田との共同研究で、二核子系の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を用いて格子 QCD により計算したが、その方法のまとめの論文 14 を発表した。また、青木はポテンシャルの近距離での振舞を解析的手法で研究した (論文 17,23)。

また、村野らは、ポテンシャルのエネルギー依存性及び、角運動量 L 依存性を調べ (図.3)、これらのポテンシャルは少なくとも、 $E = 0 \sim 45\text{MeV}$ 、 $L = 0 \sim 2$ において利用可能であることを示した (論文 30, 国際会議 16)。

井上らは、格子 QCD を用いてフレーバー SU(3) 対称極限な世界におけるバリオン間相互作用を調べた。彼らは S 波状態に注目し、最近に開発された方法を用いて、必要十分な 6 つのポテンシャルを導出した。結果を用い、相互作用のフレーバー依存性、特に短距離における違いとその起源を議論した (論文 31, 国際会議発表 17, 国内会議 10,11)。特筆すべき点は、フレーバー 1 重項チャン

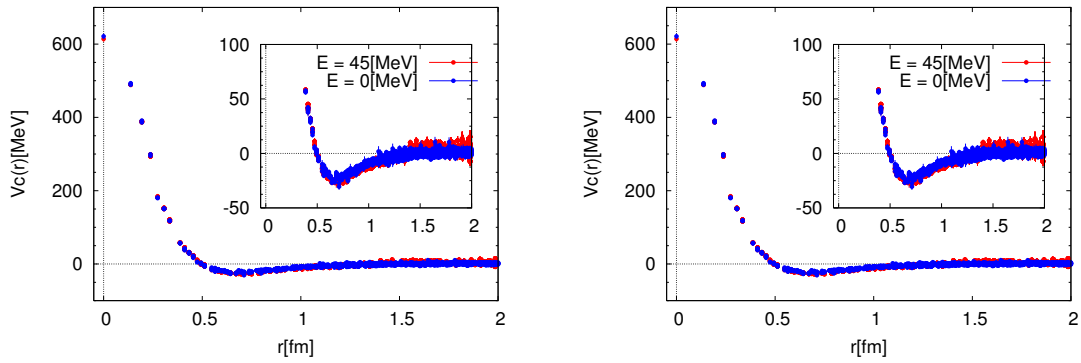


図 3: 核子間中心力ポテンシャルのエネルギー依存性 (左図) と角運動量依存性 (右図)。左: 重心エネルギー 0MeV, $L=0$ で計算された中心力ポテンシャル (青) と 45MeV, $L=0$ における計算 (赤) の比較。右: 45MeV, $L=2$ (水色) と 45MeV, $L=0$ (赤) の比較。今のところ殆ど差は見られない。

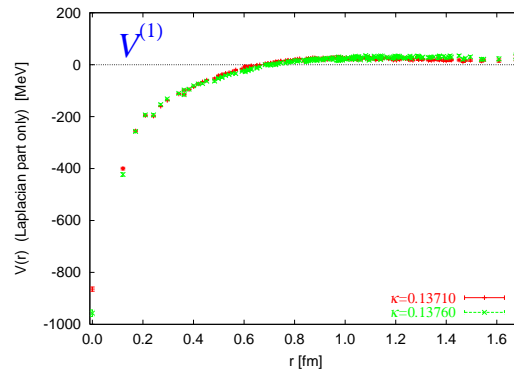


図 4: 3 フレーバー格子 QCD でのフレーバー 1 重項ポテンシャル。

ネルが他と異なり短距離で引力である事を示した点、ダイバリオン状態が存在する可能性がある事を示した点である (図 4)。

近年、原子核や中性子星などの諸性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が指摘されている。土井らは、格子 QCD による三体力の決定を目指し、今年度は三体系内での有効二体相互作用に着目した計算を行った。図 5 (左図) は、PACS-CS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 700MeV に対応する 2+1 フレーバーゲージ配位を使って計算された、三重水素原子核中の有効二体相互作用である。三体系でも有効相互作用が精度良く決定できることを実証している。真の二体相互作用との差を取ったものが図 5 (右図) であるが、このゲージ配位では、三体系の効果は誤差の範囲内でゼロコンシステントとなった。

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

JLQCD Collaboration は、格子上で厳密なカイラル対称性を持つオーバーラップ・フェルミオンを力学的クォーク作用に用いた $N_f = 2$ 格子 QCD と $N_f = 2+1$ 格子 QCD でゲージ配位を生成し、それを用いて、パイ中間子の形状因子の計算 (論文 12)、カイラル凝縮の決定 (論文 15)、QCD の結合定数の決定などを行った。また、トポロジーを固定した影響を含んだカイラル摂動論を定式化

し、物理量に対する質量依存性を解析的に評価した (論文 13)。

(4) ドメインウォールクォークによる構造関数のモーメントの計算

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ゲージ配位による、核子深非弾性散乱と関係する構造関数のモーメントを計算した。軸性ベクトル流形状因子と異なり有限体積効果が小さい事、演算子繰り込みによる系統誤差が大きい事を示めた (論文 48)。

(5) 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 の場合のカレント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 11)。

また、カイラル摂動論を用いて、twisted mass 格子 QCD における、 π 中間子の質量や崩壊定数の格子間隔依存性を調べた。

(6) 格子 QCD による散乱長と位相差の研究

石塚らは、 $I = 2 \pi\pi$, $I = 1 KK$, $I = 1/2 K\pi$, $I = 3/2 K\pi$ の各散乱での散乱長を、格子 QCD により計算した。それにより、 $K\pi$ 相互作用が、 $I = 1/2$ チャンネルでは引力であり、 $I = 3/2$ チャンネルでは斥力であることを初めて直接計算により示した (論文 34)。

さらに、 NN , $N\pi$ 散乱の散乱位相を格子 QCD で計算する場合に必要な有限体積公式を、相対論的場の理論から導いた (論文 35)。

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

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

Wilson 型クォークによる系統的研究は世界的に見ても、1990 年代前後に行われた筑波の qcdpax, cp-pacs グループ以降、ほとんど行われていなかった。そ

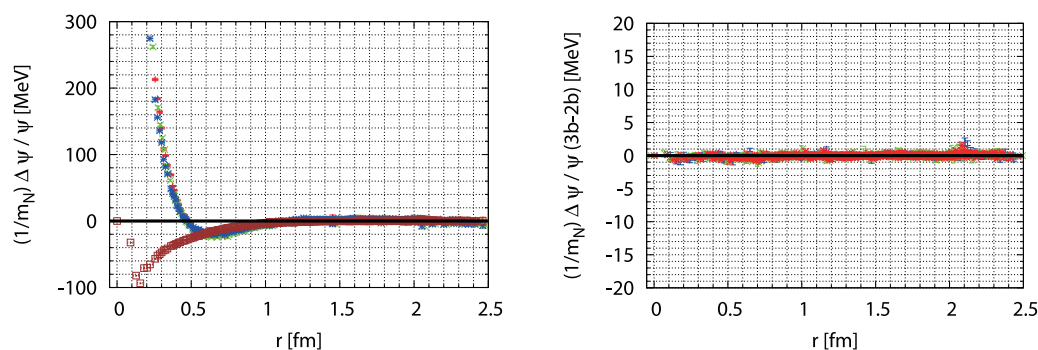


図 5: 核子三体系内での有効二体相互作用の研究。左図：三重水素原子核中の有効二体ポテンシャル (赤: 1S_0 中心力, 青: $^3S_1 - ^3D_1$ 中心力, 茶: $^3S_1 - ^3D_1$ テンソル力)。右図：テンソル力について有効二体ポテンシャルと真の二体ポテンシャルとの差。

のため、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、従来の Staggered クォークの計算で見つかっ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。これらの結果をまとめた本論文を投稿した (論文 46)。

固定格子間隔アプローチと T -integral 法の開発

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。従来の固定格子数 (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。また、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 (論文 36,43)。

現在、CP-PACS+JLQCD グループによる $N_f = 2 + 1$ QCD の温度ゼロでの研究結果と公開されているゼロ温度ゲージ配位を利用して、固定格子間隔アプローチに基づく $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度配位生成を進めている。これまでに得られた状態方程式に関する成果の一部を国際会議等で発表した (国際会議 43,45)。

重いクォーク間の自由エネルギーと遮蔽質量の研究

固定格子間隔アプローチで生成された $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度ゲージ配位上で、重いクォーク間の自由エネルギーを研究した。固定格子間隔方法の大きな利点として、純粹に系の温度だけを変化させた研究が可能である。自由エネルギーの研究においても、くりこみの不定性無しに、温度依存性を調べることが出来る。図6の左図に、高温相における自由エネルギーの結果を示す。極めて高温でも、十分短距離にすれば、グリーン破線で示された温度ゼロでの重いクォーク間ポテンシャルに一致することが見て取れる。これは、温度効果は長距離のもので、十分短距離では高温相でも温度効果が無いという、理論的予想と一致しているが、従来の研究では、自由エネルギーの原点が温度毎に異なるくりこみを受けるために、この理論的予想を使って、短距離で一致するように手で調整されていた。固定格子間隔アプローチでは、くりこみが温度に依らないためにそうした調整は不要であり、理論的予想を初めて確認することに成功した。また、長距離では、クォークの閉じ込めがやぶれて、自由エネルギーが一定値になる様子も確認される。図6の右図に、デバイ遮蔽質量の温度、及

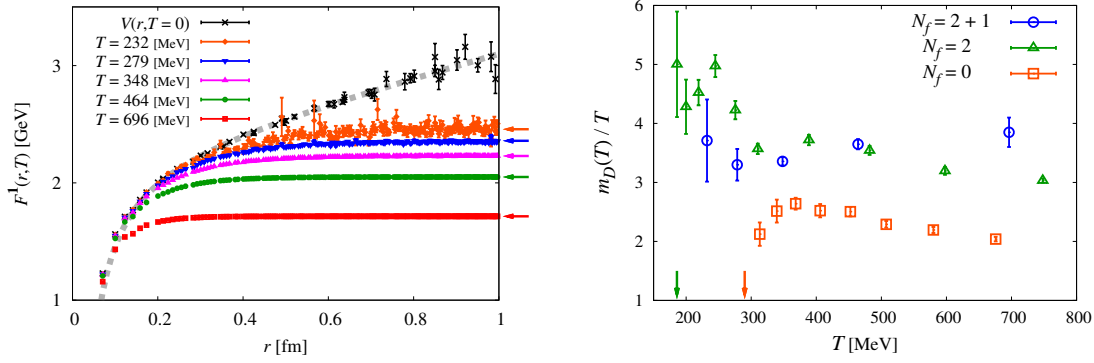


図 6: 固定格子間隔アプローチによる高温相における重いクォーク間の自由エネルギーの研究。左図: ポリアコフ ライン相関関数から求めた重いクォーク間の自由エネルギーの温度依存性。グレーの破線は CP-PACS-JLQCD による温度ゼロの場合のクォーク間ポテンシャルの結果。左端の矢印は、ポリアコフ ライン 1 本の真空期待値から計算した、完全に分離した重いクォークの自由エネルギーを 2 倍したもの。右図: ポリアコフ ライン相関関数から求めたデバイ遮蔽質量の温度、及びフレーバー数依存性。右図下の矢印は $N_f = 2$ 及び 0 の場合の相転移温度を表す。

びフレーバー数依存性を示す。 $N_f = 0$ の結果と比べると、 $N_f = 2$ および $2+1$ の結果は有意に大きく、軽いクォークが大きな影響を持っていることが示された (論文 38,42,44)。

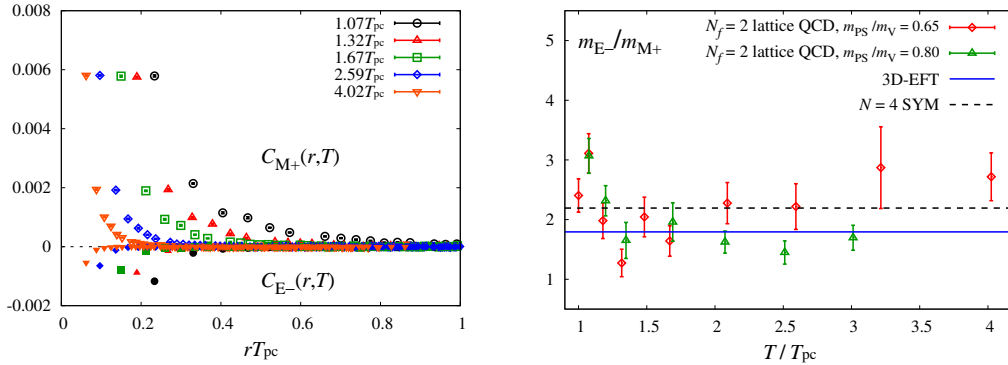


図 7: ゲージ不変な遮蔽質量の研究。左図: ゲージ不変な電氣的ポリアコフ ライン相関関数と磁氣的ポリアコフ ライン相関関数。 $N_f = 2$ QCD における $m_{PS}/m_V = 0.65$ の場合の結果。右図: 電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量の比 (スクリーニング比) の温度依存性。実線と破線は、3次元有効模型と $N = 4$ 超対称模型によるスクリーニング比の結果。

前項の研究では、ゲージをクーロンゲージに固定して、自由エネルギーやデバイ遮蔽質量を計算している。クーロンゲージはクォークの物理描像を取り出す上で有用なゲージとして他グループの研究でも広く用いられており、同じゲージを用いた現象論的研究に有用な非摂動論的情報を提供しているが、最終的な現象はゲージの取り方には依らないので、ゲージに依存した物理量は直接の観測可能量ではない。この問題に対処するために、ゲージ不変な遮蔽質量の計算方法を開発した。ゲージ不変なポリアコフ ラインを時間反転と荷電反転

とで分類し、それらの相関関数を調べることにより、電氣的遮蔽と磁氣的遮蔽をゲージ不変に分離した。図7の左図に、 $N_f = 2$ QCDの場合に得られたゲージ不変な相関関数の例を示す。これらの相関関数の長距離での遮蔽を調べることにより、電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量を計算した。図7の右図に示すように、電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量の比が有効模型や超対称模型と同様な振る舞いをしていることがわかった (論文 40, 47)。

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) 相中で消失する温度や特性を格子 QCD で研究した。我々は、対角化の方法を用いて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。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、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 37, 41)。

QGP 有限温度相転移の次数に関する研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の次数を判定する有効な手法の研究を行った。QGP 有限温度相転移の次数を判定する方法として、観測量のヒストグラムを用いる方法があるが、測定が容易なプラケットのヒストグラムに reweighting 法を組み合わせる研究方法が近年提案された。クォーク質量が非常に大きい領域でのシミュレーションを行い、この領域での QGP 有限温度相転移の次数について調べた。過去の研究からこの領域での相転移の概要は分かっているもので、これと今回の結果を比較した。この比較から、この新しい方法が上手く機能していることを確かめた。この方法を用いることで臨界点をこれまでより容易に特定することができ、この方法が従来の方法に比べ優れていることがわかった。国際会議などで発表を行い (国際会議 24)、現在論文を準備中である。

(8) ILDG/JLDG に係わる活動

格子 QCD シミュレーションの基礎データである配位を国際規模で共有する International Lattice Data Grid プロジェクトに参画し、システムの改良に携さざると共に、定例のワークショップ (テレビ会議) を 2 回ホストした。また、国内の格子 QCD 研究者のデータグリッド Japan Lattice Data Grid の改良に携わった。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二、松尾 俊寛)

(1) 弦の場の理論と次元正則化

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は馬場・村上（理研）とともに、弦理論に次元正則化を適用することを提案した（論文 49）。弦理論では時空の次元を臨界次元という次元からずらすと、うまく定義できないことが知られている。しかし、光円錐ゲージの弦の場の理論の場合は、次元をずらしてもローレンツ不変性は破るものの、他の点では不都合は現れない。この正則化を用いて tree 4 点振幅を計算し、光円錐ゲージの超弦の場の理論において知られているコンタクトタームの問題と呼ばれている問題を解決できることを示した。

光円錐ゲージの弦の場の理論を次元正則化する場合、この正則化が理論のゲージ対称性を保っているかということが問題になる。弦理論のゲージ対称性は、世界面上でコンフォーマルゲージをとって量子化した際の BRS 対称性と同等であることが知られている。世界面上では、コンフォーマルゲージの理論は光円錐ゲージの理論に縦波方向のモードとゴーストのモードを付け加えることによって得られる。石橋は馬場・村上（理研）とともに、次元を臨界次元からずらした場合は、縦波方向のモードに対応する世界面上の理論を通常的自由場の理論と異なる理論にとってやれば、光円錐ゲージの理論と BRS 不変なコンフォーマルゲージの理論を対応させてやることが出来ることを示した（論文 50）。これにより、我々の提案した正則化はゲージ対称性を保つことが間接的に証明された。

石橋は馬場・村上（理研）とともに、ゲージ不変性に関する結果を超対称性のある場合に拡張した（論文 51）。また、この結果を元に光円錐ゲージの超弦の場の理論の散乱振幅を計算し、次元正則化を用いれば、外線がボゾンであるような全ての tree 振幅について、コンタクトタームの問題を解決できることを示した（論文 52）。

(2) 重力理論／ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅

重力理論とゲージ理論が同じ理論の異なった記述であるという重力理論／ゲージ理論双対性の背後には可解構造があることが知られてきている。その応用として、この可解構造を用いて超対称ゲージ理論の強結合グルーオン散乱振幅を解析する研究が進展している。佐藤は酒井（慶應義塾大学）と共に、3次元反ドジッター時空中の弦について、有限帯解と呼ばれる非常に大きなクラスの古典解を構成し、強結合散乱振幅を記述する光的多角形を境界を持つ解を系統的に探索した。その結果、6点散乱の collinear 極限に対応する新たな厳密解を見いだした（論文 53, 54）。

また、一般の n -点散乱振幅について、対応する弦の古典解の具体的な表式を用いず、解に現れるデータ（ストークスデータ）から強結合散乱振幅を求める方法が提案されていた。佐藤は初田（理化学研究所）、伊藤（東京工業大）、

酒井（慶應義塾大学）と共に、3次元反ドジッター時空中の解について10、12点散乱の場合にこの方法を用い、散乱振幅を記述する積分方程式を導いた。さらに、一般のn点散乱振幅を記述する積分方程式は、一般化されたパラフェルミオン共形場理論を摂動して得られる可解模型である homogeneous sinh-Gordon 模型の熱力学的ベーテ仮説方程式であることを予想した。この予想は我々の論文とほぼ同時期に現れた別グループの論文の結果を用いて、3次元反ドジッター時空の場合は完全に、5次元反ドジッター時空の場合は現在のところ部分的に確認されている（論文55）。

【3】 高エネルギー・ハドロン物理

（八田佳孝、植田高寛）

(1) 電子陽電子消滅の終状態における軟グルオンの分布と相関の研究

ジェットから放出される軟グルオンの分布と、BFKL発展における軟グルオンの間に厳密な共形写像が存在することが昨年八田によって示された。論文56において八田らはこの対応関係をさらに深く掘り下げ、non-global logarithm をすべての次数まで考慮した軟グルオンの角度分布や角度相関を解析的に導いた。

(2) ゲージ弦対応に基づく偏極深非弾性散乱の解析

陽子はスピン2分の1を持っているが、これがどのようにクォークとグルオンに分配されているかはQCDの重要問題の一つである。八田、植田、XiaoはAdS/CFT対応を用いて偏極深非弾性散乱を解析し、偏極構造関数のスモールエックスでの振舞いを決定した。この結果に基づき、強結合ではヘリシティーの寄与は抑制され、軌道角運動量の寄与が主要になると議論した（論文57）。

(3) LHCにおけるジェットからのエネルギーフローの研究

LHCにおける新粒子は高い横運動量を持つジェットとして観測される可能性がある。この際、新粒子を含むジェットと通常のQCDのジェットを区別することは容易ではない。八田と植田はジェットから大角度で放出されるエネルギーの量をそれぞれの場合に計算し、これにより2つのジェットを区別する可能性を議論した（論文58）。

(4) AdS/CFT対応に基づくオデロンの研究

オデロンとは高エネルギーハドロン衝突において交換される荷電パリティ奇のRegge粒子であり、陽子と反陽子の断面積の差を記述する。八田らはAdS/CFT対応を用いてD-braneの間にB場を交換する振幅を計算し、陽子-陽子散乱と陽子-反陽子散乱の全断面積の差を解析的に導いた。陽子-反陽子の断面積のほうが大きいことが実験的に知られているが、エネルギーを上げていくとこれが逆転するという予言を行った（論文59）。

(5) sector decomposition における幾何学的解法

摂動論のループ積分に現れる赤外発散を系統的に分離する手法として sector decomposition と呼ばれる方法がある。これは積分領域分割と変数変換を行うことによって発散部分を因子化するものであるが、この過程は一意ではなく、従来行われていた方法では、結果として非常に長い数式が得られる傾向があり問題であった。植田らは、この問題を幾何学の問題に帰着させることで見通しよく領域分割と変数変換をすることができ、比較的短い数式を得ることが可能なことを示した (論文 60)。

(6) 仮想光子中の非偏極パートン分布におけるクォーク質量効果

光子は量子効果を通してハドロ的な振る舞いをすることが可能であり、この意味で光子中のパートン分布関数が定義される。仮想光子中のパートン分布関数は、摂動論的 QCD によって評価することができる。植田らは、仮想光子中の非偏極パートン分布に対するクォーク質量の効果を QCD 結合定数での next-to-leading order までの計算を行って調べた (論文 61)。

〈論文〉

1. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, Physical point simulation in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 81, No. 7 (2010) ref. 074503, pp.1-12
2. PACS-CS Collaboration: 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, SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 80, No. 5 (2009) ref. 054502, pp.1-17
3. PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD, Phys. Rev. D, submitted (arXiv:0912.1383[hep-lat])
4. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, Precise determination of the strong coupling constant in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD with the Schrödinger functional scheme, JHEP 10, (2009) ref. 053, pp.1-20
5. H. Tadano, Y. Kuramashi, T. Sakurai, Application of preconditioned block BiCGGR to the Wilson-Dirac equation with multiple right-hand sides in lattice QCD, Comput. Phys. Commun., in press.

6. T. Sakurai, H. Tadano, Y. Kuramashi, Application of block Krylov subspace algorithms to the Wilson-Dirac equation with multiple right-hand sides in lattice QCD, *Comput. Phys. Commun.* 181, No. 1 (2010) pp.113-117.
7. H. Tadano, T. Sakurai, Y. Kuramashi, Block BiCGGR: a new block Krylov subspace method for computing high accuracy solutions, *JSIAM Lett.* 1, (2009) pp.44-47.
8. Yoshinobu Kuramashi for PACS-CS Collaboration, Physical point simulations in 2+1 flavor lattice QCD, *Proceeding of Science (LAT2009)* 110.
9. Y. Taniguchi for PACS-CS Collaboration, Determination of the running coupling constant α_s for $N_f = 2+1$ QCD with the Schroedinger functional scheme, *Proceeding of Science (LAT2009)* 208.
10. Y. Namekawa for PACS-CS Collaboration, Heavy-light mesons in 2+1 flavor lattice QCD, *Proceeding of Science (LAT2009)* 111.
11. S. Aoki, O. Bär, S. Sharpe, Vector and Axial Currents in Wilson Chiral Perturbation Theory, *Physical Review D* 80 No.1 (2009) 014506.
12. S.Aoki, T.W.Chiu, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.H.Hsieh, T.Kaneko, H.Matsufuru, J.Noaki, T.Onogi, E.Shintani, N.Yamada (JLQCD, TWQCD collaborations), Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry, *Phys. Rev. D* 80 (2009) 034508.
13. Sinya Aoki and Hidenori Fukaya, Chiral perturbation theory in a theta vacuum, *Phys. Rev. D* 81 (2010) 034022.
14. Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Noriyoshi Ishii, Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations, *Prog. Theor. Phys.* 123 (2010) 89-128.
15. JH. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (LQCD collaboration), Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD, *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 122002.
16. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, Strong coupling constant from vacuum polarization functions in three-flavor lattice QCD with dynamical overlap fermions, (arXiv:1002.0371 [hep-lat])
17. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Application of the operator product expansion to the short distance behavior of nuclear potentials, *JHEP* 05 (2010) 008.
18. S. Aoki, Lattice QCD, *Nucl. Phys.* A827 (2009) 145c-152c.

19. S. Aoki, From Quarks to Nuclei: Challenges of Lattice QCD, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 195 (2009) 281-287.
20. Sinya Aoki, Oliver Bär, Stephen R. Sharpe, The vector and axial currents in Wilson chiral perturbation theory, PoS(LAT2009)084.
21. H. Ohki, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, Nucleon sigma term and strange quark content in 2+1-flavor QCD with dynamical overlap fermions, PoS(LAT2009)124.
22. Sinya Aoki, Pion physics on the lattice, PoS(CD09)070,
23. Sinya AOKI, Janos Balog and Peter Weisz, The repulsive core of the NN potential and the operator product expansion, PoS(LAT2009)132.
24. T. Kaneko, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, J. Noaki, E. Shintani and N. Yamada, Flavor-singlet mesons in $N_f = 2 + 1$ QCD with dynamical overlap quarks, PoS(LAT2009) 107.
25. K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada (JLQCD collaboration), Calculation of nucleon strange quark content with dynamical overlap quarks, PoS(LAT2009) 141.
26. J. Noaki, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H.Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada (JLQCD, TWQCD Collaborations), Chiral properties of light mesons with $N_f = 2 + 1$ overlap fermions, PoS(LAT2009) 096.
27. E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD Collaboration), π^0 to two-photon decay in lattice QCD, PoS(LAT2009) 246.
28. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD Collaboration), Determination of α_s in 2+1-flavor QCD through vacuum polarizationfunction, PoS(LAT2009) 207.
29. Y. Ikeda, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki, Kaon-Nucleon potential from lattice QCD, to be published in the Proceedings of the 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (fb19) (arXiv:1002.2309[hep-lat])
30. K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials in lattice QCD, PoS(Lattice 2009) 126.
31. T. Inoue for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon potentials in the flavor SU(3) limit from lattice QCD, PoS LAT2009 (2009) 133.

32. T. Doi, M. Deka, S.-J. Dong, T. Draper, K.-F. Liu, D. Mankame, N. Mathur and T. Streuer, Nucleon strangeness form factors from $N_f = 2 + 1$ clover fermion lattice QCD, *Phys. Rev. D* 80 (2009) 094503.
33. T. Doi, M. Deka, S.-J. Dong, T. Draper, K.-F. Liu, D. Mankame, N. Mathur and T. Streuer, The calculation of nucleon strangeness form factors from $N_f = 2 + 1$ clover fermion lattice QCD, *PoS LAT2009* (2009) 134.
34. K. Sasaki, N. Ishizuka, T. Yamazaki, M. Oka (PACS-CS Collaboration), S-wave pi K scattering length from lattice QCD, *Proceeding of Science (Lattice 2009)* 098.
35. N. Ishizuka, Derivation of Lüscher's finite size formula for $N\pi$ and NN system, *Proceeding of Science (Lattice 2009)* 119.
36. T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD, *Phys. Rev. D* 79, No.5 (2009) ref.051501(R), pp.1-5
37. 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, No.6 (2009) ref.064027, pp.1-7
38. T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing , *PoS(LATTICE 2008)* (2009) ref.174, pp.1-7
39. S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, N. Ukita, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Equation of state at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks, *PoS(LATTICE 2008)* (2009) ref.189, pp.1-7
40. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Magnetic and electric screening masses from Polyakov-loop correlations, *PoS(LATTICE 2008)* (2009) ref.194, pp.1-7
41. H. Ohno, T. Umeda, K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD, *PoS(LATTICE 2008)* (2009) ref.203, pp.1-7
42. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Free energies of heavy quarks in full-QCD lattice simulations with Wilson-type quark action, *Nucl. Phys. A* 830 (2009) 247c-250c

43. K. Kanaya, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Fixed scale approach to the equation of state on the lattice , Nucl. Phys. A 830 (2009) 801c-804c
44. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, H. Ohno and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Heavy-quark free energy at finite temperature with 2+1 flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach, PoS(LATTICE 2009) (2010) ref.165, pp.1-7
45. K. Kanaya, S. Aoki, H. Ohno, T. Umeda, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa (WHOT-QCD Collaboration), Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach, PoS(LATTICE 2009) (2010) ref.190, pp.1-7
46. S. Ejiri, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Equation of State and Heavy-Quark Free Energy at Finite Temperature and Density in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action , Phys. Rev. D submitted (arXiv:1003.3387[hep-lat])
47. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov-Line Correlations in Two-flavor Lattice QCD, Phys. Rev. D (2010) to be published
48. Y. Aoki, T. Blum, H. W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. J. Tweedie, T. Yamazaki, and J. M. Zanotti (RBC and UKQCD Collaborations), Nucleon isovector structure functions with dynamical (2+1)-flavor domain wall fermions lattice QCD, Phys. Rev. D, submitted (arXiv:1003.3387[hep-lat])
49. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization, JHEP **0910** (2009) 035
50. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone gauge string field theory in noncritical dimensions, JHEP **0912** (2009) 010
51. N. Ishibashi, Y. Baba and K. Murakami, Light-cone gauge NSR strings in noncritical dimensions, JHEP **1001** (2010) 119
52. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization II, UTHEP600
53. K. Sakai and Y. Satoh, A note on string solutions in AdS_3 , JHEP **0910** (2009) 001.
54. K. Sakai and Y. Satoh, Constant mean curvature surfaces in AdS_3 , JHEP **1003** (2010) 077.

55. Y. Hatsuda, K. Ito, K. Sakai and Y. Satoh, Thermodynamic Bethe ansatz equations for minimal surfaces in AdS_3 , JHEP **1004** (2010) 108.
56. E. Avsar, Y. Hatta and T. Matsuo, Soft gluons away from jets: Distribution and correlation, JHEP 0906 (2009) ref.011, pp.1-24.
57. Y. Hatta, T. Ueda and B. Xiao, Polarized DIS in $N=4$ SYM: Where is spin at strong coupling?, JHEP 0908 (2009) ref.007, pp.1-23.
58. Y. Hatta and T. Ueda, Jet energy flow at the LHC, Phys. Rev. D 80, No. 7 (2009) ref. 074018, pp.1-13.
59. E. Avsar, Y. Hatta and T. Matsuo, Odderon in baryon-baryon scattering from the AdS/CFT correspondence, JHEP 1003 (2010) ref.037, pp.1-23.
60. T. Kaneko and T. Ueda, A geometric method of sector decomposition, Comput. Phys. Commun., in press, arXiv:0908.2897 [hep-ph].
61. Y. Kitadono, K. Sasaki, T. Ueda and T. Uematsu, Heavy quark effects on parton distribution functions in the unpolarized virtual photon up to the next-to-leading order in QCD, Phys. Rev. D 81 (2010) 074029.
62. T. Uematsu, Y. Kitadono, K. Sasaki and T. Ueda, Heavy quark mass effects on the virtual photon structure in QCD, Proceeding of Sciences (RADCOR2009) 32, 1-6.

〈著書・総説等〉

1. 八田佳孝「高エネルギー QCD 反応におけるダイポール散乱振幅の因子化の研究」原子核研究 54 No.1 (2009) pp.24-32.

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 上田 悟
「Wilson Chiral Perturbation Theory for twisted mass lattice QCD (ツイストされた質量を持った格子 QCD に対するウィルソンカイラル摂動論の研究)」
2. Nguyen Hoang Oanh
「Pion form factor from 2+1 dynamical flavor lattice QCD (2 + 1 動的フレーバーの格子量子色力学からのパイ中間子形状因子)」

3. 村野 啓子

「Energy dependence of nucleon-nucleon potentials from Lattice QCD (格子 QCD から求める核子間ポテンシャルのエネルギー依存性)」

[修士論文]

1. 齋藤 華

「クォーク質量が大きい領域での QCD 有限温度相転移の次数に関する研究」

2. 渡邊 龍祐

「カイラル摂動論による 2 体パイ中間子ポテンシャルの研究」

〈非常勤講師・集中講義〉

1. 青木 慎也 「Nuclear Forces from Lattice QCD」,

The 13th Taiwan Nuclear Physics Summer School, National Chiao-Tung University, Hsinchu, Taiwan, June 29-July 4, 2009.

2. 青木 慎也 「Lattice QCD and Nuclear Physics」,

Les Houches Summer School “Modern perspective in lattice QCD: Quantum field Theory and high performance computing”, Ecole de Physique, Les Houches, France, August 3-28, 2009.

3. 八田佳孝、「Small-x physics in QCD and gauge/string duality」,

大阪市立大学理学部 2009 年 11 月 4 日～6 日

〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. 藏増 嘉伸 「Physical Point Simulations in 2+1 Flavor Lattice QCD」,

The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009)

2. 谷口 裕介 「Determination of running coupling α_s for $N_f = 2 + 1$ QCD with Schrödinger functional scheme」,

The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009)

3. 浮田 尚哉 「Nucleon axial charge in 2+1 flavor lattice QCD with O(a) improved Wilson quark action」,

The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Beijing, China, July 26-31, 2009)

4. 滑川 裕介 「Heavy-light mesons in 2+1 flavor lattice QCD」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China,
July 25-31, 2009)
5. 滑川 裕介 「Charmed mesons in lattice QCD」 (招待講演),
KEK workshop on HEAVY QUARK PHYSICS IN QCD, (Tsukuba, Japan,
Sep. 7-8, 2009)
6. 谷口 裕介 「Non-perturbative renormalization of $N_f = 2+1$ QCD with Schrödinger
functional scheme」 ,
2009 Taipei Workshop on Lattice QCD (National Taiwan University, Taiwan,
Dec. 13-15, 2009)
7. 青木 慎也 「Baryon interaction from Lattice QCD」 (招待講演),
The miniworkshop “Light Quark Masses and Hadron Physics (From quarks to
life)” (Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2-5 June, 2009.)
8. 青木 慎也 「Pion Physics on the lattice」 (基調講演),
Sixth International Workshop on Chiral Dynamics, (University of Bern, Switzer-
land, July 6-10, 2009.)
9. 青木 慎也 「Nuclear Forces from Lattice QCD」 (基調講演),
KITPC Program “Lattice Quantum Chromodynamics”, (KITPC@CAS, Bei-
jing, China, July 6-25, 2009.)
10. 青木 慎也 「Repulsive core of the NN potential and operator product expan-
sion」 (招待講演),
(The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, Peking Uni-
versity, Beijing, China, July 25-31, 2009.)
11. 青木 慎也 「Baryon-Baryon-Interaction from Lattice QCD」 (招待講演),
The 5-th International Conference on Quark and Nuclear Physics, (Beijing,
September 21-26, 2009.)
12. 青木 慎也 「Baryon Interactions from Lattice QCD」 (招待講演),
The 7-th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, (University of Tsukuba,
Tsukuba, Japan, November 9-13, 2009.)
13. 青木 慎也 「The repulsive core of the nucleon-nucleon potentials and the op-
erator product expansion」 (招待講演),
2009 Taipei Workshop on Lattice QCD, National Taiwan University, (Taipei,
Taiwan, December 13-15. 2009)
14. 青木 慎也 「A challenge in lattice QCD」 (招待講演),
Conference on Computational Physics 2009, (Kaohsiung, Taiwan, December
15-19, 2009.)

15. 青木 慎也 「Computing Facilities in Japan」 (招待講演),
The First ANPhA Symposium, (J-PARC, Tokai, Japan, Jan. 18-19, 2010.)
16. 村野 啓子 「Energy dependence of nucleon-nucleon potentials from lattice QCD」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Beijing, China, July. 25-31, 2009)
17. 井上 貴史 「Baryon-baryon potentials in the flavor SU(3) limit from lattice QCD」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Beijing, China, July 26-31 2009)
18. 土井 琢身 「Nucleon Strangeness Form Factors from $N_f = 2+1$ Clover Fermion Lattice QCD」 (招待講演),
KITPC conference on Lattice Quantum Chromodynamics (Beijing, China, Jul. 6-25, 2009)
19. 土井 琢身 「The calculation of nucleon strangeness form factors from $N_f = 2+1$ clover fermion lattice QCD」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Beijing, China, Jul. 26-31, 2009)
20. 土井 琢身 「Nucleon strangeness form factors from $N_f = 2 + 1$ clover fermion lattice QCD」 ,
‘Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (HAW09)(Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009)
21. 石塚 成人 「Derivation of Lüscher’s finite size formula for $N\pi$ and NN system」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Beijing, China, July 25 - 31, 2009)
22. 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)
23. 金谷 和至 「Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach」 ,
The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2009) (Peking University, Beijing, China, Jul.26-31, 2009)
24. 齋藤 華 「The QCD phase diagram in heavy quark region」 ,
YITP international workshop on ”New Frontiers in QCD 2010 -Exotic Hadron Systems and Dense Matter-” (NFQCD2010) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Mar.8-19, 2010)

25. 金谷 和至 「QCD thermodynamics at zero and finite densities with improved Wilson quarks」 (招待講演) ,
YITP international workshop on "New Frontiers in QCD 2010 -Exotic Hadron Systems and Dense Matter-" (NFQCD2010) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Mar.8-19, 2010)
26. 吉江 友照 「International Lattice Data Grid」 (招待講演) ,
HackLat2009 (NeSC, Edinburgh, May 06-07, 2009)
27. 藏増 嘉伸 「Site Report on Physics Plan from Japan」 ,
ILDG14 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, June.05, 2009)
28. 浮田 尚哉 「Site Report on Physics Plan from Japan」 ,
ILDG15 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, Dec.04, 2009)
29. 吉江 友照 「Metadata Working Group report」 ,
ILDG15 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, Dec.04, 2009)
30. 山崎 剛 「Nucleon structure functions from $N_f=2+1$ dynamical domain wall fermions」 (招待講演) ,
The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (Yamagata, Japan, Sep. 15-18, 2009)
31. Nobuyuki Ishibashi 「Light-cone gauge string field theory in noncritical dimensions」 (招待講演),
APCTP Focus Program on Current Trends in String Field Theory (Pohang, Korea, Dec. 7-18, 2009)
32. Yuji Satoh 「Entanglement through conformal interfaces」 ,
IPMU Focus Week "Condensed matter physics meets high energy physics"
(Kashiwa, Japan, Feb. 8 -12, 2010)
33. 八田 佳孝 「Polarized DIS and the AdS/CFT correspondence」 (招待講演) ,
The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (Yamagata, Sept. 15-18, 2009)
34. 八田 佳孝 「Jets at weak and strong coupling」 (招待講演) ,
International workshop and symposium in celebration of Al Mueller's 70th birthday (New York, USA, Oct.13-15, 2009)
35. 八田 佳孝 「Energy flow away from jets」 ,
QCD in connection with BSM study at LHC (IPMU, Kashiwa, Nov.10-13, 2009)

[国内学会、研究会]

1. 藏増 嘉伸「物理的クォーク質量における 2+1 フレーバー格子 QCD」,
日本物理学会秋季大会、招待講演 (甲南大学、神戸、2008年9月10-13日)
2. 滑川 裕介「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による重-軽中間子スペクトル及び崩壊定数」,
日本物理学会秋季大会 (甲南大学、神戸、2009年9月10-13日)
3. 浮田 尚哉 「クローバーフェルミオンを用いた $N_f=2+1$ 格子 QCD での核子の軸性ベクトル結合定数」,
日本物理学会 2009 年秋季大会 (甲南大学岡本キャンパス、神戸、2009年9月10日-13日)
4. 滑川 裕介「重いフレーバーを含んだ領域での格子 QCD によるスペクトロスコピー」,
新学術領域「新ハドロン」研究会、招待講演 (名古屋大学、名古屋、2009年11月27-28日)
5. 滑川 裕介「PACS-CS results for heavy quark physics in $N_f=2+1$ lattice QCD」,
理研・格子 QCD 研究会、招待講演 (理化学研究所、和光、2009年12月22日)
6. 青木 慎也, 分科会 E 「物質の起源と構造」モデレーターおよび全体討議「世界に誇る拠点を目指して」パネリスト,
次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2009 -世界に誇る拠点を
目指して- (MY PLAZA、東京、2009年10月7、8日)
7. 青木 慎也「分野5『物質と宇宙の起源と構造』について」,
合同シンポジウム「次世代スーパーコンピューターでせまる物質と宇宙の起源
と構造」第1日『戦略機関が目指すもの』(東京ステーションコンファレンス、
東京、2010年3月15日)
8. 村野 啓子 「格子 QCD からもとめる核力ポテンシャルのエネルギー依存性」
盛岡研究会「バリオン間相互作用に基づく核物質の構造」,
(つなぎ温泉、盛岡市、2009年6月25-27日)
9. 村野 啓子「格子 QCD による核子間ポテンシャルのエネルギー依存性と non-
locality」,
日本物理学会年会 (岡山大学津島キャンパス、岡山、2010年3月20-23日)
10. 井上貴 史「格子 QCD によるフレーバー SU(3) 極限でのバリオン間ポテンシャル」,
新学術領域キックオフ研究会「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」(名古屋大学、2009年11月27日-28日)

11. 井上 貴史「格子 QCD によるフレーバー SU(3) 極限でのバリオン間ポテンシャル」,
日本物理学会第 65 回年次大会 (岡山大学、2010 年 3 月 20 日 - 23 日)
12. 土井 琢身「Lattice QCD approach to Three Nucleon Force」,
日本物理学会年会 (岡山大学、岡山、2010 年 3 月 20-23 日)
13. 土井 琢身「Nucleon strangeness form factors from $N_f = 2 + 1$ clover fermion lattice QCD」,
KEK Workshop on “Nuclear and Hadron Physics” (KEK、つくば、2009 年 8 月 11-13 日)
14. 石塚 成人「核子-中間子、核子-核子散乱位相の格子 QCD 計算のための有限体積公式の導出」,
日本物理学会 (甲南大学、兵庫、2009 年 9 月 10-13 日)
15. 金谷 和至「QCD at finite temperatures and densities on the lattice with improved Wilson quarks」,
KEK 理論研究会 2010 (高エネルギー加速器研究機構、茨城、Mar.11-12, 2010)
16. 斎藤 華「クォーク質量が大きい領域での QCD 有限温度相転移の次数について」,
日本物理学会 第 65 回年次大会 (岡山大学、岡山、Mar.20-23, 2010)
17. 吉江 友照「格子 QCD データグリッド ILDG/JLDG」(招待講演),
平成 21 年度 ITBL シンポジウム (海洋研究開発機構 横浜研究所、横浜、2009 年 5 月 29 日)
18. 吉江 友照「Hepnet-J/sc 報告」,
Hepnet-J ユーザー会 (KEK、つくば、2009 年 10 月 2 - 3 日)
19. 山崎 剛「Hadron scattering from lattice QCD」(招待講演),
新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」A01 班「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」第一回 A01 班研究会 (大阪大学、大阪、2009 年 9 月 14 日)
20. 山崎 剛「Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD」(招待講演),
理研・格子 QCD 研究会 (理化学研究所、埼玉、2009 年 12 月 22 日)
21. 山崎 剛「格子 QCD を用いた $\Delta I = 3/2$ K 中間子崩壊行列要素の直接的計算」(若手奨励賞記念講演),
日本物理学会 (岡山大学、岡山、2010 年 3 月 20 - 23 日)
22. 石橋 延幸「Light-cone gauge string field theory in noncritical dimensions」(招待講演),
弦理論研究会 (2010) (立教大学、東京、2010 年 1 月 5, 6 日)

23. 八田 佳孝「ゲージ弦対応に基づく偏極深非弾性散乱の解析」,
日本物理学会秋季大会 (甲南大学、神戸、2009年9月10日-13日)
24. 八田 佳孝「高エネルギー衝突におけるダイポール散乱振幅の因子化の破れの研究」,
日本物理学会年次大会 若手奨励賞受賞記念講演 (岡山大学、岡山 2010年3月20日-23日)
25. 植田 高寛「Tevatron 及び LHC での 2 ジェット事象における gap survival probability について」,
日本物理学会秋季大会 (甲南大学、神戸、2009年9月10-13日)
26. 植田 高寛「計算幾何学的アルゴリズムに基づく sector decomposition の方法」,
日本物理学会年会 (岡山大学、岡山、2010年3月20-23日)

〈受賞〉

1. 山崎 剛, 日本物理学会 第四回若手奨励賞 (素粒子論領域) 「格子 QCD 数値計算による K 中間子崩壊過程の解析」, 2010年3月

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 青木 慎也 他,
研究会「バリオン間相互作用に基づく核物質の構造」
(つなぎ温泉、ホテル紫苑、盛岡、2009年6月25日ー27日)
参加者 約 40 名
2. 青木 慎也 他,
次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」・科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」 合同シンポジウム「次世代スーパーコンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」
(東京ステーションコンファレンス 605 A+B+C、東京 2010年3月15日、東京大学 理学部一号館 小柴ホール、東京、2010年3月16日)
参加者 約 100 名

II . 素粒子実験グループ

教授	金 信弘, 受川 史彦
講師	原 和彦, 武内 勇司, 佐藤構二
研究科特別研究員	倉田 正和, 永井康一
科研費研究員	三宅 秀樹, 永野間 淳二, 戸村 友宣
大学院生	19 名
研究生	1 名
学群 4 年次生	6 名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験 CDF, ATLAS, および ILC に参加している。CDF は現在進行中, ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始, ILC は検討設計中の実験である。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。また, ニュートリノ崩壊の探索を目的とした高分解能光検出器の開発を行っている。

【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は, 米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり, 日本をはじめアジア, 北米, 欧州の研究機関・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 年に前回の物理実験 Run I が終了した後, テバトロン加速器は, 大幅な増強が行われ, ビーム輝度およびエネルギーが増大した。これに伴い CDF も, 検出器の増強を行ってきたが, 新しい検出器の建設を終え, 2001 年 6 月より本格的に物理データの収集 Run II を開始した。

テバトロン加速器の瞬間ルミノシティはこれまでに, 最高値 $\mathcal{L} = 4.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されており (2010 年 4 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} , 全積分ルミノシティは 8.8 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 7.3 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

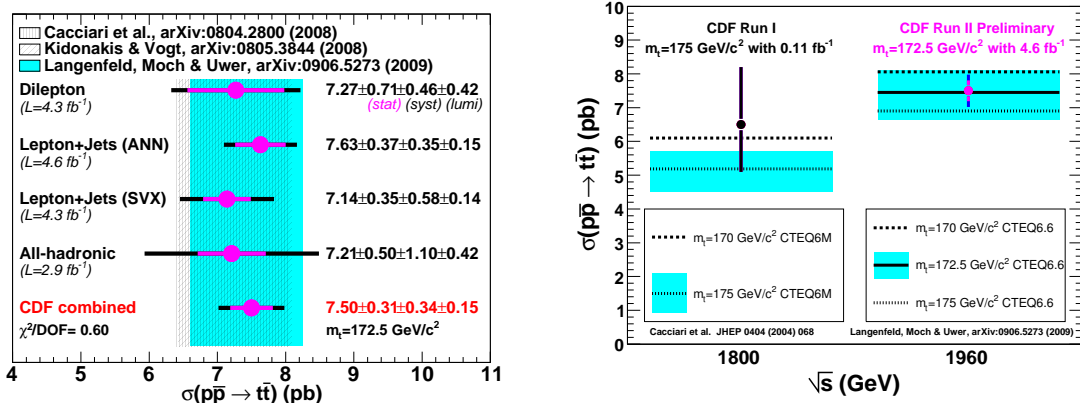


図 1: 左: CDF 実験におけるトップクォークの対生成断面積の測定一覧. 右: 生成断面積の重心系エネルギー依存性.

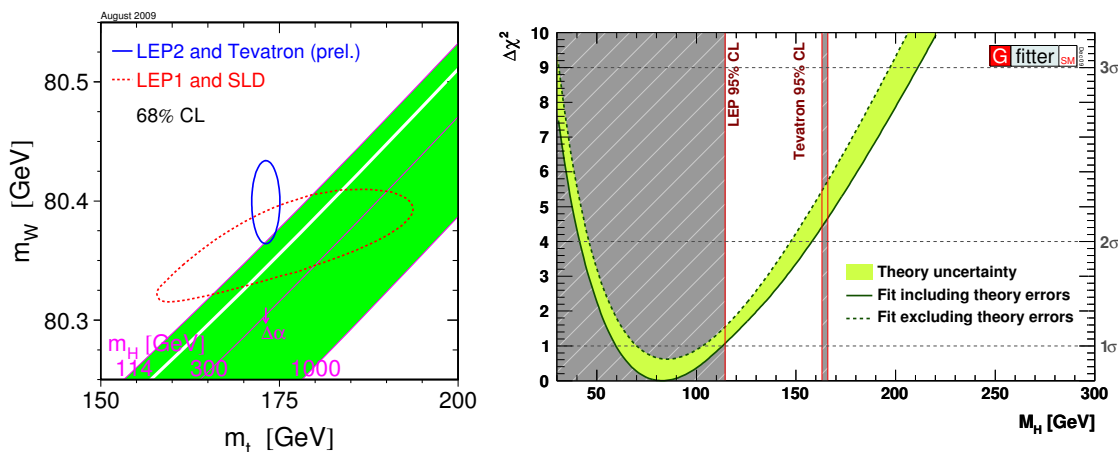


図 2: 左: W ボソンとトップクォークの質量の測定. 右: ヒッグス粒子の質量に対する制限.

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. その生成断面積が多くの終状態を用いて測定されている (図 1). すべてのチャンネルを総合すると, 4.6 fb^{-1} 相当のデータを用いて $\sigma(\bar{p}p \rightarrow t\bar{t}X) = 7.50 \pm 0.31 \pm 0.34 \pm 0.15 \text{ pb}$ という結果を得た. これは, その重心系エネルギー依存性ととも, 摂動論的 QCD による理論予言値とよく一致する.

質量も同様に多くの終状態を用いて測定されている. CDF 実験の平均値は $m_{\text{top}} = 172.6 \pm 0.9 \pm 1.2 \text{ GeV}/c^2$ であり, D0 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. 標準理論ヒッグス粒子の質量について $m_{\text{Higgs}} = 83^{+30}_{-23} \text{ GeV}/c^2$ (68% CL) および $m_{\text{Higgs}} < 154 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) を得た.

その他, 2009 年度に得られた結果に, dilepton チャンネルを用いたトップクォーク対生成におけるスピン偏極度相関の測定がある. トップクォークは質量が大きいため, その寿命は 10^{-24} s 程度と予測される. これは, クォークのハドロン化の時間より短く, よって, トップクォークはクォークのまま崩壊すると予測される. その寿命を直接に測定することはほぼ

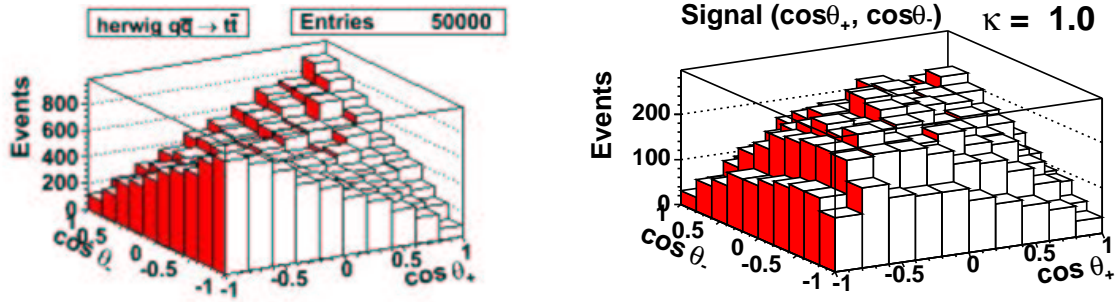


図 3: 素過程 $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ による $t\bar{t}$ 対生成での荷電レプトンの角度相関分布 (モンテカルロ事象)。左右は, 検出器の有感領域の影響を考慮する前後。

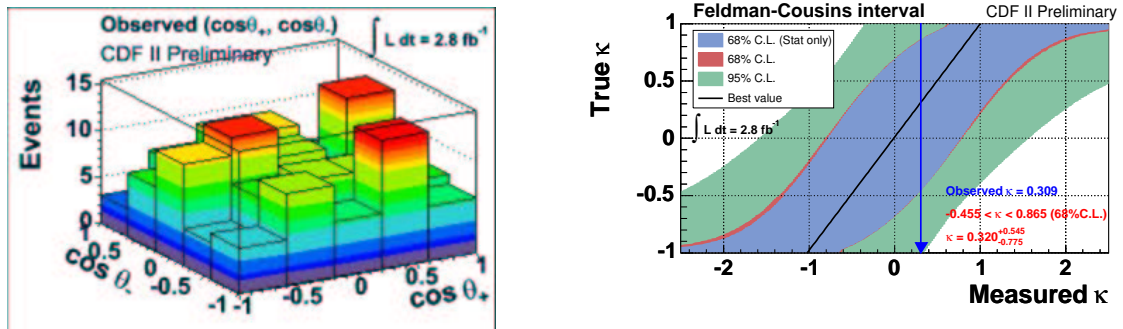


図 4: 左: $t\bar{t}$ 対生成における荷電レプトンの角度相関分布 (実データ)。右: 相関パラメータ κ に対する制限。

不可能であるが, 以下のように対生成におけるスピン相関を観測することにより間接的に検証される。

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 の重心系エネルギー 1.96 TeV では, 前者が 85% と支配的である。この過程での閾値近くの生成では, $t\bar{t}$ 系の角運動量は $|1, \pm 1\rangle$ となる。これは強い相互作用のクォークとグルオンの結合がベクトル型であることによる。 t と \bar{t} のスピンは, 適当な量子化軸を用いると互いに平行であり, つまり相関が存在する。クォークのスピン情報は通常はハドロン化の過程で失われるが, ハドロン化前に崩壊するトップクォークの場合では, 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 ボソンからの荷電レプトン ℓ の飛翔方向をトップクォークの静止系で測定すると, これ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, t および \bar{t} からのレプトンの角度分布の相関を観測するのが感度が高い。この分布は

$$\frac{1}{N} \frac{d^2 N}{d \cos \theta_+ d \cos \theta_-} = \frac{1 + \kappa \cos \theta_+ \cos \theta_-}{4}$$

で与えられ, 相関が存在すれば, パラメータ κ が 0 でない値となる。素過程 $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ におい

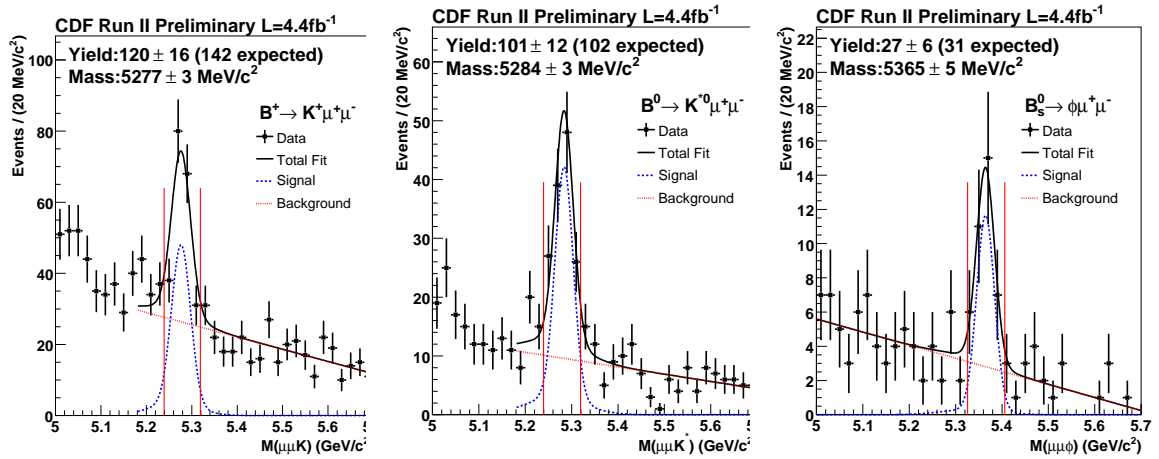


図 5: B 中間子の稀崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$, および $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ の信号 .

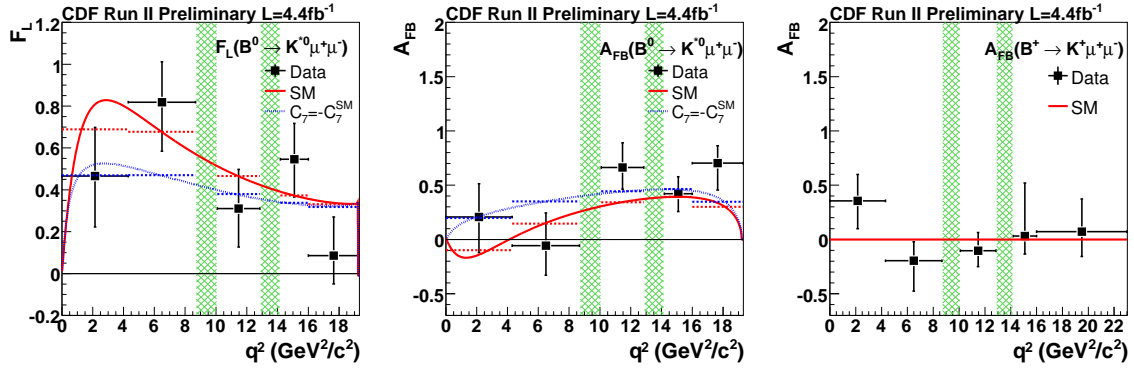


図 6: 左, 中: 崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ における偏極度とレプトン前後方非対称度の測定 . 右: 崩壊 $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ におけるレプトン前後方非対称度の測定 . すべての分布はレプトン対質量の二乗の関数として示されている .

ては $\kappa = +1.0$ である . この過程についてモンテカルロ・シミュレーションにより得られた分布を図 3 に示す . 図 4 は, 実データ (2.8 fb^{-1}) の分布であり, Feldman-Cousins 法を用いて, 相関パラメータを $\kappa = +0.320_{-0.775}^{+0.545}$ と決定した . これは予言値 $+0.8$ と矛盾しない .

(2) B 粒子の物理

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

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

中性流による稀崩壊 $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ は, いわゆる flavor-changing neutral current による崩壊で

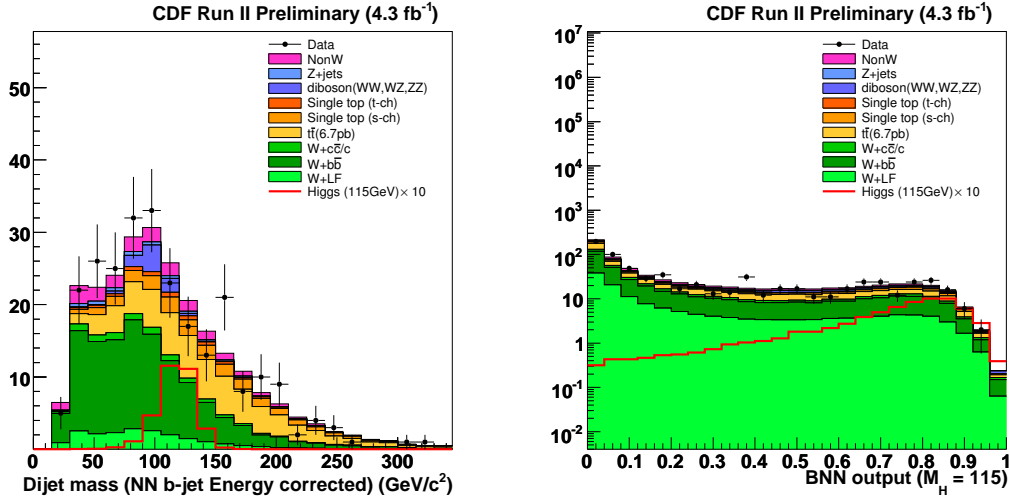


図 7: $\bar{p}p \rightarrow WHX \rightarrow \ell\nu b\bar{b}X$ 過程によるヒッグス粒子の探索．左：二次崩壊点を用いて同定した $b\bar{b}$ ジェット対の質量分布．右：人工ニューラルネットワークを用いた信号と背景事象の分離．

あり，Belle 実験が標準理論を超える新物理の兆候を観測するなど，注目を集めている．CDF 実験では 2009 年度に，この崩壊の測定結果を得た．図 5 に，再構成された $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ ， $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ ，および $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ の信号を示す．最後の崩壊様式は今回初めて観測された．崩壊 $B_d^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ は，偏極度およびレプトン角分布の前後方非対称度が新物理の探索に感度を持つ．図 6 にその結果を示す．Belle 実験と同程度の精度が得られており，結果は標準理論および新物理とともに矛盾しない．更なる統計精度の向上が望まれる．

(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生成は，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 7（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 7（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

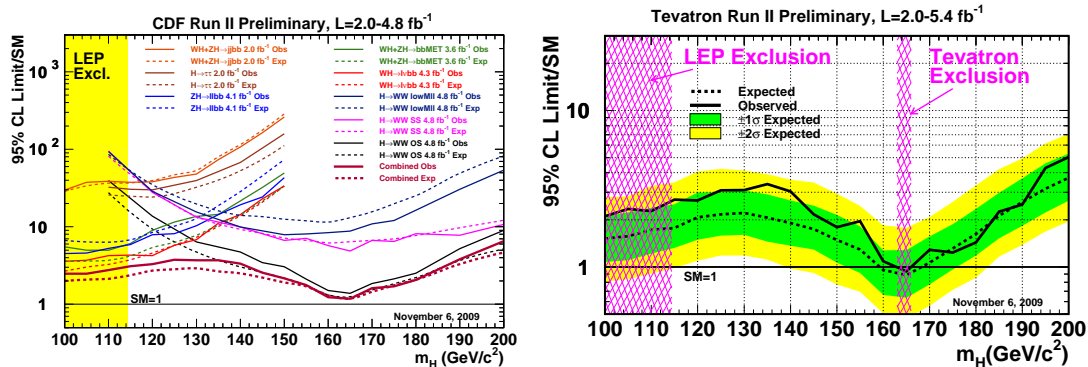


図 8: 標準模型ヒッグス粒子探索の結果．生成断面積の上限 (観測値) の理論値に対する比を質量の関数として示したもの．左: CDF 実験の結果, 右: CDF 実験と D0 実験の結果を総合したもの．

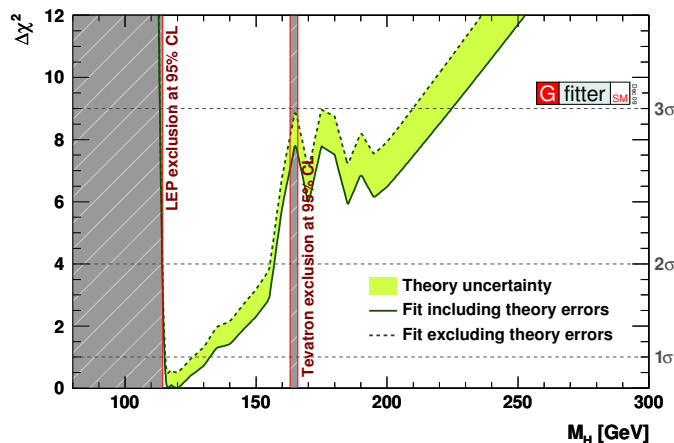


図 9: 標準模型ヒッグス粒子探索の質量に対する制限．間接探索と直接探索の結果を総合したもの．

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 8 (左) にこれらの上限値の標準理論による予言値に対する比を示す．低質量領域では実験値は予言値の数倍であり, 質量 $160 \text{ GeV}/c^2$ 付近では 1.5 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．質量範囲 $163 < M_{\text{Higgs}} < 166 \text{ GeV}/c^2$ 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おいて棄却された．

この直接探索の結果を踏まえて得られた, ヒッグス粒子の質量に対する制限を図 9 に示す．

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．同実験は, 米国 2011 年度の運転が決定し, それ以降も運転継続の可能性が検討されている．2011 年末には 12 fb^{-1} 相当のデータを蓄積する予定であり, ヒッグス粒子の質量に

対するより強い制限，標準理論を超える物理の探索など，素粒子物理学の知見を深める多くの結果を生み出すと期待される．

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州セルン研究所の陽子・陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) は，2008 年 9 月に発生したヘリウム漏れ事故を受け，安全設計を増強した上で，2009 年 11 月に初衝突を重心系エネルギー 900 GeV で実現した．2010 年 3 月には 7 TeV に衝突エネルギーを上げ，Tevatron 加速器が 1987 年以来保持してきた加速器の衝突エネルギーの世界記録を大幅に更新した．現在，ビーム輝度を向上中で，2-3 年後には設計エネルギーである 14 TeV を達成する予定である．筑波大学のグループは，LHC の ATLAS 実験に参加している．ATLAS では，質量の起源とされる Higgs 粒子や超対称性粒子，余剰次元に基づくブラックホールの探索などを進めることで，新しい真空や時空の概念に遭遇することも期待されている．

我々は，半導体を用いた中央部飛跡検出器 (SCT) の建設を担当し，SCT の運転調整とともに，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，読みだし回路一体型ピクセル検出器の開発を継続した．

(1) 内部飛跡検出器の調整

SCT を含む内部飛跡検出器の調整のために，我々は， Z 粒子が μ 粒子対に崩壊する事象を用いて運動量の絶対値を評価する方法をモンテカルロにより検討する事と，陽子衝突で発生する γ が電子陽電子にコンバートする割合を求め，検出器の質量分布を評価する事の 2 項目を進めた．

Z 粒子の質量は LEP 実験で精密に測定されているので，崩壊 μ 粒子の運動量測定から，内部飛跡検出器の運動量測定の校正ができる． μ 粒子からの内部輻射の影響を考慮できる解析方法を開発し，30-60 GeV/ c 運動量領域で 0.1-0.3% の校正が初期の段階で可能であると評価し，この解析方法の有効性を示した．

初衝突として収集された 900 GeV データを用いて， $\gamma \rightarrow e^+e^-$ を再構成しそのコンバート点の動径分布を求めた (図 10)．電荷の異なる 2 本の飛跡の共通接線を求めることでコンバートを再構成する方法で，カロリメータの情報を用いない．現状では，飛跡に SCT でのヒットを要求しているため，SCT の内部にあるピクセル 3 層と SCT の 2 層目までが明確なピークとして確認されている．900 GeV のシミュレーションデータに対する分布と比較したところ，両者は統計の範囲内で良く一致し，シミュレーションに用いている物質質量分布が間違っていないことが確認できた．更に統計を増やすことで，より精度の高い物質質量評価が可能となり，これは，物質質量が直接測定に影響を与える電子のエネルギー測定等に重要な情報となる．

(2) 物理解析の準備と最初の物理結果

ハドロン衝突実験では QCD ジェットの生成断面積計算に不定性があり，これは，超対称性粒子を含め，多くの測定をする際のバックグラウンドになる．そのため，初期の段階でデータをを用いた理解が必要となる．我々は， W 粒子と随伴生成するジェットを測定することで，

QCD 計算の信頼性を評価する。モンテカルロ計算として新しく開発した GR@PPA によるものを含め、ATLAS で標準的に用いられているものに対し、 $W + n$ -jets の生成断面積や横運動量分布などを比較した。図 11 は 2 番目に横運動量の大きな jet の分布で W の発生数で異なるジェネレータでの結果を比較している。今後、実際のデータと比較することで、より信頼できるものを選定し QCD 過程の細部の調整を行う。このように QCD 過程を測定、理解していくことは、トップクォークや新しい物理過程の測定には不可欠である。

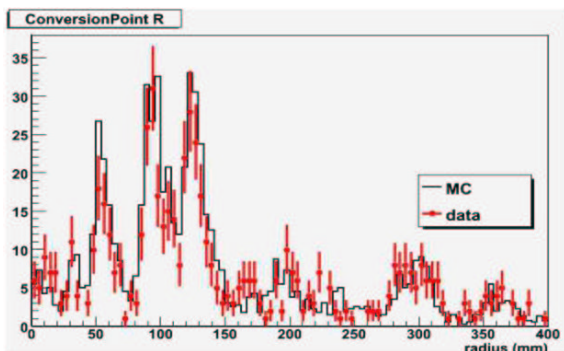


図 10: γ コンバージョン点の動径分布 (900 GeV データと MC の比較)

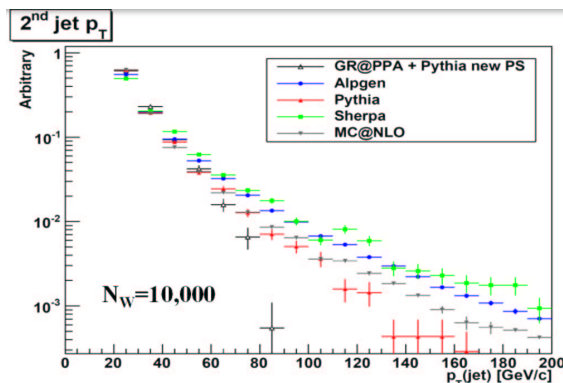


図 11: $W + jets$ 生成における 2 番目に横運動量の大きな jet の横運動量分布

現在、 π^0 , K_s , Λ , η , J/ψ (図 12) などのハドロン粒子が再構成され、検出器の理解・調整が進められている。ATLAS の最初の物理論文として、900 GeV 陽子衝突で発生する平均荷電粒子数および横運動量分布を測定した (図 13)。図から明らかなように、いくつかの比較に用いたモンテカルロは総じて 5–15% 少なめの値を示し、横運動量分布も測定値の不定性を考慮してもずれていることが分かる。

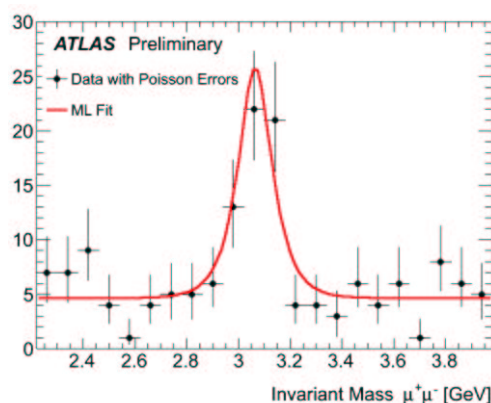


図 12: J/ψ 粒子の μ 粒子対による再構成。

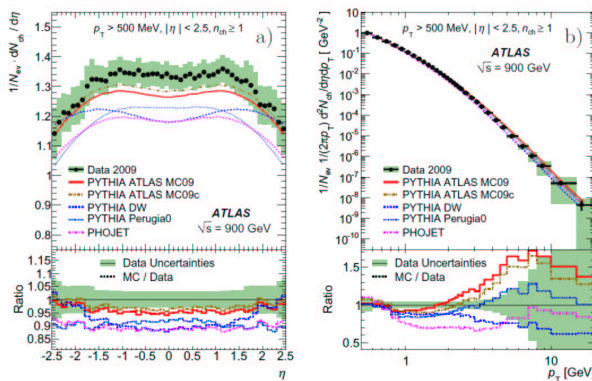


図 13: 重心系 900 GeV 陽子衝突による平均荷電粒子数の (a) 擬ラピディティおよび (b) 横運動量依存性。下段は測定値とモンテカルロとの比。

(3) 放射線耐性に優れた P 型シリコンセンサーの開発

LHC の設計最大輝度は $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であるが、加速器を順次増強することで 2020 年頃までに輝度をさらに一桁上げる SuperLHC 実験が計画されている。それに伴い、ATLAS の

SCT 検出器もさらに放射線耐性に優れたものに交換する必要がある。

現行のセンサー基板には n 型の高抵抗シリコンを用いているが、放射線を浴びると実効的に p 型不純物が増える。読み出し電極には p 型シリコンを用いているので、基板が p 型に変換した後は全空乏化電圧がシステムの耐圧 (500 V) を超えると電極での信号分離ができなくなる。そのため、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。

p 型基板を用いたマイクロストリップでは、可動電子層が蓄積しやすく電極間の信号分離を劣化させる。昨年度から引き続き、FZ 法による高抵抗の p 型シリコン基板を用いて、電極分離の構造を変えたセンサーを試作し、陽子線と中性子線を実際に照射し、放射線損傷の評価を行った。

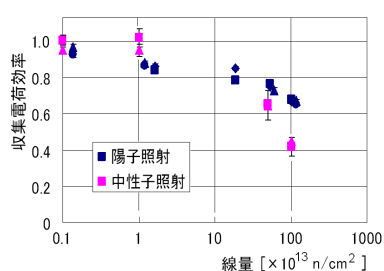


図 14: バイアス 500 V での収集電荷量の未照射時との比較。

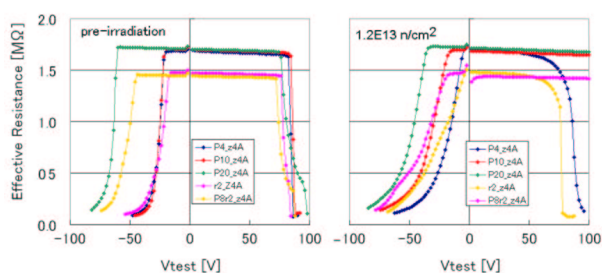


図 15: 実効的な電極・グランド間抵抗。センサー保護のため 100 V より低い電圧で抵抗が降下する設計を行っている。

図 14 は Sr β 線を用いて測定した電荷収集量の照射量依存性を示す。放射線損傷によりキャリアが捕獲され、未照射よりも電荷収集量が劣化し、陽子と中性子照射で劣化の程度が多少異なることが分かった。SuperLHC で予測される放射線線量でもおよそ 50% の電荷収集が達成でき、十分な信号量が得られる。電子を収集する p 型センサーでは n 型の場合のホール収集よりも放射線による劣化が少ない。

ビームロスなどに起因する大電流が短時間に発生すると、一時的に電極電位が低下し、アンプにつながれたアルミ電極間にある酸化膜を破壊することが想定される。そのため、電極電位が低下した場合に、有効に電流を逃がす機構をパンチスルーを用いて設計した。図 15 は、電極電位を変えた場合の実効抵抗を測定したもので、酸化膜の耐圧 100 V よりも十分小さな電圧で抵抗は小さくなる。電極分離の方式により未照射では差異がみられるが、照射後はほとんど違いが現れない。

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

Silicon-On-Insulator(SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現するために、沖セミコンダクター社の $0.20\mu\text{m}$ SOI プロセスを用いて、 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開発研究を行っている。

図 16 は、トランジスタ (PMOS/NMOS) の閾値電圧が放射線損傷により変動する様子

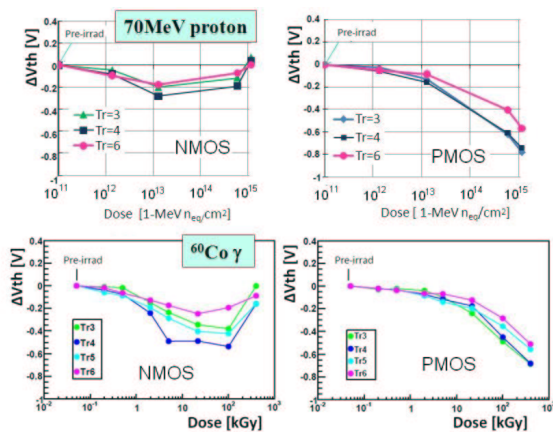


図 16: トランジスタ閾値電圧の放射線 (上段 : 70 MeV 陽子, 下段 : ^{60}Co γ) 線量依存性 .

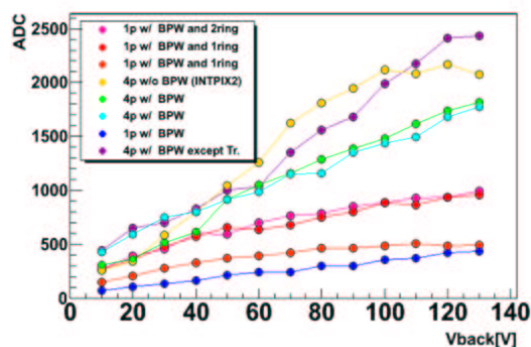


図 17: 1064 nm 赤外レーザーに対するピクセル応答のバイアス電圧依存性. 埋め込み p ウェルの構造の違いにより収集電荷量は異なるが, 130V まで収集量が増加する様子が分かる .

を示す．陽子と γ 線で電離放射線線量が一致するように図の横軸は揃えてあるので，閾値変動が放射線の種類によらず酸化膜中のホール生成・蓄積により定性的に説明できることが理解できる．PMOS の閾値は単調に減少するのに対し，NMOS は一旦減少の後，高線量で反転するリバウンド効果を示し，これは酸化膜とシリコンとの界面に形成される電荷の符号の違いで説明できる．測定した閾値電圧の変動を用いて，TCAD シミュレーションで酸化膜中の蓄積電荷を定量的に評価した．

SOI 一体型センサーでは，裏面に加えたバイアス電圧の影響が BOX 層を介して表層の電子回路に現れ，回路動作を変動させるバックゲート効果がある．センサー自体は電極形状の設計変更を経てバイアスを 140V まで印加できるものが作製できるようになったが，その電圧では読みだし回路が作動しない．そのため，BOX 層直下に p 型半導体を埋め込んだ電極 (BPW) を形成し，外部電圧でその電圧を制御することでバックゲート効果を抑制することに成功した．図 17 では，ピクセル周りの BPW 形状を変えたサンプルに対し，赤外レーザーを照射して応答を測定した結果である．従来，数 10V で顕著に応答が低下したが，130V まで空乏化の広がりを反映して収集電荷量が増加することが初めて示された．

高エネルギー実験では，センサーを全空乏化した状態での動作が望ましく，そのためセンサーを 100 μm まで薄くする試作を行った．薄化には物質量を減らす効果もあるが，センサー裏面から光や軟 X 線を入射した場合に量子効率が一樣かつ高くできることが期待できる．加工前後で暗電流の劣化もなく，実際にピクセルセンサーとして光検出できることを示した．

【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，参加各国の大学や研究機関で精力的に加速器や測定器の研究・開発が行われている．ILC での実験では，素粒子である電子を衝突に用いるので，加速したエネルギーを効率良く衝突に使用することができ，またバックグ

ラウンドの少ない環境での精密測定や新粒子探索が可能となる。

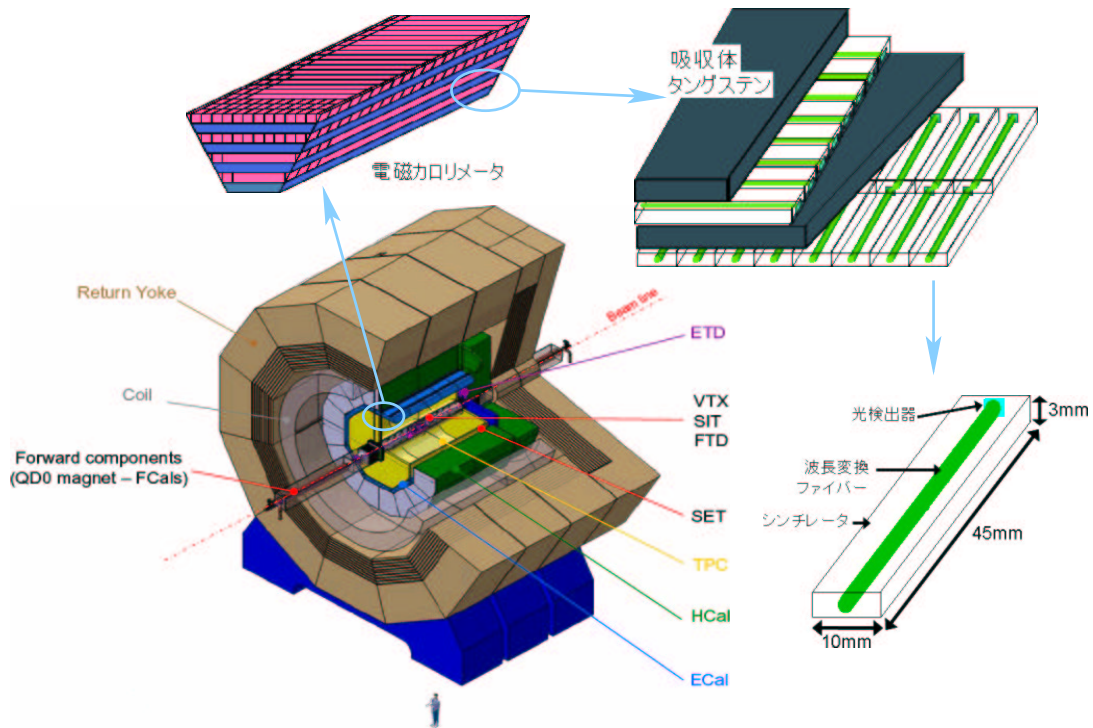


図 18: ILC(ILD) 検出器の構造，および電磁カロリメータのモジュールを一部取り出したもの．カロリメータは，吸収体とシンチレータ層をもつサンプリングカロリメータとなっており，シンチレータ層は，ストリップシンチレータを横方向と縦方向を交差させ並べた構造になっている．またストリップシンチレータは波長変換ファイバーが埋め込まれ，光検出器によって読み出される．

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

ILC 実験では，ゲージボソンやトップクォーク，ヒッグス粒子などの崩壊により発生する多数のジェットのエネ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 18 右上のように，シンチレータを短冊（ストリップ）型にし，交差させて交互に積み重ねる方法が考えられている．

しかしながら，ILC カロリメータでは，非常に細かいセル構造が要求されるため，読み出

しのために膨大な数の光センサーが必要となる。また、磁場中で使用されることもあり、これまで広く用いられてきた光センサーである光電子増倍管の使用は難しい。このため、非常にコンパクト且つ低コストで磁場の影響を受けないという特徴を持つ、新しいタイプの半導体光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が、ILC カロリメータの読み出し用センサーとしては、ほぼ唯一の解となる。

我々は、これまで、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 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の MPPC のサンプルを用い光検出効率、応答線形性、増幅率、ノイズ頻度、クロストークの測定、放射線耐性、信号頻度依存性などの基礎特性の測定を行ってきた。

昨年度(2009 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 の研究開発として、温度加速試験による MPPC の基礎特性の長期安定性の研究を行った。図 19

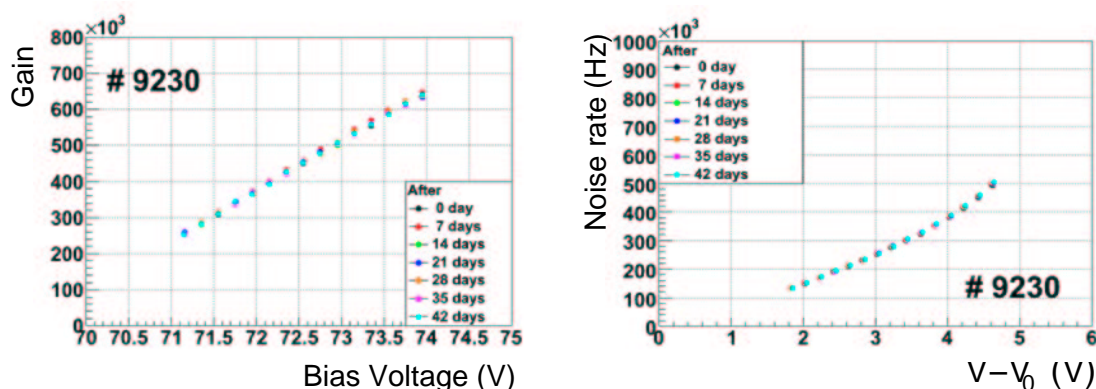


図 19: MPPC の基礎特性の長期安定性。温度加速試験 (85°C) での 42 日間 (11 年相当分) に渡る MPPC の増幅率のバイアス電圧依存性の変化 (左図)、および MPPC のノイズ発生率のバイアス電圧 (降伏電圧からの差) 依存性の変化 (右図)。

は、温度加速試験での 42 日間の間の MPPC の増幅率のバイアス電圧依存性の変化 (左図)、および MPPC のノイズ発生率のバイアス電圧 (降伏電圧からの差) 依存性の変化 (右図) を示している。温度加速試験は、85°C で行われ、室温の約 11 年相当分にあたり、十分な長期安定性を有していることが分かる。

また、MPPC の特徴として、応答の線形性が MPPC を構成するピクセル数によって制限を受けることが挙げられる。より広範囲での線形性を得るため、応答の線形性のピクセル数依存性を調べた。1600 ピクセル、および 3136 ピクセルの MPPC でのレーザー光源による極短パルスに対する応答ピクセル数曲線を図 20 に示す。ピクセル数の増加にともない、線形な応答を示す領域が増加したことが分かる。

今後、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。

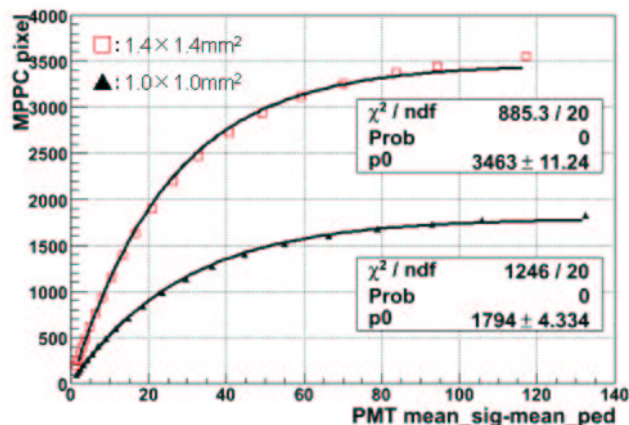


図 20: 1600 ピクセル，および 3136 ピクセルの MPPC でのレーザー光源による極短パルスに対する応答ピクセル数曲線．横軸は，光量のリファレンスとして光電子増倍管で MPPC への入射光を同時に測定した際の出力電荷．

【4】 超伝導体赤外線検出器の開発

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

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

この検出器はニュートリノ崩壊探索実験に用いることを目標としている．ニュートリノは，標準模型の枠内で重いニュートリノ (ν_3) から軽いニュートリノ (ν_2) と光子に寿命約 10^{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放射の光子のエネルギースペクトルに対し，ニュートリノ崩壊の信号はそのエネルギーを上限として低エネルギー側のみ裾を引くスペクトル分布として観測される．この信号の検出に必要な検出器に対する要求は，宇宙背景ニュートリノの輻射崩壊のシミュレーションを行った結果，30 meV の光子に対して 2～3%のエネルギー分解能を有することであることが分かっている．

そこで，2007 年 1 月より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして筑波大学，KEK，

理研の共同研究によって、この STJ 開発を進めてきた。この開発研究では、これまでの超伝導体検出器の開発において問題となっていることを解決しつつ、新しい超伝導体素材である Hf あるいは W を用いた超伝導体検出器の開発を行っている。

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

検出器作成の残る技術的ステップは、安定した絶縁膜の作成条件であるが、現在、超伝導体部分に Nb、絶縁体部分に Hf を様々な条件で酸化して HfO_x の膜を使用した Nb-Hf STJ を作成し、実際に極低温下でのジョセフソン電流の測定を行うことにより、超伝導体-絶縁膜-超伝導体 (SIS) の構造ができているかどうかを検証し、絶縁膜作成条件の探索および最適化を行っている。

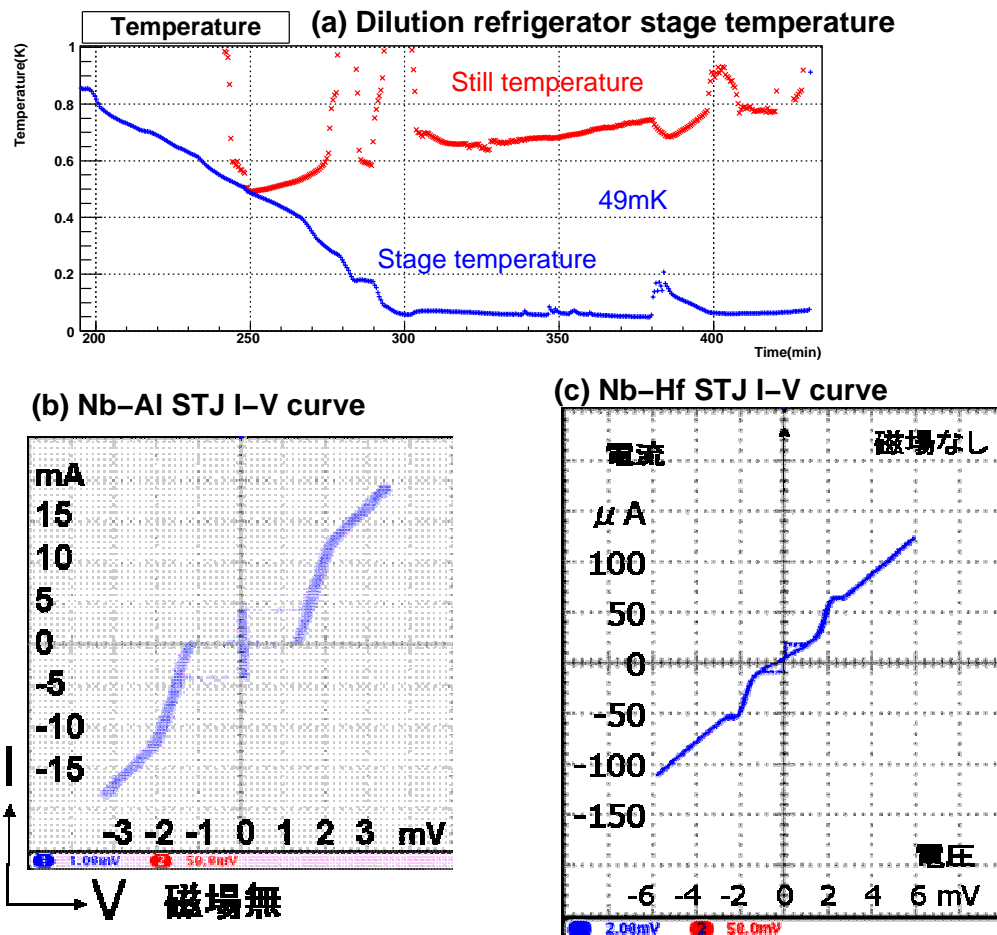


図 21: (a) 低温物性グループ (大塚研) より借用の希釈冷凍機の稼働状況。プロットは、最低温ステージの温度を時間の関数として表したもの。最低温で、49 mK を記録した。(b) Nb-Al STJ における I-V 曲線。V=0 で流れる電流は、絶縁体部分に磁場をかけることで消失し、ジョセフソン電流であることが確認できる。(c) Nb-Hf STJ における I-V 曲線。ジョセフソン電流が確認できるが、リーク電流が大きいため検出器として動作されるには、改善の必要がある。

測定には、最高でも Hf の転移温度 (160 mK) 以下の温度、更に検出器として実用的に運用するには、20 mK 程度の極低温での安定した運転が必要となってくるが、これには、低温物性グループ (大塚研) より希釈冷凍機を借用し 2009 年 7 月の試運転で、最低温 49 mK を達成した (図 21 a)。現在、更に低い温度での運転を目指し調整中である。更に、ファイバーを用いて実際に可視光～赤外線を試料に当て応答を見るということも目標としている。

また、ジョセフソン電流の測定環境も構築し、作成条件が確立している Nb-Al STJ を試料を作成し、実際にその I-V 応答曲線からジョセフソン電流を確認した (図 21 b)。

Nb-Hf STJ では、HfO_x の作成条件によっては、ジョセフソン電流が確認でき、SIS の構造ができていることが予想されるが、まだまだリーク電流が大きいいため検出器として動作されるには、更に改善の必要がある (図 21 c)。

今後は、今年度中に、Hf STJ の実証テストを行い、光入力に対する応答を見ることを目指している。更に今後 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検出器実証モデルを開発する。また、超伝導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。日本側研究代表者：受川 史彦)
物件費：55,000 千円、旅費：11,500 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) 1,400 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) 700 千円

【6】 研究発表

(1) 学会誌等への発表論文

1. “Global Search for New Physics with 2.0 fb⁻¹ at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 011101 (2009).

2. “Search for a Higgs Boson Decaying to Two W Bosons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 021802 (2009).
3. “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).
4. “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).
5. “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).
6. “Direct Bound on the Total Decay 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).
7. “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).
8. “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), Phys. Rev. D **79**, 031101 (2009).
9. “A Search for High-Mass Resonances Decaying to Dimuons at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 091805 (2009).
10. “Measurement of Resonance Parameters of Orbitally Excited Narrow B^0 Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 102003 (2009).
11. “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).
12. “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).
13. “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), Phys. Rev. D **79**, 052007 (2009).
14. “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), Phys. Rev. D **79**, 052008 (2009).
15. “Inclusive Search for Squark and Gluino Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 121801 (2009).

16. “Top Quark Mass Measurement in the Lepton plus Jets Channel Using a Modified Matrix Element Method,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 072001 (2009).
17. “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).
18. “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), Phys. Rev. D **79**, 072005 (2009).
19. “Search for Top-Quark Production via Flavor-Changing Neutral Currents in $W+1$ Jet Events at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 151801 (2009).
20. “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), Phys. Rev. D **79**, 072010 (2009).
21. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 181801 (2009).
22. “Measurement of the b -Hadron Production Cross Section Using Decays to $\mu^- D^0 X$ Final States in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 092003 (2009).
23. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 201801 (2009).
24. “First Simultaneous Measurement of the Top Quark Mass at CDF II in the Lepton+Jets and Dilepton Channels at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 092005 (2009).
25. “Search for New Particles Decaying into Dijets in Proton-Antiproton Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112002 (2009).
26. “Search for Gluino-Mediated Bottom Squark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 221801 (2009).
27. “Search for Exclusive Z -Boson Production and Observation of High Mass $p\bar{p} \rightarrow p\gamma\gamma\bar{p} \rightarrow p\ell^+\ell^-\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 222002 (2009).
28. “First Measurement of the $t\bar{t}$ Differential Cross Section $d\sigma/dM_{t\bar{t}}$ in $p\bar{p}$ at $\sqrt{s}1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 222003 (2009).

29. “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), Phys. Rev. Lett. **102**, 232002 (2009).
30. “Measurement of Particle Production and Inclusive Differential Cross Sections in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112005 (2009).
31. “A Measurement of the $t\bar{t}$ Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using Dilepton Events with a Lepton plus Track Selection,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112007 (2009).
32. “Observation of Exclusive Charmonium Production and $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 242001 (2009).
33. “Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)$,”
A. Abulencia *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112003 (2009).
34. “Evidence for a Narrow Near-Threshold Structure in the $J/\psi\phi$ Mass Spectrum in $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **102**, 242002 (2009).
35. “Search for WW and WZ Production in Leptons Plus Jets Final State at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **79**, 112011 (2009).
36. “Search for Long-Lived Massive Charged Particles in 1.96 TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 021802 (2009).
37. “Search for Standard Model Higgs Boson Production in Association with a W Boson using a Neural Network Discriminant at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 012002 (2009).
38. “Observation of the New Charmless Decays of Bottom Hadrons,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 031801 (2009).
39. “Search for the Production of Narrow $t\bar{b}$ Resonances in 1.9 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 041801 (2009).
40. “Searching the Inclusive $\ell\gamma \cancel{E}_T + b$ -quark Signature for Radiative Top Quark Decay and Non-Standard-Model Processes,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 011102 (2009).
41. “Search for a Fermiophobic Higgs Boson Decaying into Diphotons in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 061803 (2009).

42. “Search for Narrow Resonances Lighter than Υ Mesons,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Eur. Phys. J. C* **52**, 319 (2009).
43. “Production of $\psi(2S)$ Mesons in $p\bar{p}$ Collisions at 1.96 TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 031103 (2009).
44. “Observation of Electroweak Single Top Quark Production,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 092002 (2009).
45. “First Observation of Vector Boson Pairs in a Hadronic Final State at the Tevatron Collider,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 091803 (2009).
46. “Search for a Standard Model Higgs Boson in $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 101802 (2009).
47. “Search for Charged Higgs Bosons in Decays of Top Quarks in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 101803 (2009).
48. “Measurement of the Top Quark Mass Using the Invariant Mass of Lepton Pairs in Soft Muon b -tagged Events,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 051104 (2009).
49. “Search for the Neutral Current Top Quark Decay $t \rightarrow Zc$ Using Ratio of Z -Boson + 4 jets to W -Boson + 4 Jets Production,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052001 (2009).
50. “Search for Anomalous Production of Events with a Photon, Jet, b -quark Jet, and Missing Transverse Energy,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052003 (2009).
51. “Search for Hadronic Decays of W and Z Bosons in Photon Events in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 052011 (2009).
52. “Precision Measurement of the $X(3872)$ Mass in $J/\psi\pi^+\pi^-$ Decays,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 152001 (2009).
53. “Observation of the Ω_b^- and Measurement of the Properties of the Ξ_b^- and Ω_b^- Baryons,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 072003 (2009).
54. “A Search for the Higgs Boson Produced in Association with $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ Using the Matrix Element Method in CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. D* **80**, 071101 (2009).

55. “First Observation of $\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp$ and Measurement of the Ratio of Branching Fractions $\mathcal{B}(\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\mp)/\mathcal{B}(\overline{B}_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-)$,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 191802 (2009).
56. “Search for Higgs Bosons Predicted in Two-Higgs-Doublet Models via Decays to Tau Lepton Pairs in 1.96 TeV $p\bar{p}$ Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 201801 (2009).
57. “A Search for the Associated Production of the Standard-Model Higgs Boson in the All-Hadronic Channel,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **103**, 221801 (2009).
58. “Measurement of the Inclusive Isolated Prompt Photon Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV using the CDF Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **80**, 111106 (2009).
59. “Search for Supersymmetry with Gauge-Mediated Breaking in Diphoton Events with Missing Transverse Energy at CDF II,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 011801 (2010).
60. “Measurement of $d\sigma/dy$ of Drell-Yan e^+e^- Pairs in the Z Mass Region from $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),
arXiv:0908.3914 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
61. “Measurement of the b -jet Cross Section in Events with a W Boson in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),
arXiv:0909.1505 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
62. “Measurements of the Top-Quark Mass using Charged Particle Tracking,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0910.0969 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
63. “Search for Anomalous Production of Events with Two Photons and Additional Energetic Objects at CDF,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0910.5170 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
64. “Measurement of Branching Fraction Ratios and CP Asymmetries in $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$ Decays in Hadron Collisions,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.0425 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
65. “Search for New Color-Octet Vector Particle Decaying to $t\bar{t}$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
arXiv:0911.3112 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Lett. B)

66. T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration),
 “Measurement of the Top Quark Mass in the Dilepton Channel using m_{T2} at CDF,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.2956 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. D)
67. “A Search for the Higgs Boson Using Neural Networks in Events with Missing Energy
 and b -quark Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.3935 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
68. “Measurement of the $WW+WZ$ Production Cross Section Using the Lepton + Jets
 Final State at CDF II,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0911.4449 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
69. “Search for Fermion-Pair Decays $Q\bar{Q} \rightarrow (tW^\mp)(\bar{t}W^\pm)$ in Same-Charge Dilepton
 Events,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.1057 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
70. “Search for Pair Production of Supersymmetric Top Quarks in Dilepton Events from
 $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.1308 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
71. “Search for Technicolor Particles Produced in Association with a W Boson at CDF,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.2059 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
72. “A Study of the Associated Production of Photons and b -quark Jets in $p\bar{p}$ Collisions
 at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.3453 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
73. “Measurement of the Λ_b^0 Lifetime in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.3566 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
74. “Measurement of the W^+W^- Production Cross Section and Search for Anomalous
 $WW\gamma$ and WWZ Couplings in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.4500 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)
75. “Search for New Physics with a Dijet plus Missing E_T Signature in $p\bar{p}$ Collisions at
 $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:0912.4691 [hep-ex]. (Submitted to
 Phys. Rev. Lett.)

76. “Inclusive Search for Standard Model Higgs Boson Production in the WW Decay Channel using the CDF II Detector,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1001.4468 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
77. “Combination of Tevatron Searches for the Standard Model Higgs Boson in the W^+W^- Decay Mode,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF and D0 Collaborations), arXiv:1001.4162 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. Lett.)
78. “Search for Single Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in the Missing Transverse Energy Plus Jets Topology,”
T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), arXiv:1001.4577 [hep-ex]. (Submitted to Phys. Rev. D)
79. 金 信弘, 増淵 達也, “テバトロン実験でヒッグス粒子にどこまで迫れるか,”
日本物理学会誌 第 64 巻 第 6 号, p. 440 (2009).
80. “Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC”,
ATLAS Collaboration, G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, M. Kurata, K. Nagai, F. Ukegawa *et al.*, Phys. Lett. **B 688** 21-42 (2010).
81. “Radiation Resistance of SOI Pixel Devices Fabricated with OKI 0.15 μm FD-SOI Technology”,
K. Hara, H. Miyake *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.56-5, 2896-2904 (2009).
82. “Development of Radiation Hard N-on-P Silicon Microstrip Sensors for Super LHC”,
K. Hara *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.56-2, 468-473 (2009).

(2) 学会・研究会での講演 (国内)

1. 受川 史彦: “ B 実験の紹介: CDF での B 粒子の物理,”
関東甲信越地方 B 中間子の物理実験研究会 (2009 年 8 月 31 日), 東京大学.
2. 戸村 友宣: “CDF 実験のトップクォークの物理と新粒子探索の結果” (招待講演),
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
3. 武内 勇司: “陽子反陽子衝突実験でのトップクォーク対生成におけるスピン偏極度相関の測定,”
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
4. 橋本 就吾: “CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究,”
日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 10 日–13 日), 甲南大学.
5. 佐藤 構二: “CDF の最新結果,”
科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.

6. 三宅 秀樹：“CDF での B の物理,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
7. 永井 義一：“CDF でのヒッグス粒子探索,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
8. 須藤 裕司：“Higgs Search in the $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu$ jet jet channel,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
9. 武政 健一：“Top spin correlations in lepton + jets channel,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
10. 深見 智代：“CDF-TOF 用光電子増倍管の時間分解能の長期安定性,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
11. 橋本 就吾：“CDF 実験プラグ部電磁カロリメータ用光電子増倍管の長期安定性の研究,”
 科研費特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2010 (2010 年 2 月 22 日–24 日), 茨城県東茨城郡.
12. 永井 義一：“1.96 TeV 陽子反陽子衝突実験 CDF における W ボソン随伴生成のヒッグス粒子探索,”
 日本物理学会 第 65 回年次大会 (2010 年 3 月 20 日–23 日), 岡山大学.
13. 林隆康:GRA@PPA イベントジェネレータを用いた LHC-ATLAS 実験における W +jets 事象の研究,
 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
14. 塙慶太: ATLAS 実験内部飛跡検出器の飛跡再構成精度,
 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
15. 瀬賀智子: SOI pixel 検出器におけるバックゲート効果の埋め込み P ウェルによる抑制,
 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
16. 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 (TCAD による放射線損傷の研究),
 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
17. 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 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.
18. 三井信吾: SLHC 用 P 型シリコン飛跡検出器の放射線によるバルク部損傷の評価,
 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 10 月 10 日–13 日), 甲南大学.

19. 林隆康：LHC-ATLAS 実験で用いられるイベントジェネレータの W +jets 事象を用いた比較，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
20. 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評価，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
21. 埴慶太：ATLAS 実験内部飛跡検出器の飛跡再構成精度，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
22. 瀬賀智子：埋め込み P ウェル構造をもつ SOI pixel 検出器の放射線耐性試験，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
23. 河内山真美：SOI ピクセル検出器における回路部トランジスタの放射線損傷評価（TCAD によるシミュレーション），
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
24. 高橋優：SLHC 実験に用いる高放射線耐性 P 型マイクロストリップセンサーの開発，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
25. 原和彦：ATLAS 実験用シリコン半導体検出器の放射線損傷試験，
サイクロトロンラジオアイソトープセンター第 30 回研究報告会（2009 年 11 月 24 日–25 日），東北大学.
26. 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 2009 年秋季大会（2009 年 10 月 10 日–13 日），甲南大学.
27. 金海英：ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器の開発・研究，
日本物理学会 2009 年秋季大会（2009 年 10 月 10 日–13 日），甲南大学.
28. 木内健司：ニュートリノ崩壊検出のためのハフニウム超伝導トンネル接合素子の開発，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
29. 高橋優介：ILC カロリメータに用いる光検出器 MPPC の長期安定性試験，
日本物理学会第 65 回年次大会（2010 年 3 月 20 日–23 日），岡山大学.
30. 武内勇司：Hf-STJ 前回報告よりの進展，
KEK 測定器開発室月例会議（2009 年 8 月 11 日），高エネルギー加速器研究機構

(3) 国際会議・研究会での講演・ポスター発表

1. Yoshikazu Nagai, “Search for a Higgs Boson Produced in Association with W Boson using a Neural Network Approach at CDF”,
American Physical Society April Meeting, May 2–5, 2009, Denver, Colorado, USA.
2. Hideki Miyake, “Rare Decays/ B_s CPV Measurements at Tevatron”,
XXth Hadron Collider Physics Symposium 2009, November 16–20, 2009, Evian, France.

3. Hideki Miyake, “Measurement of Forward-Backward Asymmetry in $B \rightarrow K^{(*)}\mu\mu$ and Search for $B_s^0 \rightarrow \phi\mu\mu$ at the CDF Experiment”, American Physical Society April Meeting, February 13–16, 2010, Washington, D.C., USA.
4. Yuji Takeuchi, “Tevatron – Top/Higgs”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2010), February 18–20, 2010, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
5. Hideki Miyake, “Tevatron – Bottom quark”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2010), February 18–20, 2010, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan.
6. Kazuhiko Hara, “ATLAS Commissioning and Early Physics - resonance and jet production - ”, 5-th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, Beijing China, Sep. 21–26, 2009.
7. Kazuhiko Hara, “Testing of bulk radiation damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments ”, 7th Internatinal Symposium on Development and Applicatons of Semiconductor Tracking Devices, Hiroshima, Japan, Aug.29–Sep.1, 2009.
8. Mami Kochiyama and Tomoko Sega, “ Radiation Effects in OKI SOI Pixel Devices”, 7th Internatinal Symposium on Development and Applicatons of Semiconductor Tracking Devices, Hiroshima, Japan, Aug.29–Sep.1, 2009.
9. Yuji Sudo, “SCECAL beam test results”, Joint ACFA Physics and Detector Workshop and GDE Meeting on International Linear Collider (TILC09), Tsukuba, Japan, Apr. 17 – 21, 2009.
10. Yuji Sudo, “ Study of the Multi-Pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-Strip Calorimeter” , International Workshop on New Photon Detectors PD09 Shinshu University, Japan, June 24–26, 2009 .
11. Yoshikazu Nagai, “Combined $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ Search at CDF,” (poster presentation) Fermilab Users’ Meeting, June 3–4, 2009, Batavia, Illinois, USA.

(4) 会議・研究会報告書

1. N. Kimura, “Measurement of the relative fraction of the gluon-gluon fusion in top-antitop production process at 1.96 TeV proton-antiproton collisions using CDF,” Proceedings of the XLIV Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, March 2009.

2. S. Lindgren, K. Hara, *et al.*, “Interstrip Characteristics of n-on-p FZ Silicon Detectors”,
IEEE Nucl. Science Symposium CR N08-2, Orlando, FL., USA, Oct. 25-31, 2009.
3. Y. Ikegami, K. Hara, *et al.*, “Performance of Low-Mass and high Thermal Conductivity Hybrid for High Track Density Environment”,
IEEE Nucl. Science Symposium CR N13-174, Orlando, FL., USA, Oct. 25-31, 2009.
4. Y. Sudo, “Study of the Multi Pixel Photon Counter for the ILC Scintillator-Strip Calorimeter”, Proceedings of Science (PD09)005, June 2009.

(5) 学位論文

博士論文

1. 永井 義一 : Search for the Standard Model Higgs Boson in the $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ Channel 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 $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ 過程のヒッグス粒子探索)
筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2010 年 2 月.

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2010 年 2 月 .

1. 河内山 真美 : TCAD シミュレーションによる SOI ピクセル検出器の放射線損傷評価
2. 瀬賀 智子 : 埋め込み p 型ウェル構造をもつ SOI ピクセル検出器の放射線耐性の研究
3. 高橋 優介 : リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いられる光検出器 MPPC の長期安定性の研究
4. 埜 慶太 : Z^0 ボソン崩壊事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の運動量再構成精度の評価
5. 林 隆康 : ATLAS 実験における $W+\text{jets}$ 事象のシミュレーションによる研究
6. 深見 智代 : CDF 実験 TOF 測定器に用いられる光電子増倍管の長期耐久性の研究
7. 松隈 恭子 : 光子コンバージョン事象を用いた ATLAS 内部日席検出器の物質量評価
8. 三井 真吾 : Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーのバルク部の放射線損傷
9. 山田 美帆 : Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーの陽子線・線照射による放射線損傷の評価
10. 金 海英 : 遠赤外線光子検出のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器の開発研究

(6) 研究会の主催

1. 科学研究費特定領域「フレーバー物理の新展開」第4回研究会
茨城県東茨城郡大洗町 オーシャンビュー大洗，2010年2月22－24日．

【構成員の異動】

1. 2009年9月に佐藤構二が講師として着任．
2. 2010年1月に永井康一が研究員として着任．

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 (科研費基盤S)

助教 川勝 望 (理数学生応援プロジェクト)

研究員 長谷川 賢二 (科研費基盤S), 谷川 衝 (計算科学研究センター)

川口 俊宏 (科研費基盤A)

大学院生 12名

4年生 6名

本年度、当グループスタッフは、FIRSTプロジェクトを押し進めると共に、これを用いた大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長、高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性、TREE構造を用いた高速Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics法の開発、三次元輻射輸送から探る相対論的ジェットの構造、衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究を行った。また、銀河進化標準模型の構築を目的として、FIRST,T2K-Tsukubaを用いて、ライマンアルファエミッターとライマンブレイク銀河の理論進化模型の構築、宇宙再電離と銀河形成・進化、ライマンアルファエミッターとサブミリ銀河との関係、銀河衝突とダークマターハローの構造、銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性、ダークマターハローの力学構造の安定性解析、コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解、超新星爆発と銀河進化、降着円盤の輻射磁気流体力学モデル、恒星進化と質量放出過程の研究を行った。さらに、宇宙論・銀河形成分野で、Baryon Acoustic Oscillationの非線形成長、衛星銀河問題の解決、合体銀河における爆発的星形成の研究を行った。

【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) 大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長

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

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

我々は1つの銀河の中に10個の等質量のSMBHが存在する場合に、SMBHの合体を通して、SMBHの質量分布がどのように進化するかをN体シミュレーションによって調べた。その結果、5つのSMBHが合体して1つになった。一方、残りのSMBHは一度も合体を経験しなかった。合体に寄与したSMBHの軌道角運動量を奪う機構は、それらが銀河中心にないときは銀河の星からの力学的摩擦であり、銀河中心にあるときはSMBH同士の三体相互作用である。1つのSMBHだけが合体成長するのは、質量の大きいSMBH程、銀河の星からの力学的摩擦やSMBHの三体相互作用を通して軌道角運動量を奪われやすいからである。この結果は、SMBHの成長過程の1つにSMBH多体系があった可能性を示唆する。

(4) 高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性

高赤方編移の星形成銀河から放射される電離光子は、紫外線背景輻射強度を決め宇宙暗黒時代における銀河間ガスの電離史を大きく左右する。この電離光子放射率を決める上で重要なのが銀河内で生まれた全電離光子数の内、銀河の外へ脱出する電離光子数の割合を示す電離光子脱出確率である。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て3次元輻射輸送計算を行い、超新星爆発が活発的に起きている銀河が非常に高い電離光子脱出確率を持つことを示した(Yajima et al. 2009)。

我々はさらに、SPH法による宇宙論的流体計算の結果から得られるさまざまな質量の銀河に対して輻射輸送計算を行い、電離光子脱出確率の質量依存性を調べた。結果として電離光子脱出確率は、質量に対して非常に強い依存性を持っており銀河の質量が小さくなるにつれ脱出確率は非常に大きくなることが分かった。これは質量が大きくなるにつれ銀河内のガスの構造はサブハローの集合、合体を繰り返しているため非常にclumpyな構造になっており、そのため電離光子は生成された高密度領域を脱出しても他の高密度ガス領域にトラップされてしまうためである。これらの結果により宇宙暗黒時代では、低質量の星形成銀河が宇宙再電離の電離源として有力であることが示唆された。

(5) TREE構造を用いた高速 Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics法(START)の開発

輻射は物質との相互作用を通じて、ガスの化学進化や力学進化に影響を与える。このような過程を矛盾無く解く為には、輻射輸送計算と流体力学計算をカップルさせた輻射流体計算が必要となる。そのような輻射流体計算法の一つに Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics(RSPH)法というものがある(Susa 2006)。この手法では、放射源一つにつきおおよそ $O(N)$ (N は SPH 粒子数)の計算量で輻射輸送計算が可能となる。我々は、この計算法を用いて種族 III 星からの紫外線フィードバックに関する研究を行ってきた(Hasegawa, Umemura and Susa 2009 など)。この RSPH 法を含め多くの輻射輸送計算では輻射性再結合による放射はすぐその場で吸収されるという近似(On the spot 近似)を用い、実際にはそれらの光子の輻射輸送計算を行ってはいない。これは、再結合光子の輻射輸送を計算する事はすべての粒子を放射源として扱う事と同等であり、計算量が $O(N \times N)$ と膨大となり、実現が非常に困難となる為である。また同様の理由により、星などの放射源の数が多数の場合にも計算を実行することが困難となってしまう。そこで、我々は重力多体計算でよく用いられる TREE 法の概念を適用する事により、高速化された新たな RSPH 法を開発した。この手法では、放射源の数を N_s とした場合、1 ステップ当たり $N \log(N_s)$ のオーダーの計算量で輻射流体計算をする事が可能となる。これにより、これまで非常に困難であった散乱光を考慮した輻射流体計算や多数の星からの輻射性フィードバックを同時に取り扱った計算を可能とした。この手法を用いて、光電離に対する散乱光の役割を解析した結果、吸収体の大きさが電離光子の平均自由行程と同程度になる場合、On the spot 近似が適当でないことを明らかにした。

(6) 三次元輻射輸送から探る相対論的ジェットの構造

活動銀河核やマイクロクエーサーでは、相対論的速度 ($\sim 0.999c$) で加速するジェットが見つかっているが、ジェットの収束、加速メカニズムはまだ解明されていない。最も有力視されている磁氣的加速モデルでも、 $0.5c$ を超えるジェットの速度は完全には説明できていない。一方、ジェット天体の中には、エディントン光度を超える非常に明るい天体が見つかっているため、輻射力によるジェットの収束、加速の可能性が考えられる。近年、輻射力と磁気力の両方の効果を取り入れた輻射磁気流体の研究が注目され始めている。しかし、これまでの計算では、輻射輸送を近似的に取り扱っているため、輻射フラックスや輻射ストレステンソルを正しく求めることができず、輻射力を正確に評価できない。例えば、Ohsuga et al.(2009)の2次元輻射磁気流体計算では、光束制限拡散(FLD)近似を用いているが、光学的に薄い ($\tau < 1$) 場所では輻射場が正しく求まっている保証がない。本研究では、Ohsuga et al.(2009)の計算結果を用いて、三次元輻射輸送計算を行

い、FLD 近似の妥当性を検証した。また、FLD 近似では正確に求められない輻射ストレステンソルや輻射フラックス等を計算し、円盤からの輻射が、どの程度ジェットの収束、加速に影響を与えるかを調べた。

(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様々な衝突条件下（質量比・インパクトパラメータ）での衝突銀河団の 3 次元数値実験を世界で初めて行った。その結果、銀河団外縁部と銀河団中心部でそれぞれ特徴的な衝撃波が非平衡電離状態・2 温度状態を伴って形成されることが分かった。更に、観測時の衝撃波面に対する角度によって非平衡電離状態や 2 温度状態の観測可能性が大きく変わることもわかった。実際の衝突銀河団における物理状態は、将来の X 線観測衛星でその詳細が明らかになることが期待される。

【2】 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ー、ライマンブレイク銀河、サブミリ銀河等、莫大な数の銀河が観測されている。しかしながら、そういった天体が、我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究されてきた近傍銀河とどのように関連しあっているのか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、明確な答えを我々はもっていない。文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (A) 「理論と観測の融合による銀河発生学の探究」(平成21年度～平成24年度、代表 森正夫)に基づき、銀河の標準進化模型を構築すべく銀河形成・進化の理論研究を推進している。

(2) ライマンアルファエミッター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ーやライマンブレイク銀河に代表される高赤方偏移で発見されている天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない"という仮説を掲げ、銀河の化学力学モデルを駆使して、銀河の発生について詳細な理論模型を構築している。さまざまな質量のスケールで化学力学シミュレーションを行った結果、ライマンアルファエミッターとライマンブレイク銀河が原始銀河の進化系列であることを見出すこ

とができた。またライマンアルファエミッタで放射されるライマンアルファエミッションの光度は、原始銀河の質量および星形成率と密接な相関があることを示した。さらにその放射の物理的な起源として従来から考えられてきたメカニズムに加えて、衝撃波で加熱されたガスの放射冷却に起因するものが大きな影響を及ぼすことが分かった。

(3) 宇宙再電離と銀河形成・進化

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

(4) 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るべく、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。

(5) 銀河衝突とダークマターハローの構造

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

ことが有力な手段となる。銀河衝突の痕跡は銀河外縁部においても明るく、痕跡を形成している星の運動を観測することが可能であるため、銀河外縁部でのダークマターハローのプロファイルを観測的に調べるために適している。M31のアンドロメダストリームを用いればそのダークマターハローの外縁部の構造に迫ることができる。我々のN体シミュレーションでは、M31のダークマターハローのプロファイルとして半径の-3乗という密度分布を仮定し、その結果観測されているストリームの速度構造をよく再現できた。これは、半径の-3乗というダークマターハローの密度分布が実際の銀河でも成り立っていることを示唆する重要な結果である。

(6) 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性

これまでの研究では銀河衝突現象の解析を重力多体系として解析してきたが、今後は銀河衝突に対するガスやダストの力学的な応答を調べる必要がある。特に銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性との物理的な関係は大変興味深い。銀河衝突過程によっては、ブラックホールの活動性を際立たせる場合とその活動性を著しく減衰させる効果が予想される。我々はそのような状況を正確に解析する為、N体シミュレーションでは取り入れられないガスの効果を取り入れるための銀河衝突の流体モデルの構築に取り組み、HLLC法を採用した3次元並列流体コードの開発を行った。

(7) ダークマターハローの力学構造の安定性解析

宇宙の構造形成のパラダイムとなっているコールドダークマター(CDM)シナリオは、N体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カスプ)構造を预言する。DMが力学的に主たる役割を果たし、カスプを持つことが期待される天体として矮小銀河が挙げられる。その観測結果によると、矮小銀河は中心部で密度は発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている。この理論と観測の不一致はコアカスプ問題として知られ、CDMシナリオの未解決問題の一つである。コアカスプ問題を解決するモデルとして、"かつて矮小銀河で大量の超新星爆発によるバリオン(ガス)の放出が起こり、その結果の重力場変動によりカスプがコアへと遷移した"というものがある。本研究では、これまで無視されてきた質量放出の起こる時間スケールに注目し、DMハローの力学応答への依存性を調べた。その結果、他の条件が同じであっても、"放出時間が短いほどカスプはコアに遷移しやすい"事を明らかにした。特に放出時間がDMハロー中心部の力学時間に比べ十分に長い場合について、DMハローの力学応答を断熱不変量を用いて解析的にモデル化した。

(8) コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

銀河風は超音速で流れる宇宙流体の1つとして知られている。銀河の中心付近で超新星爆発などにより星間ガスにエネルギーが放出されると星間ガスは銀河の外側に向かって超音速で流出するが、常に超音速で流れる場合だけでなく亜音速から始まって連続的に加速して超音速となって流れる遷音速流も存在する可能性がある。しかし先行研究では遷音速解が見つかっていなかった。本研究ではコールドダークマターハロー中の銀河風の遷音速流を発見することに成功した。恒星風を点源重力場における球対称定常流であると仮定すると、内側では重力の効果が効いているために亜音速流は加速し、外側では膨張の効果が効いているために超音速流が加速するので、膨張の効果と重力の効果が釣りあっている点をちょうど音速で流れる場合は亜音速から超音速への連続的な加速が実現でき、遷音速流となることがわかった。

(9) 超新星爆発と銀河進化

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

(10) 降着円盤の輻射磁気流体力学モデル

本研究ではアルファ粘性モデルを用いず、輻射輸送と磁場の進化を正確に解く輻射磁気流体シミュレーションによって、スリム円盤、標準円盤、RIAF に対応する降着円盤の三つの状態を再現することに成功した。そして降着円盤のガス密度を変えることによって輻射冷却・輻射圧の効き方が変化して円盤の多様性が生み出されるため、一つの数値計算コードで三つの降着モードを再現することに成功した。その結果、(1) 超臨界降着流(スリム円盤に対応) の場合、輻射力と重力が釣り合った分厚い円盤の上空に、輻射力で加速されたアウトフローが発生する。また、円盤部の磁場エネルギーがガスの内部エネルギーを凌駕する、すなわちガスの内部エネルギーでリミットされないという新たな知見を得た。これはガスの回転運動によりトロイダル磁場が増幅されたことが原因と考えられる。ガスの温度は、円盤部では輻射の温度とほぼ等しいが、アウトフロー領域では輻射の温度よりはるかに高くなる。(2) 質量降着率が臨界値を下回る(標準円盤に対応) と、鉛直方向の構造はおよそ静水圧平衡に近く、磁気圧がわずかに重力に勝るためアウトフローが発生する。この場合も円盤上空でのガス温度は輻射温度よりはるかに高くなる。(3) 質量降着率が臨界値よりはるかに小さい状況(RIAF に対応) では、主にガス圧が重力と釣り合った分厚い円盤が形成される。円盤上空では磁気圧がわずかに重力に勝り、ガスが加速されてアウトフローとなる。ガス温度は領域全体で輻射温度よりはるかに高くなる。輻射圧加速アウトフローがおよそ定常であるのに対し、磁気圧加速アウトフローは激しく時間変動する。

(11) 恒星進化と質量放出過程

本研究では、惑星状星雲の形態が恒星風と星間空間ガスとの間に発生した衝撃波面に対応しているという立場の下、衝撃波面の流体力学的な挙動を追うことで、惑星状星雲の形態進化過程を詳細に調べた。衝撃波の伝播の様子は背景の密度分布に大きく左右される。つまり、惑星状星雲の形態進化も星間空間の密度分布に大きく依存していると考えられる。そこで本研究では、惑星状星雲の形態を議論するために軸対称非一様密度場中での衝撃波の伝播の様子を Laumbach-Probstein 近似により解析し、背景密度場について制限を加える事で惑星状星雲の形態を再現することに成功した。

【3】 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) 衛星銀河問題の解決

構造形成の標準的な理論となっているコールドダークマターモデルは、我々の天の川銀河のような銀河が数百から数千もの衛星銀河を持つことを予言する。一方、現在まで天の川銀河の周囲には 20 程度の衛星銀河しか発見されていない。この理論と観測の矛盾は「衛星銀河問題」と呼ばれ、標準モデルのもつ大問題とされてきた。一方、この問題はダークマターのみを考慮した宇宙論的シミュレーションによって指摘されているものである。そこで我々は、宇宙背景放射や超新星爆発による星間ガス加熱の影響を取り入れた宇宙論的な銀河形成シミュレーションを行い、コールドダークマターモデルが予言する「目に見える」衛星銀河の数やその性質を調べた。

その結果、超新星爆発によるガスの加熱が十分に効けば、衛星銀河の光度関数は再現可能であること示した。このような加熱は衛星銀河の光度-金属量関係も同時に再現することも示した。さらに、衛星銀河の中心密度が数桁の光度に渡ってほぼ一定であり、コールドダークマターモデルと一見矛盾するという観測結果も自然に再現できることを明らかにした。これは、宇宙再電離の影響により、ある中心密度以下のダークマターハローでは銀河が形成されないからであることを示した。

(3) 合体銀河における爆発的星形成

従来の銀河形成シミュレーションは数値的分解能が足りないため、銀河内での星形成領域を直接取り扱うことは出来ず、温度 10^4 度、密度 $n_{\text{H}} \approx 0.1\text{cc}^{-1}$ 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 100cc^{-1} 以上の低温高密度ガスを扱える高分解能シミュレーションを行い、銀河の合体時に励起される星形成について調べた。その結果、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。

<科研費採択状況>

- ・基盤研究（S）：梅村 雅之（代表者）（継続）
「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」（2,700万円）
- ・基盤研究（A）：森 正夫（代表者）（新規）
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」（440万円）
- ・挑戦的萌芽研究：吉川 耕司（代表者）（新規）
「6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション」（110万円）
- ・若手研究（スタートアップ）：岡本 崇（代表者）（新規）
「三次元輻射流体シミュレーションで探る銀河形成の物理」（90万円）
- ・日本学術振興会特別研究員奨励費：川勝 望（代表者）（継続）
「巨大ブラックホールとその周辺空間との物質・エネルギー収支から探る銀河中心核形成」（80万円）
- ・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）

<学位論文>

博士論文

1. 秋月 千鶴

The Structure of a Slim Disk Outflow Explored by Three-Dimensional Radiation Transfer

（三次元輻射輸送から探るスリム円盤アウトフローの構造）

2. 佐久間 優

Feedback Effects of First Supernovae on the Subsequent Population III Star Formation

（連続的種族 III 星形成に対する初代超新星のフィードバック効果）

3. 佐藤 大介

The Effect of Partial Redistribution on the Escape of Lyman alpha Photons from Subgalactic Clouds

（銀河内ガス雲からのライマンアルファ光子の脱出における部分再分配の効果）

4. 矢島 秀伸

Ultraviolet Radiation Transfer in Dusty Primordial Galaxies

（ダスト形成中の原始銀河における紫外線輻射輸送）

修士論文

1. 青山 浩之

高赤方偏移ガンマー線バーストによる宇宙背景放射の減衰

学士論文

1. 田中 賢
銀河間ガス雲の重力収縮シミュレーション
2. 田口 政樹
銀河風生成における輻射の役割
3. 遠藤 圭介
ブラックホール連星系からの重力波放出
4. 寺部 佑基
Laubach-Probstein 近似による惑星状星雲の形態解析
5. 土屋 聖海
コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

<論文>

Refereed Papers

1. Tanikawa, A., Umemura, M., 2010, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *The Astrophysical Journal Letters*, submitted.
2. Hasegawa, K., Umemura, M., 2010, START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press.
3. Shimizu, I., Umemura, M., 2010, Two types of Lyman alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press
4. Okamoto, T., Frenk, C. S., Jenkins, A., Theuns, T., 2010, The properties of satellite galaxies in simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press.
5. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2009, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
6. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
7. Ogiya, G., & Mori, M., 2010, The core-cusp problem in CDM halos and supernova feedback, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
8. Bett, P., Eke, V., Frenk, C. S., Jenkins, A., Okamoto, T., 2010, The angular momentum of cold dark matter haloes with and without baryons, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404, 1137-1156

9. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., 2009, Radiative regulation of Population III star formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395, 1280-1286.
10. Hasegawa, K., Umemura, M., Kitayama, T., 2009, Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397, 1338-1347.
11. Susa, H., Umemura, M., Hasegawa, K., 2009, Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, *Astrophysical Journal*, 702, 480-488.
12. 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*, 398, 715-721.
13. Kato, Y., Umemura, M., Ohsuga, K., 2009, Three-dimensional radiative properties of hot accretion flows on to the Galactic Centre black hole, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1742-1748.
14. Iliiev, Ilian T., Whalen, Daniel, Mellema, Garrelt, Ahn, Kyungjin, Baek, Sunghye, Gnedin, Nickolay Y., Kravtsov, Andrey V., Norman, Michael, Raicevic, Milan, Reynolds, Daniel R., Sato, Daisuke, Shapiro, Paul R., Semelin, Benoit, Smidt, Joseph, Susa, Hajime, Theuns, Tom, Umemura, Masayuki, 2009, Cosmological Radiative Transfer Comparison Project II: The Radiation-Hydrodynamic Tests, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1283-1316.
15. 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*, 61, 7-11
16. 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*, 61, 321-332.
17. Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2009, 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*, 61, 481-486
18. Okamoto, T., Frenk, C. S., 2009, The origin of failed subhaloes and the common mass scale of the Milky Way satellite galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, L174-L178
19. Kawakatu, N., Nagao, T., Jong-Hak, W., 2009, Exploring the disk-jet connection from the properties of narrow line regions in powerful young radio-loud AGNs, *The Astrophysical Journal*, 693, 1686-1695.
20. Kino, M., Kawakatu, N., Nagai, H., 2009, New prediction of extragalactic GeV gamma-ray emission from radio lobes of young AGN jets, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 210, 43-47.
21. Kawakatu, N., Kino, M., Nagai, H., 2009, On the Origin of Fanaroff-Riley Classification of Radio Galaxies: Deceleration of Supersonic Radio Lobes, *The Astrophysical Journal Letter*, 697, 173-176.

22. Watabe, Y., Kawakatu, N., Imanishi, M., Takeuchi, T.T., 2009, Supermassive Black Hole Mass Regulated by Host Galaxy Morphology, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 400, 1803-1807.
23. Kawakatu, N., Wada, K., 2009, Formation of High-redshift ($z > 6$) Quasars Driven by Nuclear Starbursts, The Astrophysical Journal, 706, 676-686.
24. Tanikawa, A., Fukushige, T., 2009, "Effects of Hardness of Primordial Binaries on Evolution of Star Clusters", Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 721-736
25. Sakuma, M., Susa, H., 2009, Feedback Effects of First Supernovae on the Neighboring Dark Matter Halos, Astrophysical Journal, 698, 155-162.
26. Akizuki, C., Fukue, J., 2009, Black-Hole Winds with a Variable Eddington Factor, Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 543-548.

Non-Refereed Papers

1. Okamoto, T., 2010, Dark Satellites of the Milky Way, in "Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation", Malta, 19-23 Oct. 2009, eds. V.P. Debattista & C.C. Popescu, AIP Conf. Ser., in press
2. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., 2009, The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, Proceedings for Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, 101-106
3. Hasegawa K., Umemura M., Suwa T., 2009, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, Proceedings for Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, 107-110
4. Umemura, Masayuki, 2009, Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator FIRST, Association of Asia Pacific Physical Societies, Research Activities on Astronomy and Astrophysics in Japan, 19, 36-42
5. Kawakatu N., Wada, K., 2009, Co-Evolution Model of AGNs and Nuclear Starbursts, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 408, 148.
6. Kawakatu, N., Nagai, H., Kino, M., 2009, A New Evolution Scenario of Compact Symmetric Objects, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 402, 299.
7. Kawakatu, N., Nagai, H., Kino, M., 2009, Fate of baby radio galaxies: Dead or Alive ?, To be appeared the 4th GPS and CSS workshop (Astronomische Nachrichten), 330, 283.
8. Kino, M., Kawakatu, N., Ito, H., Nagai, H., 2009, High energy emission from AGN cocoons in clusters of galaxies, To be appeared the 4th GPS and CSS workshop (Astronomische Nachrichten), 330, 257.

<解説記事>

1. 森正夫, 「銀河形成の流体力学模型」, 日本流体力学会誌“ながれ”, 2010年2月, 29巻 39-44

2. 岡本 崇, 2009, 「紫外背景輻射による銀河形成の抑制」, 天文月報, 102, 759-768

<研究会開催>

1. 「巨大ブラックホールと銀河の共進化」ワークショップ

2010年, 2月18日~20日, 筑波大学, つくば市

世話人: 谷口義明 (愛媛大), 嶺重慎 (京大), 和田桂一 (鹿児島大), 松元亮治 (千葉大), 上田佳宏 (京大), 中井直正 (筑波大), 郷田直輝 (国立天文台), 長尾透 (愛媛大), 村山卓 (東北大), 梅村雅之 (筑波大), 森正夫 (筑波大), 岡本崇 (筑波大)

2. 超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究: 観測と理論の連携

2009年, 10月15日~17日, にぎたつ会館, 松山市

世話人: 今西昌俊 (国立天文台), 柏川伸成 (国立天文台), 川勝望 (国立天文台), 谷口義明 (愛媛大), 寺島雄一 (愛媛大), 長尾透 (愛媛大), 長島雅裕 (長崎第), 和田桂一 (鹿児島大)

<座長>

1. Masayuki Umemura

"First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade"

March 8, 2010, University of Texas, Austin, USA

<国際会議発表・海外講演>

1. Mori, M., Umemura, M., 2009, Evolution of Lyman-alpha Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, OPEN PROBLEMS IN GALAXY FORMATION, (May 12-15, Potsdam, Germany)
2. Mori, M., Rich, R. M., 2009, The once and future Andromeda stream, Tidal Dwarf Galaxies: Ghosts from structure formation, (May 25-29, Bad Honnef, Germany)
3. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2009, Formation and Evolution of Lyman-alpha Emitters, The Lyman alpha universe, (July 6-10, Paris, French)
4. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., The escape of ionizing photons from high-z Lyman alpha emitters, The Lyman alpha universe, (July 6-10, Paris, French)
5. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2009, Possible progenitors of the Andromeda stellar stream, The 3rd Korea-Japan Young Astronomers Meeting, (Aug 19-21, 2009, Gwacheonsi, Korea)
6. Mori, M., Rich, R. M., 2009, The once and future Andromeda stream, The Milky Way and the Local Group - Now and in the Gaia Era, (Aug 31- Sep 4, 2009, Heidelberg, Germany)

7. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2009, Possible Progenitors of the Andromeda Stellar Stream, The Milky Way and the Local Group - Now and in the Gaia Era, (Aug 31- Sep 4, 2009, Heidelberg, Germany)
8. Okamoto, T., 2009, Dark satellites of the Milky Way, Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation, (Oct 19-23, 2009, Malta)
9. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)
10. Hasegawa K., Umemura M., Suwa T., 2009, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)
11. Kawakatu, N., Wada, K., Formation of High-redshift ($z>6$) Quasars Driven by Nuclear Starbursts, MPE seminar, (Nov. 13, Munich, Germany)
12. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2010, Theoretical study of dust emission from high- z starforming galaxies, Infrared Emission, ISM and Star Formation, (February 22-24, Heidelberg, Germany)
13. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., The Impacts of Ultraviolet Radiation on Secondary Population III Star Formation, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
14. Tanikawa A., Umemura M., 2010, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
15. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2009, A Supernova-driven Wind Model for High- z Galaxies, The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, (March 8-10, Osaka, Japan)
16. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient, 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010, (Mar 8-10, 2010, Osaka, Japan)
17. Ogiya, G., & Mori M., The core-cusp problem in CDM halos and supernova feedback, 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10), (Mar 8-10, 2010, Osaka, Japan)

<国内講演>

招待講演

1. 森正夫

「宇宙の果てと七夕の夜空」

世界天文年 全国同時七夕講演会 (2009年7月4日, 筑波大学, つくば)

2. 梅村雅之
「6次元計算宇宙物理学の展開」
重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会
(2009年9月10日～12日, 国立天文台, 三鷹)
3. 川勝望
「高赤方偏移クェーサーから探る超巨大ブラックホールの成長過程」
超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究：観測と理論の連携
(2009年10月15～17日, にぎたつ会館, 松山)
4. 川勝望
「超巨大ブラックホール形成の解明に向けて～多階層モデル構築の重要性～」
GCOE 研究会:宇宙ジェットのエンジンとしてのブラックホールとその進化
(2010年2月25～26日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都)
5. 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 (2009年11月25日, 竹園東小学校, つくば)

一般講演

1. 三木洋平
「Possible progenitors for reproducing the Andromeda stellar stream」
第39回 天文天体物理若手 夏の学校
(2009年7月27日～30日, 群馬県草津温泉ホテル櫻井, 草津)
2. 扇谷豪「矮小銀河のバリオン重力場が及ぼすダークマターハロー中心密度分布への影響」,
第39回 天文天体物理若手 夏の学校
(2009年7月27日～30日, 群馬県草津温泉ホテル櫻井, 草津)
3. 川勝望, 紀基樹
「相対論的ジェットの力学エネルギー源と粒子加速の理解に向けて: -VSOP-2 への展望と期待-」
VSOP-2 Workshop 2009 : VSOP-2 で狙うキーサイエンス
(2009年9月4日～5日, 国立天文台, 三鷹)
4. 秋月千鶴, 梅村雅之, 大須賀健, 加藤成晃
「三次元輻射輸送から探る相対論的ジェットの構造」
日本天文学会秋季年会 (2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)
5. 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 II」
日本天文学会秋季年会 (2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)
6. 矢島秀伸, Choi Jun-Hwan, 長峯健太郎, 梅村雅之, 森正夫
「高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性」
日本天文学会秋季年会 (2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)
7. 長谷川賢二, 梅村雅之

- 「TREE 構造を用いた高速 Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics 法の開発」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
8. 三木洋平，森正夫，R. Michael Rich
「N 体シミュレーションを用いたアンドロメダ・ストリームの速度構造の解析」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
9. 吉川耕司，赤堀卓也，北山哲，小松英一朗
「衝突銀河団における Sunyaev-Zel'dovich 効果」
日本天文学会 2009 年秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
10. 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 II」
日本天文学会 2009 年秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
11. 岡本 崇
「天の川銀河の衛星銀河の最小ハロー質量と，ダークサテライトの起源」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
12. 川勝望
「超巨大ブラックホール進化の多階層理論モデルの構築に向けて」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
13. 川勝望，和田桂一
「超新星爆発駆動ガス降着過程における超巨大ブラックホールの最大質量」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
14. 紀基樹，川勝望，高原文朗
「AGN ジェットの力学：陽子卓越か？ペアプラズマ卓越か？」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
15. 伊藤裕貴，紀基樹，川勝望，山田章一
「AGN ジェットが駆動するシェルからの非熱的放射」
日本天文学会秋季年会（2009 年 9 月 14 日～16 日，山口大学，山口）
16. 三木洋平，森正夫，R. Michael Rich
「Collision tomography: physical properties of possible progenitors for the Andromeda stellar stream」
第 22 回理論懇シンポジウム「2010 年代の理論天文学」
（2009 年 12 月 20 日～22 日，名古屋大学，名古屋）
17. 中村繁幸，森正夫
「超新星爆発と銀河風」
宇宙磁気流体力学のフロンティア（2009 年 11 月 16 日，京都大学，京都）
18. 扇谷豪，森正夫
「矮小銀河のバリオン重力場変動が及ぼすダークマターハロー中心密度への影響」，
第 22 回理論懇シンポジウム「2010 年代の理論天文学」
（2009 年 12 月 20 日～22 日，名古屋大学，名古屋）
19. 谷川衝，岩澤全規，牧野淳一郎

- 「恒星の軌道運動の観測による球状星団中心の中間質量ブラックホール検出」
大望遠鏡による高分散分光観測の展望
(2010年, 2月12日～13日, 国立天文台, 三鷹)
20. 梅村雅之
「セッション III サマリー-」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
21. 岡本 崇
「宇宙論的シミュレーションによる巨大ブラックホールと銀河の共進化」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
22. 川勝望, 和田桂一, 大須賀健
「超巨大ブラックホール形成の鍵を握る AGN トーラスについて」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
23. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
24. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich
「Collision tomography: physical properties of possible progenitors for the Andromeda stellar stream」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
25. 扇谷豪, 森正夫
「銀河風による矮小銀河からの質量流出とダークマターハロー中心質量密度分布」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
26. 梅村雅之
「巨大ブラックホールと銀河の共進化－現状と課題－」
JASMINE ワークショップ (2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)
27. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系でのブラックホール合体成長に伴う銀河中心構造の進化」
JASMINE ワークショップ
(2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)
28. 岡本 崇
「円盤銀河のバルジ - 銀河形成シミュレーションから」
JASMINE ワークショップ
(2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)

29. 梅村雅之, 松元亮治
「研究開発課題 (天文・宇宙分野) の紹介」
シンポジウム 「次世代スーパーコンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」
(2010年, 3月15日, 東京ステーションコンファレンス, 東京)
30. 梅村雅之
「レビュー1: 初代星」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
31. 長谷川賢二, 梅村雅之, 須佐元, 諏訪多聞
「初代星からの輻射性フィードバックと次世代星形成」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
32. 矢島秀伸; Jun-Hwan Choi; 長峯健太郎; 梅村雅之; 森正夫
「高赤方偏移銀河による宇宙再電離とクエーサー吸収線系への寄与」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
33. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich
「Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
34. 扇谷豪, 森正夫
「銀河風による矮小銀河からの質量流出とダークマターハロー中心質量密度分布」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
35. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」
初代星・初代銀河研究会 (2010年, 3月17日~19日, 長崎大学, 長崎)
36. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」
日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 東広島)
37. 川勝望, 大須賀健
「近赤外線光度の極端に低い活動銀河核は Super-Eddington 天体か?」
日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 東広島)
38. 矢島秀伸; Jun-Hwan Choi; 長峯健太郎; 梅村雅之; 森正夫
「Damped Lyman Alpha Systems における星の紫外線輻射と背景輻射場の影響」
日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 東広島)
39. 大須賀健; 嶺重慎; 森正夫; 加藤成晃; 竹内駿; 富田賢吾
「降着円盤の輻射磁気流体力学モデル; 円盤およびアウトフローの力学構造」
日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 東広島)
40. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich
「N 体シミュレーションを用いたアンドロメダ・ストリームの速度構造の解析とその時間発展」
日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 広島)

41. 扇谷豪, 森正夫

「矮小銀河からの銀河風が及ぼすダークマターハロー中心質量密度分布への影響」

日本天文学会春季年会 (2010年3月24日~27日, 広島大学, 広島)

I V. 宇宙観測グループ

教授 中井 直正
講師 瀬田 益道
準研究員 永井 誠
大学院生 14名（数理解物質科学研究科後期課程6名、前期課程7名；教育研究科1名）

国土地理院つくば32m鏡の20GHz帯受信観測システムの整備を継続するとともに、オリオン分子雲や銀河面のアンモニア掃天観測など大規模な観測を継続している。また南極ドームふじ基地に初めて行って直接に現地調査を行うとともに、30cm可搬型サブミリ波望遠鏡の開発・試験を継続した。さらに将来の南極大型望遠鏡に向けての技術開発を行っている。共同利用の望遠鏡を用いた観測も積極的に実施した。

【1】国土地理院つくば32m鏡の電波望遠鏡の開発整備と観測

(1) 観測システムの開発整備

20GHz帯受信機システムのうち、偏波計と冷却増幅部は左右両円偏波を観測できるように整備されているが、周波数変換部とそれ以降は一偏波のみのシステム構成であった。そこで中間周波数部とデジタル電波分光計を1系統増やし左右両円偏波を同時観測可能にするとともにシステムの安定性も図った。これにより、左右両円偏波を同じ周波数で観測する場合は感度を1.4倍に向上させることができ、独立の周波数で観測する場合は観測周波数帯を2倍（最大4GHz）にすることができるようになった。

月のマッピング観測から22.1GHz（波長1.36cm）における前方散乱能率 η_{fss} を測定し、月齢を考慮した月の輝度温度を用いて $\eta_{\text{fss}}=0.884\pm 0.005$ という値を得た。また上弦、満月、下弦の月のマッピングから輝度温度分布の位相変化の測定も行った。

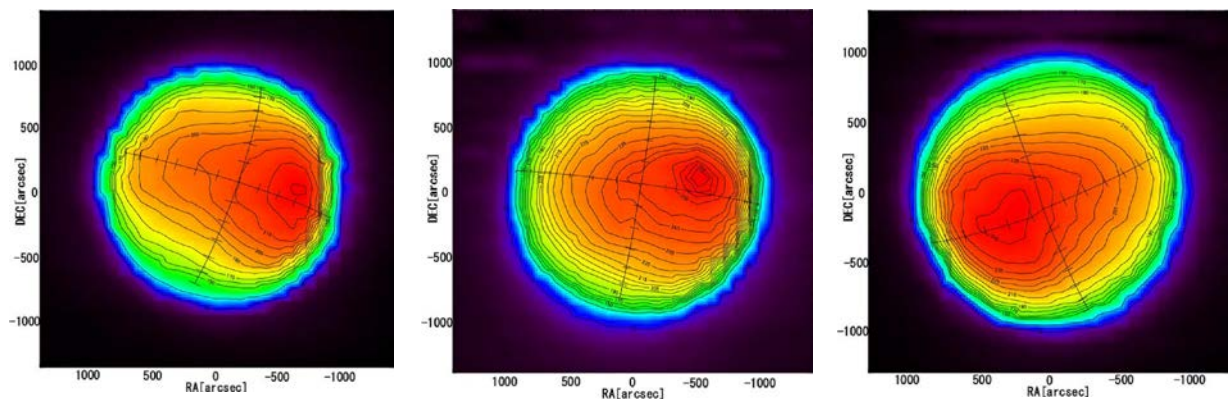


図1. 月の輝度分布。上弦の月（左）、満月（中）、下弦の月（右）

2008年度に23GHz帯（波長1.3cm）のビームパターンを測定した結果、感度の中心最大値に対して最大18%という大きなサイドローブが存在した。その原因を調べるために8.38GHz（7.78–8.98GHz）でビームパターンを測定したところ、図2のような結果が得られた。ビームサイズの大きさは $\text{HPBW(AZ)}=242''\pm 14''$ 、 $\text{HPBW(EL)}=242''\pm 5''$ であった。サイドローブの値は最大3%（–15dB）でそれほど大きくはなく、サイドローブが4角（すみ）に出ているので副鏡を支えている支持柱（ステー）が原因の可能性が高い。22.1GHzのビームパターンは8.38GHzのものと類似

の場所に出ているので同じ原因であり、波長が短いので大きく出ている可能性が高いが、サイドローブの上下の大きさの非対称性が大きいので、照度分布にも非対称性があるかもしれない(但し、主ビームは概ね点対称である)。

2009年4月17日に鹿島34mアンテナとVLBI実験を行い、有意にフリンジを検出した。また2010年3月18日には国立天文台VERAと測地VLBI実験を実施してフリンジを検出するとともに、つくば32m電波望遠鏡の左偏波の方向(受信機)を決定した。これらによって、K帯におけるVLBI観測のシステムが可能となった。

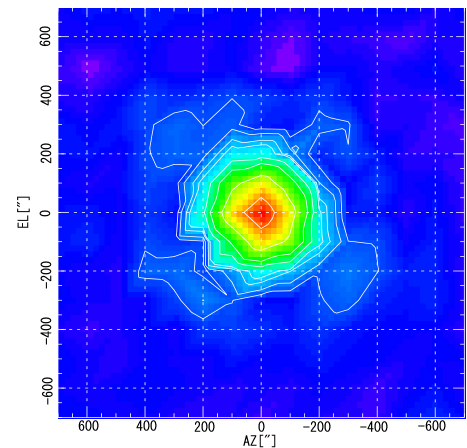


図2. 8.38 GHzにおけるビームパターン。等強度線は最大値に対して0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8である。

(2) 観測

オリオン分子雲(OMC1)全面と銀河面の銀緯0~1度におけるアンモニアの(J,K)=(1,1)-(6,6)輝線の大規模な掃天観測を継続している。また、電離領域W3の再結合線の観測や大質量形成領域W49や銀河NGC3079の中心部のアンモニア観測なども行った。

【2】南極天文学の推進

南極大陸内陸部の高原地帯のドームふじ基地への天文台の開設を目指す研究を進めている。本年度の第52次南極観測隊に瀬田が同行し、観測船「しらせ」への物資の積み込み、「しらせ」から南極内陸部の出発拠点S16への物資の輸送、S16からドームふじ基地までの1000kmの雪上車走行の全行程の調査を行った。また、ドームふじ基地では、大気透過率測定、水蒸気量測定、全天カメラ撮影を行った。220GHzのラジオメータによる大気透過率の測定では、行程の都合上、2010年1月17日から21日の5日間という限られた測定ではあったが、220GHzでの光学的厚みは $\tau=0.056$ であり、第48次隊に委託実施して得ていた非常に良好な空($\tau=0.045$)を改めて確認した。南極の夏期は、大気の状態としては最悪期にあたるが、ドームふじ基地の夏期に得た大気透過率の値は、これまで地上最良と考えられていた、チリ北部の砂漠地帯の冬期の最良期に匹敵する値である。ドームふじの冬期には、大気透過の低下が期待できるので、ドームふじ基地は地上最良のサブミリ波観測サイトと言える。南極天文学は、国立極地研究所の来年度から始まる長期計画(第VIII期;2010~2015年度)の研究テーマに採択されている。ドームふじの更新計画や、新型橇や雪上車の開発が始動している。南極天文学を行う環境は整いつつある。ただし、新たな越冬基地が完成する(2015年度予定)までは、ドームふじ基地の運用は夏期間に限定される。雪上車による輸送では、往復に約40日を要するので、観測期間は2週間程度しか確保できない。航空機の活用で、観測期間の拡大を探る必要がある。

2012年からの南極ドームふじ基地での運用を目指して開発を進めている30cmサブミリ波望遠鏡を、南米チリ北部の砂漠地帯に運び試験観測を行った。試験地の標高は4500mであり、南極ドームふじ基地(標高3810m)の気圧換算標高(4300m)に近い値である。高地では、酸素が少ないために、人力での組み立てには懸念があったが、重機を用いることなく、4人での組み立てに問題がないことを確認した。また、30cm望遠鏡で用いているデジタル分光計は元々は空冷方式であったため、空気の薄い高地では冷却効率が低下しオーバーヒートによる動作不良の懸念があった。今回、冷媒循環機構を採用することで、4500mの高地での動作に問題がないことが確認できた。しかしながら、天体からの500GHz帯の信号を受ける前に、発電機が故障し、天体観測には至らなかった。望遠鏡システムを筑波大に戻した後に、次年度に向けた対策と改良を施した。動作不良を起こ

した発電機はノズルの交換で高地での運用が可能になる見込みである。また、電源周りの接地状態を見直したことで、実験室測定では受信機の安定性を向上させた。来年度は、再度チリ北部の砂漠地帯に 30cm サブミリ波望遠鏡を運び、星間物質の主要なプローブである CO 及び[C I]輝線を用いて天の川の掃天観測を行う予定である。



図 3. 南極ドームふじに設置した 220GHz ラジオメータ

将来計画の南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡に搭載する観測装置として、超伝導検出器を用いたサブミリ波カメラの開発を進めている。

650 GHz 帯で実現された超伝導トンネル接合(STJ)を用いたフォトン検出器(Ariyoshi+06)の評価を行った。その結果、超伝導転移時に残留磁場が存在すると局所的に超伝導が破壊され感度低下を招くことが分かった。対策として、磁性体シールド内で超伝導転移を行うことでトンネル接合間の漏れ電流を一桁減少させることに成功した。

光学系には、集積度に優れた平面アンテナと誘電体レンズを用いた光学系を採用している。レンズ材料には高誘電率・低誘電損失な物質を選ぶ必要があるため、実際にレンズを使用する極低温化で実験を行い我々の目的には高純度シリコン結晶が適していることを明らかにした。また、高いビーム質を保持しつつ集積度を上げる設計も行った。

【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レーザーを 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。これらの結果を論文 (Mamyoda et al. 2009) として出版した。

Radio-Loud で Broad Absorption Line を持つ 22 個の (BAL) Quasar の 8.4 GHz での国内 VLBI 観測を行い、20 個で検出して、論文 (Doi et al. 2009) として出版した。

< 論文 >

(査読論文)

1. Tanaka, K., Oka, T., Nagai, M., Kamegai, K.

“A Large Expanding Molecular Arc in the Sagittarius B1 Complex”

Publ. of Astron. Soc. Japan, 61, 461-469 (2009)

2. Mamyoda,K., Nakai,N., Yamauchi,A., Diamond,P., Hure,J.-M.
 “Detectionn of a Sub-Keplerian Water Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of the Galaxy IC 1481”
Publ. of Astron. Soc. Japan, 61, 1143-1151 (2009)
3. Doi,A., Kawaguchi,N., Kono,Y., Oyama,T., Fujisawa,K., Takaba,H., Sudou,H., Wakamatsu, K., Yamauchi,A., Murata,Y., Mochizuki,N., Wajima,K., Omodaka,T., Nagayama,T., Nakai,N., Sorai,K., Kawai,E., Sekido,M., Koyama,Y., the VLBI group at Geographical Survey Institute Asano,S., Uose,H.
 “VLBI Detections of Parsec-Scale Nonthermal Jets in Radio-Loud Broad Absorption Line Quasars”
Publ. of Astron. Soc. Japan, 61, 1289-1398 (2009)
4. Ishii,S., Seta,M., Nakai,N., Nagai,N., Miyagawa,N., Yamauchi,A., Motoyama,M., Taguchi, M., “Site testing at Dome Fuji for submillimeter and terahertz astronomy: 220 GHz atmospheric transparency”
Polar Science, 3, 213-221 (2010)

(国際研究会集録等)

1. Nakamura,K., Namikawa,D., Kamenno,S., Sawada-Satoh,S., Yoshikawsa,R., Nakai,N., Satoh, N. 2009
 “Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2” Astrophysics and Tecnologies ASP Conference Series, Vol. 402, proceedings of the conference held 3-7 December 2007 at ISAS/JAXA, Sagamihara, Kanagawa, Japan, Edited by Hagiwara,Y., Fomalont,E., Tsuboi, M., and Murata,Y., p. 116.
2. Matsuo,H., Arai,T., Nitta,T., Kosaka,A. 2009
 “Far-Infrared Spectroscopic Imaging of Interstellar Material around Eta Carinae” , ASP Conference Series , Vol.418 , pp451-454.
3. Matsuo,H., Hibi,Y., Suzuki,T., Naruse,M., Noguchi,T., Sekimoto,Y., Uzawa,Y., Nagata,H., Ikeda,H., Ariyoshi,S., Otani,C., Nitta,T., Yao,Q., Fujiwara,M. 2009
 “Superconducting THz Camera with GaAs-JFET Cryogenic Readout Electronics”
 proceedings of the LTD13, pp393-396.

<学会発表>

1. 新田冬夢、鈴木仁研、松尾宏、有吉誠一郎、大谷知行
 「SIS フォトン検出器への磁束トラップの影響の検討」
 日本応用物理学会 (2009年9月8日)
2. 永井誠、荒井均、瀬田益道、中井直正、ほか32mグループ
 「つくば32m電波望遠鏡を用いた銀河系中心領域アンモニア輝線観測」
 日本天文学会 (2009年9月14日)
3. 荒井均、瀬田益道、中井直正、萩原健三郎、宮本祐介、永井誠、石井峻
 「広帯域デジタル電波分光計AC240の水冷機構の開発と性能評価」
 日本天文学会 (2009年9月14日)
4. 石井峻、瀬田益道、永井誠、中井直正、宮本祐介、荒井均、前橋秀紀、石崎剛史、中野将義、長崎岳人、前澤裕之(名古屋大学)、南極天文コンソーシアム

「南極 30cm サブミリ波望遠鏡の開発 III」

日本天文学会 (2009 年 9 月 14 日)

5. 鈴木仁研、野口卓、松尾宏、関本裕太郎、鶴澤佳徳、日比康詞、成瀬雅人、新田冬夢、遠藤光
「サブミリ波 1000 画素 SIS カメラの開発 - SIS フォトン検出器の超高感度化への展望 -」
日本天文学会 (2009 年 9 月 14 日)
6. 松尾宏、日比康詞、鈴木仁研、関本裕太郎、野口卓、鶴澤佳徳、成瀬雅人、新田冬夢、永田洋久、池田博一、有吉誠一郎、大谷知行、Qi-jin Yao、藤原幹夫
「超伝導サブミリ波カメラの大規模アレイ化へ向けて」
日本天文学会 (2009 年 9 月 16 日)

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 間明田好一
「Study of the Water-Vapor Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of IC1481」(IC1481 の活動的銀河中心核における水蒸気メーザー円盤の研究)
2. 宮本祐介
「Kinematics and Distribution of Molecular Gas in the Spiral Galaxy M51」(渦巻銀河 M51 の分子ガスの運動と分布)
3. 山倉鉄矢
「Development of THz band quasi-optical Hot-Electron Bolometer Mixer employing superconducting NbTiN microbridge」(NbTiN 超伝導細線を用いたテラヘルツ帯準光学ホットエレクトロンボロメータミキサの開発)

(修士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 秋山大樹
「つくば 32m 電波望遠鏡による系外銀河中心部のアンモニア観測」
2. 粉川慶太
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯における両偏波観測用受信機の開発」
3. 野々川博晃
「つくば 32m 電波望遠鏡による電離領域 W49N の観測的研究」
4. 前橋秀紀
「南極 30 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の電波ポインティングシステムの開発」

(卒業論文)

1. 大倉裕樹
「つくば 32m 電波望遠鏡の 8GHz 帯におけるアンテナ性能測定と連続波観測」
2. 二本松佳樹
「つくば 32m 電波望遠鏡による月の 22GHz 連続波観測」
3. 蓮田由衣
「渦巻銀河 M51 における一酸化炭素分子と水素分子の強度相関関係の研究」
4. 福岡翔太
「大質量星形成領域 W3 の再結合線観測」

<外部資金>

(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 570 万円）（3/3 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 450 万円）（2/5 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）（3/3 年）
4. 国立極地研究所南極観測事業費（一般研究観測）：中井直正（研究代表者）、瀬田益道、他
「南極からの天文学」
（交付額 780 万円）（1/3 年）
5. 自然科学研究機構国立天文台：中井直正（研究代表者）
「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明」
（交付額 385 万 8 千円）（1/1 年）

<共同研究・受託研究>

1. 「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究」
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2009 年 4 月 1 日～2010 年 3 月 31 日）

<受 賞>

1. 筑波大学大学院数理物質科学研究科 2009 年度優秀論文賞（前期課程）、粉川慶太
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯における両偏波観測用受信機の開発」

V . 原子核理論グループ

教授 矢花一浩

講師 橋本幸男

準研究員 船木靖郎

計算機研究員 稲倉恒夫

大学院生 9 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。昨年度は現実的な Skyrme 有効相互作用によるテスト計算を実行したが、今年度はより重い核種の計算を可能とするための準備と、プログラムの完成を確認する為の比較を行った。重い領域への準備としては広範な原子核の超流動性を表す対相関エネルギー汎関数の導入を行った。対相関エネルギー汎関数の導入は成功したが、重い領域を対象とする為には、より精度の良い基底状態を用意する必要がある事が分かった。プログラム完成については変形核のアイソスカラー型四重極の強度分布関数を材料に、対相関について BCS 理論よりも厳密な HFB (Hartree-Fock-Bogoliubov) 理論に基づく計算と比較した。その結果、HFB 理論に基づく計算とかなり近い計算結果を出している事が分かった。また、励起モードに依存して自己無撞着性の重要性が異なる事が分かった。現在は系統的計算への準備と重イオン反応計算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進めた。光核反応は、微視的には最も単純な集団励起モードで表現されるので、これモードから多くの原子核の性質が引き出せる。しかしながら、実験で観測されているのは安定核の一部だけであるので、これを計算する事で原子核の性質の理解が深められると共に、今後の実験の指針を与える事にもなる。更に、この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 課程にも深く関係している。一部の原子核の低励起エネルギー領域に現れるピグミー共鳴状態の有無が、元素組成の成分率に大きな影響を与えるだが、そのピグミー共鳴状態の発現条件は不明のままである。光核反応の系統的計算を行う事で、ピグミー共鳴状態が発現する機構の解明に一筋の光を与えた。中性子過剰核ではフェルミレベルが浅くなり、緩く束縛された一粒子軌道が現れてくる。特に軌道角運動量が小さな軌道では空間的に広がった波動関数を持つ。この軌道がピグミー共鳴状態の発現に重要な役割を担っている事を示した。

(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。クラッ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。

今年度はオスmium 182Os の傾斜角回転 (tilted axis rotation; TAR) モードを含む励起状態について生成座標法 (GCM) を用いて調べた。平均場近似では、オスmiumはprolate変形(レモン型)をしているので、主たる回転軸が乗っている“赤道”から見て“北緯”方向と“南緯”方向に対称にクラックハートレーフォックボゴリユボフ(CHFB)解が存在する。量子力学的には、これらの対称な平均場解の間にトンネル効果で結合が生じ、北緯領域の解と南緯領域の解で縮退していたものが分離する可能性が考えられている。実験結果では、P.M.Walkerらの実験で得られたK量子数が8のバンドにおいて、基底状態のバンドとのバンド交差後の“シグネイチャ・スプリッティング”と呼ばれる現象がこのトンネリングのアイデアで説明できると期待している。GCMを用いた計算によって角運動量が $J = 22$ から 28 の領域でエネルギー・スプリッティングが 150 keVから 250 keVという値が得られた。GCM計算の精度を上げて、波動関数の構造と一粒子運動の構造変化の関係を詰める必要がある。

(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)方程式を数値的に解く方法を開発・展開している。微小振幅の撃力を与えた波動関数を初期条件にした場合にはこの方法は準粒子RPAになる。今回は、振幅が微小に限らない変形を原子核に与えたときの原子核の応答を計算した。この計算では、RPAの線形近似では取り込めない大振幅の非線形効果を扱うことになる。注目点は、大振幅振動運動になっていく際の周期と振動中心の変化、および振幅の時間変化の様子である。RPAのような線形領域の状況ではないので、“何を見ていくか”も含めて考えていく必要がある。状況が比較的わかりやすいのがチタン(Ti)52である。ここでは、球形にひとつ、prolate変形側にひとつというように、大きく2種類の振動中心があり、拘束条件付きHFBによって大きな変形を与えられたチタン52の核は巨大共鳴領域のエネルギーに相当する高い振動数の振動運動をしつつ、その振動中心はゆっくりと緩和して最終的に2種類の振動中心のいずれかに落ち着いていく。我々は波動関数の主要成分を分析して、振動運動の低エネルギー成分が、 $p3/2$ 軌道内での対相関力による占有数の変動によることを示した。この例では、粒子状態の占有のされ方は断熱的であるように見える。また、初期条件での対相関の有無によって緩和していく先がいずれの振動中心になるかが決まる。緩和先の振動中心と局所平衡点との関係、また、最終的な振動振幅の決まる理由を今後理解していく。

[2] クラスタ構造

(1) ガスのクラスタ構造状態、 α 粒子凝縮

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

原子核の基底状態は通常殻模型的構造を持つことが知られており、密度の飽和性に基づいて液体的構造を有している。これに対し、励起状態に 粒子からなる気体的クラスタ構造状態が生じ、更にそれらが最低エネルギー軌道を占有する、凝縮現象が起こることが最近になって知られるようになった。これは今まで議論されたことのない全く新しい構造であり、現在まで、Hoyle 状態と呼ばれる ^{12}C 原子核の第二 0^+ 状態でそのような量子状態が実現されていることが明らかになっている。このような状態を最適に記述するための微視的模型波動関数が知られているが、本研究ではその模型波動関数の有用性をいくつかの核で詳細に調べた。その結果、 ^8Be 、 ^{12}C を含め、 ^{16}O 原子核の励起状態で 凝縮描象が非常によく成り立っていることを、核子間の自由度に基づいて多角的側面から示した。この結果は既に論文に発表されている。更に ^{16}O 原子核においては我々が開発した共鳴状態の取り扱う処方箋を用いて、4 つの 粒子からなる 4 凝縮状態の存在を核子の自由度に基づいた微視的側面から示した。4 凝縮状態の波動関数の性質を一体密度行列等を用いて詳細に調べ、

凝縮度等を定量的に評価した結果、直交条件模型を用いて昨年度我々が行った理論計算とほぼ一致する結果を得た。これにより、 ^{16}O 原子核において 4 凝縮状態が存在することが理論的にほぼ確定したと考えている。この結果は論文に纏め現在 Phys. Rev. C に投稿中である。この状態は観測されている 6 番目 0^+ 状態に対応すると考えられるが、現在 4 凝縮状態の探索実験が各所で進行中であり、今後実験データとの詳細な比較検討を行っていきたい。

(2) 内部座標による密度行列

(船木、山田(関東学院大)、堀内(RCNP)、東崎(RCNP)、G. Röpke(Rostock 大)、P. Schuck(IPN, Orsay))
有限原子核での α 粒子のボーズ凝縮の度合を調べる有力な方法は、重心座標を除いた内部座標を使って得られた波動関数の密度行列を計算し、その固有値の分布を調べることである。この内部座標としては Jacobi 座標系を採用して来たが、これ以外の座標系を採用すると固有値分布が Jacobi 座標系(とその関連座標系)を用いた結果と著しく異なる場合があることを見出した。その原因の解明に成功し、さらに Jacobi 座標系(とその関連座標系)を用いることの重要性を明らかにした。この結果は既に論文に発表されている。

(3) ^{11}B における Hoyle アナログ状態

(山田(関東学院大)、船木)

^{11}B 原子核の 3 番目(3/2)⁻ 状態は、基底状態からの強いモノポール遷移が観測されている。比較的低い励起状態への強いモノポール遷移は、その励起状態がクラスタ構造を有することの強い証拠であることを我々は昨年度示しており、この状態は発達したクラスタ構造を持つことが示唆される。更に反対称化分子動力学(AMD)に基づく計算により、この状態は $+$ $+$ t の三体クラスタ構造を有し、3 クラスタ凝縮状態である、Hoyle 状態(^{12}C 原子核の第二 0^+ 状態)の類似状態であるとの指摘がなされた。我々は $+$ $+$ t 三体直交条件模型に基づき、 ^{11}B 原子核の Hoyle アナログ状態を調べた。その結果、この 3 番目(3/2)⁻ 状態は発達した $+$ $+$ t クラスタ構造を持つが、Hoyle 状態のような 粒子一体場への強い凝縮構造は有しておらず、むしろ $+$ $+$ 閾値近傍の 2 番目(1/2)⁺ 状態

が、 $+ +t$ の3つのクラスターがゆるくS波で結合したHoyle アナログ状態であることを示した。この結果は現在論文に纏め投稿準備中である。

【3】時間依存密度汎関数理論による物質の光応答

(1) 分子の振動子強度分布の系統的計算

(川下、矢花、岩田、中務(理研))

時間依存密度汎関数理論に基づく振動子強度計算を、多種の分子(2原子分子の例として、 N_2 , O_2 , 3原子分子として H_2O , CO_2 、有機分子の例として C_2H_2 , C_2H_4 , C_6H_6 , $C_{10}H_8$ 、サイズの大きい分子としてフラールン)に対して系統的に計算し、本手法が極めて高い精度で振動子強度分布を記述することを示した。計算では実時間法を用い、吸収境界条件を課すことにより、広範な振動数領域の振動子強度分布を高い精度で求めている。さらに、振動子強度の寄与がどの軌道によるものかの分類を、実時間計算により求める方法を開発し、分析を行った。

これらの結果は、Taylor&Francis社から出版予定の書籍「Charged Particle and Photon Interactions with Matter: Recent Advances, Applications, and Interfaces」の中の1章として発表する予定である。

(2) 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、乙部(原研)、G. F. Bertsch(ワシントン大))

我々が開発した、無限周期系に対する時間依存密度汎関数理論の枠組みを用いて、バルクSiに超短パルスレーザーを照射した際に生じるコヒーレントフォノンの生成メカニズムに関する検討を行った。コヒーレントフォノンの生成メカニズムに関して、従来、2つのメカニズムが提唱されてきた。一つは撃力的なラマン散乱過程であり、パルス光が照射中に起こる電子の一時的な励起に起因して力が発生するというメカニズムである。もう一つは実励起が起こることにより原子の平衡位置がずれることに起因して力が発生するというメカニズムである。我々の計算は、時間依存密度汎関数理論に基づく計算が上記2つのメカニズムを包含することを明確に示すものであった。コヒーレントフォノンの生成に関しては、従来の理論研究は現象論的な記述にとどまっていたが、本研究により第一原理からの記述が可能となった。

本研究における議論の過程で、強く実励起が起こるプロセスに対しては、パルス光の伝播と単位胞内の電子ダイナミクスを切り離して議論することができず、Maxwell方程式と時間依存Kohn-Sham方程式を結合した取扱が不可避であるとの認識が得られた。今後このような視点から、光絶縁破壊の記述や、固体表面とパルス光の相互作用に関する検討を行いたいと考えている。

< 学位 >

1. 理学博士

川下洋輔

Real-time calculations for photo-induced phenomena in molecules based on time-dependent density functional theory

2. 理学修士:

笹倉啓介

T D H F B法による核内対相関と原子核の非線形振動運動の研究

篠原 康

時間依存密度汎関数理論に基づくコヒーレントフォノン生成メカニズムに関する研究

村山 聖

原子核の負パリティ励起状態の系統的研究

< 発表論文 >

1. Response Functions in the Continuum of Deformed Nuclei Studied with the Time-Dependent Density-Functional Calculations
Inakura Tsunenori, Nakatsukasa Takashi, Yabana Kazuhiro
International Journal of Modern Physics E, Volume 18, Issue 10, pp. 2088-2092 (2009).
2. Systematic study of electric dipole excitations with fully self-consistent Skyrme HF plus RPA from light to mediummass nuclei
Tsunenori Inakura, Takashi Nakatsukasa, Kazuhiro Yabana
European Physical Journal A 42 (2009) 03
3. Self-consistent calculation of nuclear photoabsorption cross section: Finite amplitude method with Skyrme functionals in the three-dimensional real space
Tsunenori Inakura, Takashi Nakatsukasa, Kazuhiro Yabana
Physical Review C 80 (2009) 044301
4. Linear Response Calculations With Skyrme TDHF+BCS
S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura, Y.Hashimoto, K.Yabana
RIKEN Accelerator Progress Report 42, 49(2008)
5. Tilted axis rotation and t-band in 1820s with the three-dimensional cranked Hartree-Fock Bogoliubov method,
Y. Hashimoto and T. Horibata, Eur. Phys. J. A42, 571-575 (2009).
6. A description of t-band in 1820s within the fully microscopic calculation,
Y. Hashimoto and T. Horibata, to appear in INFORMATION.
7. Quantum mechanical effects in tilted axis rotations in 1820s,
Y. Hashimoto and T. Horibata, to appear in AIP Conference Proceedings.
8. Internal One-Particle Density Matrix for Bose-Einstein Condensates with Finite Number of Particles in a Harmonic Potential
T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki
Phys. Rev. C **79**, 054314 (2009). (2009/May.)

9. Concepts of nuclear α -particle condensation
Y. Funaki, H. Horiuchi, W. von Oertzen, G. Röpke, P. Schuck, A. Tohsaki and T. Yamada
Phys. Rev. C **80**, 064326 (2009). (2009/Dec.)
10. Alpha clustering and condensation in ^{16}O
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics
Int. J. Mod. Phys. A **24**, 1995-2002 (2009). (2009/Apr.)
11. Alpha clustering and monopole strengths in light nuclei
T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, K. Ikeda and A. Tohsaki
Proceedings of KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics
Int. J. Mod. Phys. A **24**, 2043-2052 (2009). (2009/Apr.)
12. Microscopic wave function of alpha condensation
A. Tohsaki, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and T. Yamada
Proceedings of KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics
Int. J. Mod. Phys. A **24**, 2003-2018 (2009). (2009/Apr.)
13. α -particle condensed state in ^{16}O
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of Franco-Japanese Symposium, "New Paradigms in Nuclear Physics"
Int. J. Mod. Phys. E **18**, 2083-2087 (2009). (2009/Nov.)
14. Alpha-particle clustering in nuclei and four-alpha-particle condensation in ^{16}O
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of the 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms
to be published in the CERN Proceedings series.
15. Present status of α -particle condensed states in $4n$ self-conjugate nuclei
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of the 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCN2009)
to be published in the AIP Conference Proceedings.
16. Alpha-particle condensed states in nuclei
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of the International Workshop on "Hadron and Nuclear Physics (HNP09)"
to be published in World Scientific.
17. Alpha clustering and condensation in ^{16}O
Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Röpke, P. Schuck and A. Tohsaki
Proceedings of the International Symposium on "Forefronts of Researches in Exotic
Nuclear Structures (Niigata2010)"
to be published in Modern Physics Letters A.

18. First-principles description for coherent phonon generation in diamond
Y. Shinohara, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, K. Yabana, T. Otobe and G.F. Bertsch
proceedings of The 3rd Theory Meets Industry International Workshop,
J. Phys.: Condens. Matter , in press.
19. A massively-parallel electronic-structure calculations based on real-space density functional theory
J.-I. Iwata, D. Takahashi, A. Oshiyama, T. Boku, K. Shiraishi, S. Okada, K. Yabana
J. Comp. Phys. 229 pp.2339-2363 (2009).
20. First principle calculation for high harmonic generation in diamond
T. Otobe, K. Yabana, J.-I. Iwata
J. Comp. Theor. Nanoscience 6 pp.2545-2549 (2009).
21. Oscillator strength distribution of C-60 in the time-dependent density functional theory
Y. Kawashita, K. Yabana, M. Noda, K. Nobusada, T. Nakatsukasa
J. Mol. Struct. THEOCHEM 914 pp. 130-135 (2009).

< 国際会議発表 >

1. TDDFT simulation for ultrafast dynamics in molecules and dielectrics
K. Yabana
CECAM-LightNet workshop on Computational Challenges emerging from Next-Generation Light Sources (DESY, Hamburg, 2009.10.13-15)
2. Time-dependent density functional theory : A comparative study between nuclear and electronic systems
K. Yabana
Arctic FIDIPRO-EFES Workshop: Future Prospects of Nuclear Structure Physics (Saariselka, Finland 2009.4.20-24)
3. Real-time calculation for RPA response and nonlinear dynamics
K. Yabana
Multidisciplinary Workshop on the Random Phase Approximation (Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2010.1.26-29)
4. Systematic calculation of electric dipole strength with Skyrme-HF plus RPA
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (Univ. of Tsukuba, 2009. 11. 9-13)
5. Systematic calculation of electric dipole strength with Skyrme-HF plus RPA

- T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
INTERNATIOAL SYMPOSIUM Forefronts of Researches in Exotic Nuclear
Structures ---Niigata2010--- (Niigata, 2010. 3. 1-4)
6. Systematic calculation of E1 strength with fully self-consistent Skyrme-HF+RPA
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
10th Internatioal Symposium on Origin of Matter and Evolution of the
Galaxies (OMEG10) (RCNP, 2010. 3. 8-10)
 7. Systematic calculation of electric dipole strength with Skyrme-HF plus RPA
T. Inakura, T. Nakatsukasa, K. Yabana
JUSTIPEN workshop (JIHIR, ORNL, 2010. 3. 15-17)
 8. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB
with a schematic pairing functional,
The 4th LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop [ORNL Oak Ridge, Tennessee 2010.03.15 - 03.17]
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
 9. Possible mechanism of the t-band based on the fully microscopic calculation,
Yukio Hashimoto and Takatoshi Horibata,
Fifth international conference on information (Kyoto Univ., Kyoto, November 6-9, 2009)
 10. Quantum mechanical effects in tilted axis rotations in 182Os,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
The 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (Univ. of Tsukuba, November 9 - 13,
2009)
 11. TDHFB calculation in nuclear system,
Y. Hashimoto,
Non-equilibrium transport dynamics in finite quantum systems (Ibaraki Univ., December
20-21, 2009)
 12. Intermediate amplitude collective motion in ^{52}Ti with TDHFB,
Y. Hashimoto and K. Sasakura,
EFES-LIA workshop on the nuclear energy density functional method (RIKEN, February 26-27,
2010)
 13. Alpha particle clustering in nuclei and 4-alpha-particle condensation in ^{16}O
Y. Funaki
3rd International Conference on Collective Motion in Nuclei Under Extreme Conditions
(COMEX3), Mackinac Island, Michigan, USA, June 2-5, 2009. (招待講演)
 14. Alpha-particle clustering in nuclei and four-alpha-particle condensation in ^{16}O
Y. Funaki

12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Italy, June 15–19, 2009. (口頭発表)

15. Alpha-particle clustering in nuclei and 4-alpha-particle condensation in ^{16}O
Y. Funaki
Sixth Workshop on “Aspects of alpha correlations and alpha condensation in nuclear systems”,
Institute of Physics, Rostock University, Germany, August 5–7, 2009. (口頭発表)

16. Present status of α -particle condensed states in $4n$ self-conjugate nuclei
Y. Funaki
7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCS2009), University of Tsukuba, Japan,
November 9 – 13, 2009. (口頭発表)

17. Alpha-particle condensed states in nuclei
Y. Funaki
Workshop on “Hadron and Nuclear Physics (HNP09)”, RCNP, Osaka University, Japan, November
16–19, 2009. (口頭発表)

18. Alpha clustering and condensation in nuclei
Y. Funaki
International Symposium on “Forefronts of Researches in Exotic Nuclear Structures
(Niigata2010)”, Hotel Belnatio, Tokamachi, Niigata, March 1 –4, 2010. (口頭発表)

19. TDDFT Simulation for Electron-Phonon Dynamics in Dielectrics under
Ultrashort Laser Pulse
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Yosuke Kawashita, Jun-ichi Iwata,
Tomohito Otobe, The 3rd Theory Meets Industry International Workshop, Nov. 11-13,
2009, Nagoya, Japan.

20. Real-time TDDFT simulation for light-induced electron-phonon
dynamics in dielectrics,
Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Yosuke Kawashita, Jun-ichi Iwata,
Tomohito Otobe, International Symposium of Electronic Structure Calculations -Theory,
Correlated and Large Scale Systems and Numerical Methods-』, Dec. 7-9,
2009, Tokyo, Japan.

21. Simulation for Fermionic Dynamics: Nuclear vs Coulombic systems
K. Yabana
YITP International Workshop on Development of Nuclear Structure Models from the Viewpoint
of Nuclear Force (Kyoto Univ. 2009.5.20-22)

<国内研究会・学会等>

1. Skyrme-HF+RPA を用いた E1 励起モードの系統的計算

- 稲倉恒法, 中務孝, 矢花一浩
原子核の E1, M1 励起モードの探究と今後の戦略 (RCNP, 2009. 8. 6-7)
2. 208Pb や 132Sn などに現れる pygmy dipole resonance の性質について
稲倉恒法
日本物理学会 2010 年秋季大会 (山形大学, 2010.3.20-23)
3. 中重核に対する Skyrme-TDHF+"BCS" のアプローチ
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 65 回年次大会 [岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
4. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB with a schematic pairing functional,
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010)
[東京大学 小柴ホール 2010.02.18 - 02.21]
5. Skyrme-TDHF+"BCS" を用いた線形応答計算 ~ 系統的計算を求めて ~,
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 [パノラマランド木島平 2009.08.24 - 08.29]
6. 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
原子核・ハドロン物理学 [KEK 3 号館, 2009.08.11 - 08.13]
7. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB
with a schematic pairing functional (ポスター発表),
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution
of the Galaxies (OMEG10), [RCNP 銀杏会館 2010.03.08 - 03.10]
8. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB
with a schematic pairing functional (ポスター発表),
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩
INTERNATIONAL SYMPOSIUM Frontiers of Researches in Exotic
Nuclear Structures (Niigata2010), [新潟十日町 ホテル BELNATIO 2010.03.01 - 03.04]
9. Skyrme-TDHF+"BCS" を用いた線形応答計算 ~ 系統的計算を求めて ~ (ポスター発表),
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 [パノラマランド木島平 2009.08.24 - 08.29]
10. HFB + GCM による 182Os の t バンドの構造,
橋本幸男、堀端孝俊,
日本物理学会第 65 回年会、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]

11. TDHFB による非線形振動運動の緩和現象の研究,
 笹倉啓介、橋本幸男、矢花一浩,
 日本物理学会第 65 回年会、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
12. 軸対称調和振動子基底を用いた TDHFB による軽い核の線形応答,
 三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩,
 日本物理学会第 65 回年会、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
13. ガス的 クラスタ構造と凝縮,
 船木靖郎
 KEK 理論センター研究会,
 原子核・ハドロン物理、KEK、2009 年 8 月 11 日 - 13 日
14. 共鳴の条件を取り入れた ^{16}O における 4^- 凝縮状態へのアプローチ,
 船木靖郎
 日本物理学会第 65 回年次大会、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
15. 第一原理電子ダイナミクス計算によるコヒーレントフォノン生成機構の解明,
 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 65 回年次大会、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
16. 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機構の解明,
 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 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 25 日-28 日、熊本大学
17. 第一原理計算によるコヒーレントフォノン生成機構の解明,
 篠原康、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁
 第 70 回応用物理学会学術講演会 2009 年 9 月 8 日-11 日、富山大学
18. 実時間・実空間法による固体ダイナミクスの第一原理シミュレーション,
 篠原康、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁
 次世代スーパーコンピューティングシンポジウム 2009、2009 年 10 月 7 日-8 日、東京
19. 多核子移行反応の微視的定式化への可能性
 矢花一浩
 日本物理学会第 65 回年次大会シンポジウム「速い中性子捕獲、元素組成第 3 ピーク周辺の核物
 理、宇宙物理」、[岡山大学, 2010.03.20 - 03.23]
20. 光と物質の相互作用に対する実時間第一原理計算
 矢花一浩
 東京大学物性研究所短期研究会「計算物理学」、2009 年 12 月 10 - 11 日

その他

<招待セミナー>

「Description of coherent phonon generation based on first-principle calculation」

Yasushi Shinohara, Kazuhiro Yabana, Yosuke Kawashita, Jun-ichi Iwata,
Tomohito Otobe, George F. Bertsch.

2010年1月16日、電気通信大学小林研究室

Real-time TDDFT for linear and nonlinear optical responses

K. Yabana

Center for Theoretical Quantum Dynamics, Univ. Washington, 2009.7.17

<集中講義>

九州大学理学研究科大学院集中講義、矢花一浩、2009年10月28 - 30日

<一般向け講演会>

ミクロな物質世界の運動 - 波動力学のコンピューターシミュレーション -

矢花一浩、Public Lectures “Computer simulations of nuclear and electronic many-body systems” 新潟大学、2010年3月5日

<外部資金>

科研費補助金 若手研究(B) (研究代表者：船木靖郎) 課題番号 21740209 「原子核におけるガスのクラスター構造、及びクラスターによる量子凝縮状態の研究」(2009年度 900千円)

VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎
准教授	新井一郎、江角晋一、小沢 顕
講師	小松原哲郎、笹 公和、中條達也、Peter Schury
助教	鈴木 宏
準研究員	長江大輔
研究員	下村真弥、洞口拓磨
技 官	加藤純雄
大学院生	飯島正史 (D3)、池田義雅 (D3)、山口香菜子 (D3)、渡邊健悟 (D2)、森口哲朗 (D2)、坂田洞察 (D1)、佐野正人 (D1)、横山広樹 (M2)、梶谷緑 (M2)、浜田英太郎 (M2)、木村瑞希 (M2)、轟木貴人 (M2)、生山友博 (M2)、伊藤由太 (M2)、小川賢一郎 (M2)、石橋陽子 (M1)、大石寛人 (M1)、横山和幸 (M1)、関根裕輝 (M1)、竹内理将 (M1)

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

(1-1) 稀少 RI リングプロジェクト

1-1-1. プロジェクトの現状

平成16年4月以来、理研のRIビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして稀少 RI リングの検討を行っている。平成21年度は、稀少 RI リングの根幹をなす等時性蓄積リング本体の詳細設計を業者 (日立および住友重機) に依頼した。各業者からの設計報告書と見積もりが12月に提出された。平成21年度の後半からは、予算規模削減のために等時性蓄積リングを TARNII のセクター磁石のみで構成するとともに、入射ラインとして SHARAQ を利用し、SHARAQ から直接蓄積リングに RI ビームを入射するスキームの検討を始めた。ビーム光学系は、現在検討中であるが、蓄積リングの配置例が、図1に示されている。SHARAQ を入射ラインとすることにより、ビームの遅延時間が $1.2 \mu\text{s}$ 程度になり、蓄積リングに入射する RI ビームのエネルギーを 100 A MeV まで下げる予定である。また、TARNII のセクター磁石を使用することで運動量アクセプタンスが制限され (磁極幅で制限される)、仕様が $\pm 0.5\%$ に変更された。平成22年度は、磁場分布計算などを進め、TARNII のセクター磁石のみで構成する蓄積リングの詳細設計を行うとともに、キッカー磁石の実機仕様のテストを行い、要求される遅延時間 (トリガー信号入力からサイクロトロン貫通まで 450ns) でキッカー磁石が動作するかテストを行う。また、ショットキプローブなど、関連する実験装置の開発も進める予定である。

1-1-2. 稀少 RI リングのビーム光学シミュレーション

理研 RIBF [1, 2] における稀少 RI リング [3, 4] は、1 セクション当たり 4 台の双極電磁石からなる 6 箇所曲線部と、セクション間の 6 箇所直線部からなる、周長 63.2 m のサイクロトロン型のリングである。合計 24 個の双極電磁石は、ビームの偏向と収束の機能を兼ね備えている。ビームの周回数は 1,000 回を想定している。性能の面では、ビームのエミッタンスを数十 $\pi \text{ mm-mrad}$ として、運動量領域 $\pm 0.5\%$ にわたって 10^{-6} の等時性が要求される。

稀少 RI リングのデザインを検討し必要なパラメータを決定するために、昨年度に開発した高精度

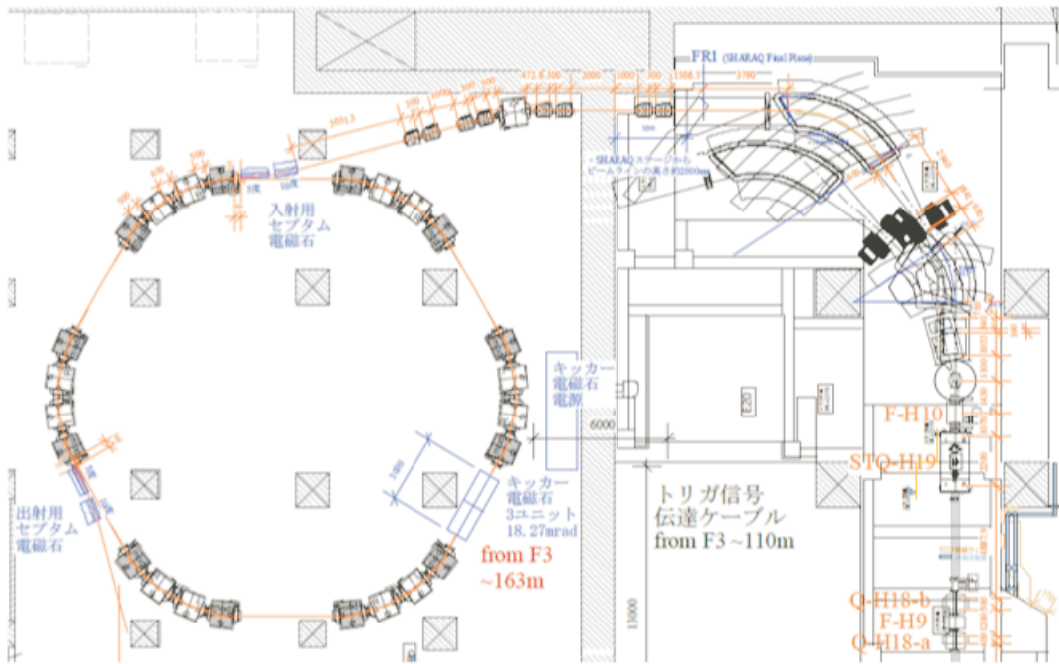


図 1: RIBF における稀少 RI リングの 現状レイアウト

のビーム光学シミュレーションを用いた。計算は 4 次のルンゲ-クッタ法を用い、ビーム軌道を小さな空間セグメントに分割し、各々のセグメントの中で円軌道を描くと仮定した幾何学的追跡法を採用している。また磁石が発生させる磁場の形として、矩形 (Hard-Edge) を採用した。

水平方向の粒子軌道を、10 周分のみ図 2 の左側に示した。中心運動量に比べ +0.5%、0%、-0.5% の運動量を持つ粒子が、水平方向の運動量分散 (8.366 cm/%) を保ちながら進んでいる。垂直方向の粒子軌道は図 2 の右側に示した。こちらでは、全ての粒子は中心運動量を持ち、中心軌道面の +1 cm、0 cm、-1 cm の位置から軌道が始まっている。この方向では、粒子がベータトロン振動している様子が見える。

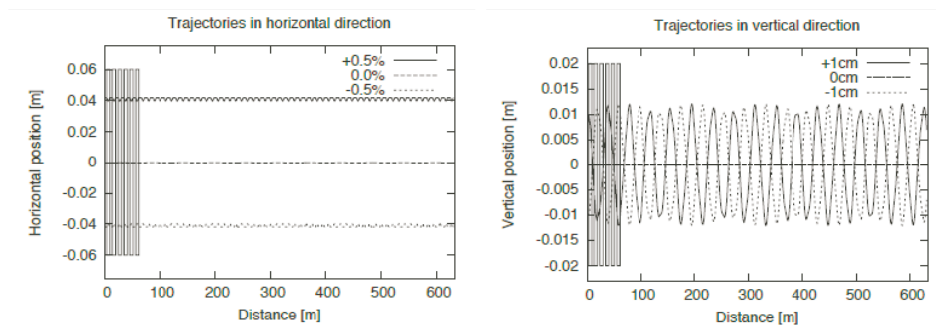


図 2: 水平方向 (左) と垂直方向 (右) の 10 周分の粒子の軌道。細長い四角は稀少 RI リングの曲線部を表す。

次に、 10^{-6} の等時性を保つエミッタンスを調べた。図 3 に、粒子が 1000 周運動した時の水平方向と垂直方向のエミッタンスを、入射位置での位置と角度の関数として表した。+で表される範囲が、 10^{-6} の等時性を保つエミッタンスを示す。粒子の運動量に関わらず、等時性を保つエミッタンスは、

水平方向と垂直方向でそれぞれ約 100π mm-mrad と 20π mm-mrad と分かった。これは BigRIPS から供給される不安定核ビームを通すのに、十分な広さを持っている。

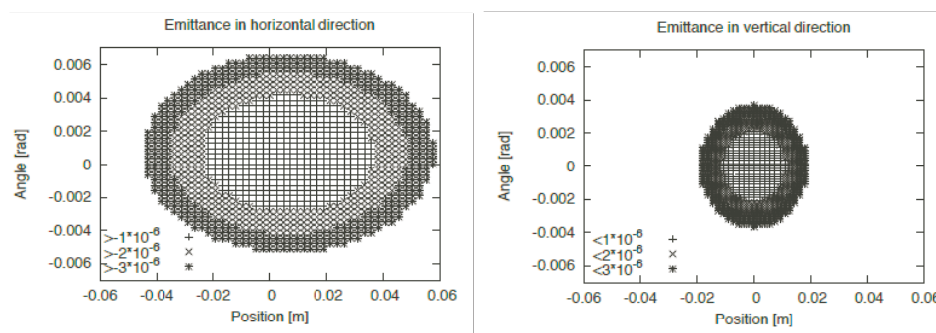


図 3: 水平方向 (左) と垂直方向 (右) の 1000 周分のエミッタンス。

現在は、磁場計算コード TOSCA を使用して磁石が実際に発生させるであろう磁場分布を計算している。より現実に近い磁場分布をシミュレーション計算に入れることにより、稀少 RI リングのデザインを決定しようとしている。

1-1-3. 磁場校正のためのクラスターイオン源の開発

現在、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) において生成量が少なく非常に短寿命な不安定核の質量を精密に測定するための等時性蓄積リングが計画されている。この装置では、宇宙元素合成過程の r プロセスに関係する核種の質量を精密に測定することができる。このために求められる質量精度は 10^{-6} である。この精度を実現するためには、リングの磁場の時間的な揺らぎも 10^{-6} 以下の精度で校正する必要がある。本研究では、原子クラスターを磁場の揺らぎの測定のプローブとして用いるために、そのクラスター生成のためのクラスターイオン源の開発を行った。原子クラスターの磁気剛性は RI ビームの磁気剛性と一致させる必要がある。2 重閉殻核で r プロセスに大きな影響を与えると考えられている ^{78}Ni を例にとり、このときの要求されるクラスターサイズを表 1 に示す。ここでは、RI ビームのエネルギーとして $200[\text{MeV}/u]$ を仮定した。

表 1: 原子核の磁気剛性に対応するクラスター

	原子数	質量	エネルギー	電荷
原子核 (^{78}Ni)	-	78[u]	$\sim 200[\text{MeV}/u]$	+28
Cu クラスター (Cu_n)	800	$63 \times 800[\text{u}]$	$\sim 30[\text{keV}]$	+1
W クラスター (W_n)	280	$184 \times 280[\text{u}]$	$\sim 30[\text{keV}]$	+1

クラスターを磁場校正に用いるためには、最低限このサイズのクラスターを生成できる必要がある。昨年度は Cu 及び W クラスターイオンについて要求されるクラスターサイズが生成できていることを確認した。Cu クラスターについての結果を図 4 に示す。

しかし、現時点でクラスターの強度はまだ非常に小さく、強度を上げる必要がある。さらに分解能の向上と実際に蓄積リングに組み込むために、レーザーイオン化システムの構築や電源の開発、シミュレーションなどが必要であり、今後行っていく予定である。

1-1-4. 大面積 MCP を用いた飛行時間検出器の開発

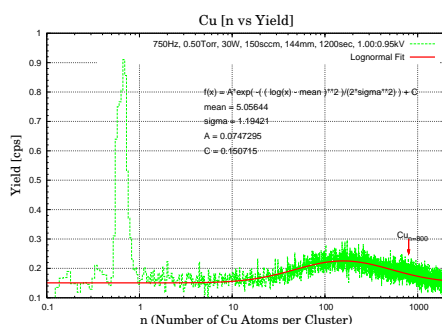


図 4: Cu クラスタースペクトル

稀少 RI リングでの質量測定は RI ビームの飛行時間を測定することにより行う予定である。その為の飛行時間検出器の開発に着手した。この飛行時間検出器に求められるのは RI ビームの電荷が検出器通過前後で変化しないこと、大きなビーム径で飛行する RI ビームを全て検出することである。その為、この検出器は可能な限り薄くかつ大面積を有しなくてはならない。このような飛行時間検出器はすでに GSI の ESR で使用されている [5]。これは炭素薄膜に RI ビームを通過させ、その際に炭素薄膜から放出される電子を電磁場中で制御し、大面積の検出器 (MCP) に導くものである。我々も GSI のものと同様の原理で動作する検出器を開発する予定である。現在、小面積の MCP を用いた原理実証機の製作を進めている。小面積 MCP は購入済みで線源を用いた動作テストの準備が進行中である。炭素薄膜は、厚さが $60 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ および $70 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ で、大きさが $100 \text{mm} \times 50 \text{mm}$ のものをすでに製作済みである。並行して、薄膜から放出された電子を制御する為の電場を印加する電極の製作、磁場発生用のコイルの製作を進めている。今後は原理実証機を用いて、線源を用いたテスト、筑波大学タンデム加速器でのビーム照射実験を行う予定であり、その結果を基に大面積の飛行時間検出器を製作する。今年度後半には放射線医学研究所において、大面積検出器を用いた重イオンビームによる照射実験を行う予定である。

(1-2) 不安定核の反応断面積測定

1-2-1. 固体水素標的を用いた ^{11}Li の反応断面積実験

原子核を理解する上で、核半径は重要な物理量の一つである。近年盛んに行われている不安定原子核の研究から、核図表の安定線から離れた中性子過剰核では、安定核には見られない性質を持つことがわかってきた。その一つが、中性子スキンである。これは、原子核を構成する中性子と陽子のフェルミエネルギーの違いによって、中性子分布と陽子分布に差がある構造をいう。

今まで、中性子スキンは核子密度分布と陽子分布から求められてきた。前者は反応断面積実験から、後者はレーザーを使用したアイソトープシフトの測定から得られる。しかし、アイソトープシフトから陽子分布を求めることができるのは、特定の原子核に限られている。そのため、現在、スキンが未知である中性子過剰核は数多く存在する。

本研究は、固体水素標的を用いて ^{11}Li の反応断面積を測定し、過去の反応断面積のデータと合わせて、 ^{11}Li の中性子スキンを導出することを目指す。スキンを導出するためには、原子核の陽子分布と中性子分布の違いを反応断面積に反映させなければならない。低エネルギー領域において、陽子-中性子全断面積は、陽子-陽子、もしくは、中性子-中性子全断面積に比べて数倍大きいことが知られている。これは、標的となる陽子が原子核の陽子分布と中性子分布に対して異なる感度を持つことを意味する。 ^{11}Li はアイソトープシフトの測定から中性子スキンを求めることができるので、本研究から得られた値と比較することができる。この手法が確立すれば、アイソトープシフトの測定が

困難な不安定核に関して、反応断面積さえ測定すればスキンを見積もることができると期待できる。

実験は理化学研究所の RI ビーム発生装置 RIPS で行った。一次ビームとして核子当たり 100 MeV の ^{18}O を Be 標的に当て、核子当たり 45 MeV の ^{11}Li ビームを生成した。図 5 は反応標的前段での粒子識別の様子である。固体水素標的、及び、炭素標的に ^{11}Li を入射させ、それぞれの標的での反応断面積を測定した。この実験では、直径 50mm、厚さ 30mm の固体水素標的を使用した。現在、実験データの解析中である。

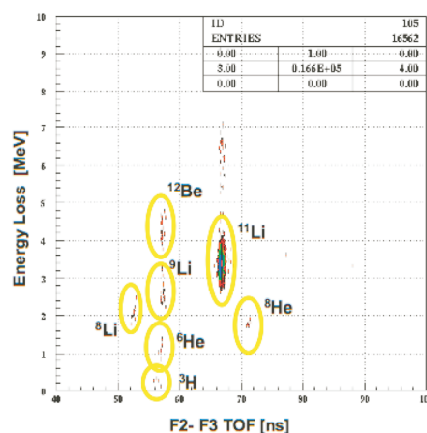


図 5: 反応標的前段の粒子識別図。

1-2-2. Na アイソトープの反応断面積測定

理化学研究所の Projectile-Fragmentation Separator である BigRIPS において、中性子過剰な Ne, Na アイソトープを生成し、その反応断面積を測定する実験を行った。実験のセットアップを図 6 に示す。

核子あたり 350 MeV に加速された ^{48}Ca ビームは、BigRIPS 入り口 (F0) に置かれた Be 標的に照射され、入射核破砕反応を起こし、Na アイソトープを含む様々な破砕核へ変化する。その様々な破砕核から $B\rho$ 、 ΔE とスリットにより目的の核を選別する。反応断面積測定のための炭素標的は F5 に置かれた。 $B\rho$ や ΔE 、TOF (Time of Flight) の情報を使って粒子を識別し、F3 および F7 で目的の核の数を数えることで反応断面積を導出する。我々のグループは、実験では主に F3 での粒子識別に用いる ΔE 測定用イオンチェンバーの準備を担当した。

Ne, Na, Mg の $N=20$ の領域は ”island of inversion” と呼ばれており、中性子数が魔法数であるにも関わらず、核子の殻構造の準位が安定核と比べて変化し、核の変形を引き起こしている可能性が示唆されている。Na の場合、準位の変化が支配的になるのは $N=18$ からだという報告があり [6]、 $N=18$ よりも中性子過剰側に位置する Na アイソトープの核半径は、それらの核の殻構造解明の手がかりになることが期待される。

1-2-3. B アイソトープの荷電変換断面積 (CCCS) 測定

近年、不安定核の研究が進み、陽子や中性子の分布が安定核にはみられないスキンやハローの構造を持つ原子核が発見されてきた。中性子数が過剰な B 同位体では荷電変換断面積が中性子が増加しても変化しないことが報告されている。これは核内における陽子の分布半径が中性子数に依らないことを示唆し、中性子過剰な B 同位体ではスキン・ハロー構造が起きていることを示している。但し測定されている荷電変換断面積の誤差が大きい為、詳細な議論ができていないのが現状である。そこで

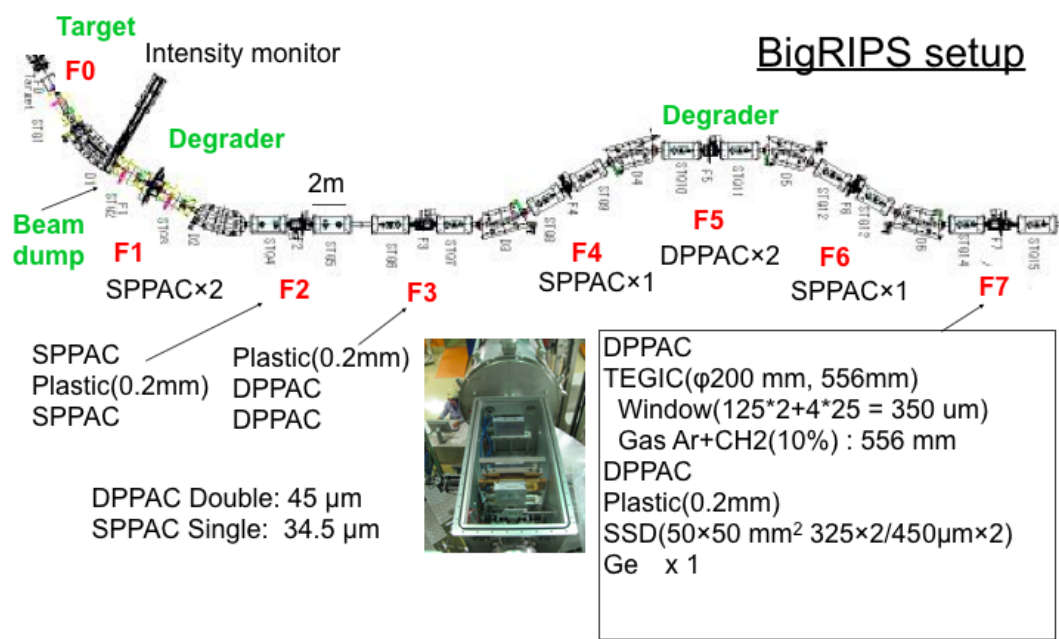


図 6: BigRIPS Setup

我々は^{11,12,13,14,15}B 同位体の詳細な荷電変化断面積測定を行った。さらにその後の展望として、測定した荷電変化断面積から B 同位体の荷電半径（陽子分布半径）を導出し、中性子過剰核におけるスキン・ハロー構造の解明につなげる。荷電変化断面積から荷電半径を求める方法は、手法としてはいまだ確立されていないものの、高い精度で荷電半径を決定できる可能性を持っている。

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

現在、荷電変換反応を起こさず B のままの粒子の同定を 4 枚のシリコン検出器のデータから用いて行っている。

(1-3) 不安定核の核モーメント測定

1-3-1. 不安定核⁴⁰Sc の核磁気モーメント測定

不安定核⁴⁰Sc(半減期 $T_{1/2} = 182\text{ms}$) は二重閉殻核で非常に安定な⁴⁰Ca の近傍に位置し、その構造は興味深い。しかしながら⁴⁰Sc の核磁気モーメント (μ) はまだ測定されていない。 μ は原子核の配置混合に敏感であるため、我々は昨年度から μ (⁴⁰Sc) の測定を始めた。

昨年度、我々は CaF₂ 結晶中だけで μ 測定を行った。しかし、純度が低かったこともあり、 μ の中心値を得ることは出来なかった。そこで今年度は大きく 3 つの改良を行った。まず初めに²⁰F のシステムチェックを行った。これまでの研究により、偏極重陽子ビームから偏極移行反応によって²⁰F の核偏極が確認されており、 μ の値も知られていたためである。²⁰F の NMR の結果を図 7 に示す。ま

た、 β 線測定のス/Nを向上させるためにエネルギー測定用の厚さ10mmのプラスチックシンチレータを製作した。さらに、電子散乱の影響を抑えるためチェンバーの素材をアルミからデルリンに変更した。

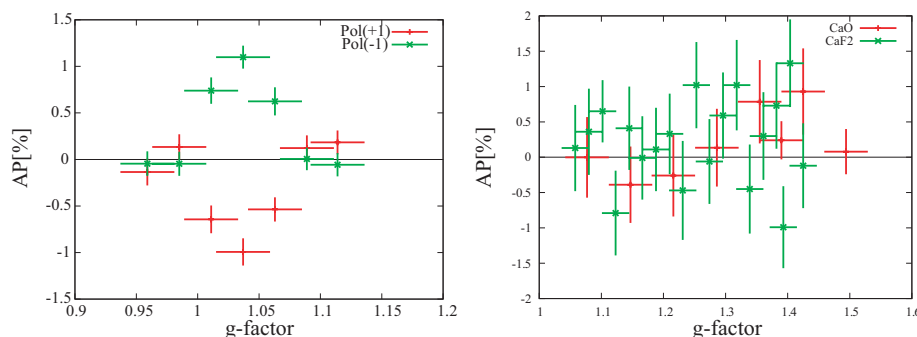


図 7: (左) ^{20}F の NMR スペクトル。(右) ^{40}Sc の NMR スペクトル

最後に、ストッパーを CaF_2 結晶から CaO のペレットに変更した。先行研究により、 ^{41}Sc が CaO 結晶中で核偏極を保持し、 ^{41}Sc の μ が CaO により測定されているためである。 CaO のペレットは CaCO_3 の粉末を圧縮し、電気炉で 900°C で一晩焼くことで作成した。

以上の改良を行った後の ^{40}Sc の NMR 測定の結果を図 7 に示す。この図からどちらのストッパーでも μ を決定することは出来なかった。これは我々が適用していた静磁場が偏極保持に十分でなかった可能性がある。またペレット作成の際に不純物が残っていた可能性もある。そこで今後の測定のためには静磁場を大きくし、より純度の高いストッパーを作成して実験することが必要になる。

1-3-2. 不安定核 ^{30}P の核磁気モーメントの測定

核磁気モーメントは原子核の構造をよく反映している。不安定核 ^{30}P の核磁気モーメントはまだ測定されておらず、その測定のためにまず、 ^{30}P の生成量と純度について評価を行った。

不安定核 ^{30}P は $^{30}\text{Si}(p,n)^{30}\text{P}$ 反応または、 $^{29}\text{Si}(d,n)^{30}\text{Si}$ 反応により生成する。陽子ビームについては 8,9,10MeV、重陽子ビームは 4,5MeV を用いて、標的は Si 単体を用いた。先ほどの反応により生成した ^{30}P は標的内に留まり、そこから β 線を放出するが、その β 線を標的の上下に配置したシンチレーションカウンターにより検出する。生成核は β 線の検出から得られるタイムスペクトルより判断することができる。実際に得られたタイムスペクトルを図 8 に示した。このスペクトルを指数関数でフィッティングを行い、生成核を推定した結果、 ^{30}P の生成の確認が確認されたが、それに伴い ^{29}P も生成されていることが判明した。そこで生成量を Y、純度を P としたとき、Figure of Merit(FOM)= $Y \times P^2$ と定義される FOM により評価を行った。この FOM の値が大きいほど、実際に核磁気モーメントを測定する際、実験的に有利になる。それぞれの実験条件での生成量及び純度、FOM について表 2 にまとめた。この結果から実験条件としては重陽子ビームで 4 MeV のエネルギーが実験に最適であることが判明した。

続いて ^{29}P の β -NMR を行い、ターゲット Si の偏極保持の確認および β -NMR のシステムチェックを行った。その結果、Si ターゲット中では核スピンの保持が確認され、 β -NMR についても、核磁気モーメントを決定できるようなデータが収集できることが確認できた。

(1-4) 低エネルギー核反応測定用検出器 GEM-MSTPC の開発

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

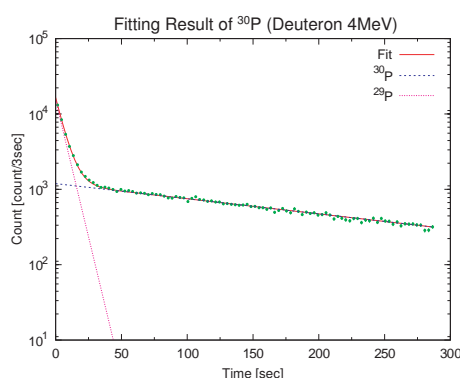


図 8: 重陽子 4MeV の時に得られたタイムスペクトルとフィッティング結果

表 2: 各実験における結果

Beam	Energy [MeV]	生成量 [Count/sec]	純度 [%]	Figure of Merit
Proton	10	$(75.7 \pm 1.1) \times 10^3$	90.2 ± 0.1	$(61.6 \pm 1.0) \times 10^3$
Proton	9	$(66.2 \pm 1.0) \times 10^3$	93.1 ± 0.3	$(57.4 \pm 0.9) \times 10^3$
Proton	8	$(76.5 \pm 3.1) \times 10^2$	94.8 ± 0.3	$(68.8 \pm 3.0) \times 10^2$
Deuteron	5	$(95.1 \pm 1.7) \times 10^3$	61.5 ± 0.1	$(59.7 \pm 1.3) \times 10^3$
Deuteron	4	$(13.2 \pm 1.5) \times 10^4$	50.8 ± 0.1	$(79.2 \pm 1.2) \times 10^3$

反応率測定をめざして、GEM(Gas Electron Multiplier) を採用した 3次元飛跡検出型ガス検出器(MSTPC) の改造を行っている。

昨年度に引き続き低圧で動作する重イオン用 GEM フォイルの最適化が最も重要な開発課題であった。大きな問題点は、(1) 低圧であるためにフォイル内での増幅度を十分に稼げないこと、(2) 重イオン入射強度が高くなるため、フォイルでの電子増幅に伴い発生する大量の陽イオンによりフォイル上部の電子ドリフト領域での電場が乱れ、性能が劣化すること、の2点にまとめられる。

両者の問題は、様々な形状(穴径穴間距離、穴周辺の絶縁部形状)の GEM フォイルおよび、陽イオン吸収用シールド GEM の配置に対する系統的測定によって基本的な解決をみた。本年度後半は、実際に重イオンビームを打込み、装置の長時間安定性を見ることとした。この開発実験では、高強度ビームによる増幅率の緩慢な低下が見られたため、これが GEM フォイル上でのゆっくりとしたチャージアップ事象に起因すると考え、環境をオイルフリーにし、GEM 表面の金属面(銅)に金コートを行い、解決することができた。

目標とする 100 kpps の ^8Li 入射環境では、増加するバックグラウンドイベントのため、従来用いていたデータ収集系が使えなくなる。そこで、反応を起こさなかった ^8Li ビームによるバックグラウンドイベントを棄却するため、GEM-MSTPC 下流には、GEM フォイルによる VETO カウンターが配置される。

VETO カウンターは、フォイルと信号読み出しアノード電極が近接して置かれ、なおかつビーム軸と平衡に GEM-MSTPC 直下流に配置される。そのため、開発実験当初は、MSTPC と VETO カウンター間で発生した電子も増幅され、遅延信号として表れるために、十分な棄却力を持つカウンターか否か判断することが困難であった。そこで、上流から流れてくる電子を吸収するための開口率の高いグリッドを置くことで、上記の問題が解決できることを示せた。最終的に得られたビームの棄却率はほぼ 99% で、初期の目標に到達することができた。2月に行った検出器の最終試験では、本実験の条件であるビーム入射強度 100 kpps でも十分な位置分解能(1mm 以下)と安定な増幅度を長時間

維持できる性能を示すことができた。

来年度は、4月に本実験を行い、測定結果の解析を行う。

(1-5) 多重反射飛行時間型質量分析器の開発

昨年、我々は理研において多重反射飛行時間型質量分析器:MRTOF-MSの開発を引き続き行った。この装置は、理研の低速RIビーム生成装置:SLOWRIにおける重要な実験装置の1つである。MRTOF-MSでは、半減期5[ms]までの非常に短寿命な不安定同位体の精密質量測定を可能にする。

MRTOF-MSは、最終的にガスセル、イオントラップ、多重反射チェンバーから構成される。ガスセルはRIPS, BigRIPS, GARISからの高エネルギーRIビームを熱運動化し、イオントラップはガスセルからのビームをさらに冷却、パルス化し、多重反射チェンバーはパルス化されたイオンを長い距離飛行させるために用いられる。これまで、多重反射チェンバーの構築を完了し、MRTOF-MSのために特化したイオン冷却用のトラップの開発を行い、必要なエレクトロニクスの構築を進めた。

特にイオントラップの開発は大きな成果である。このトラップは、一般的にこれまで用いられてきた4つのロッドを用いたものとは異なり、4重極電場を作るように6つの平らな電極配置で構成され、いままでにないデザインとなっている。(図9) こうすることで、イオンのトラップへの入射とは垂直の方向への引き出しが容易になる。これは自動的に引き出したイオンのエネルギーの広がりを減らすことになり、すなわち飛行時間における時間の広がりを小さくすることとなる。

我々は、この効果を冷却のためのバッファガスの圧力、冷却時間の変化に対する応答を測定することで確認した。ガス圧と冷却時間の増加に伴い、検出されるイオンの数は増大した。(図9) 一方、その時間分布に変化はなかった。すべての場合において、イオンのパルス幅は ~ 100 [ns]であった。

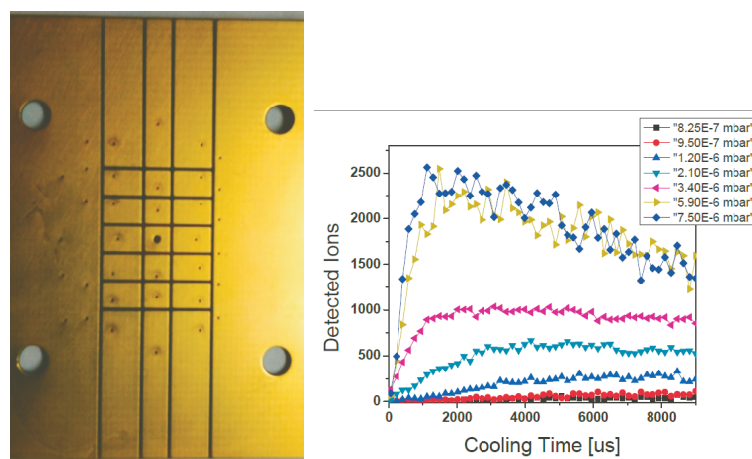


図9: (左) イオントラップの構成電極。中心出口は0.5mm。(右) 様々なヘリウム圧での冷却時間。イオン強度の増加は、イオンの集団がより小さな集まりとなり、より多くのイオンが出口から出ていることを表している。

理研でのMRTOF-MSの開発に加え、アメリカのニューメキシコ州立大学のGary Eicemann、Hermann Wollnikとの共同研究やミシガン州立大学/NSCLの質量測定グループとの共同研究も引き続き行う。ミシガン州立大学/NSCLのグループとは、次世代のイオン移動度分光計のための先進的なエレクトロニクスおよびシミュレーションの開発を行う。これらは、うまくいけば例えば血液サンプルのタンパク質分析といった生命科学分野での利用が容易になり、分光計が有用なものになる可能性がある。

(1-6) 重イオン用 CDCC 計算プログラムの開発

平成20年度は、弱束縛重イオン誘起反応、特に入射粒子の弾性散乱と分解反応を対等に取り扱う、CDCC (Continuum Discretized Coupled Channels) 法による三体問題的原子核反応のプログラム開発とその運用練習を行った。平成21年度はそのプログラムに関連した、分解反応生成物の運動量分布を実験に即した形で計算し、計算結果を実験と突き合わせる事を2・3の実験データを対象として行った。その結果は、岡山大学で行われた春の物理学会にて報告した。結果の一部を以下に図10に示した。

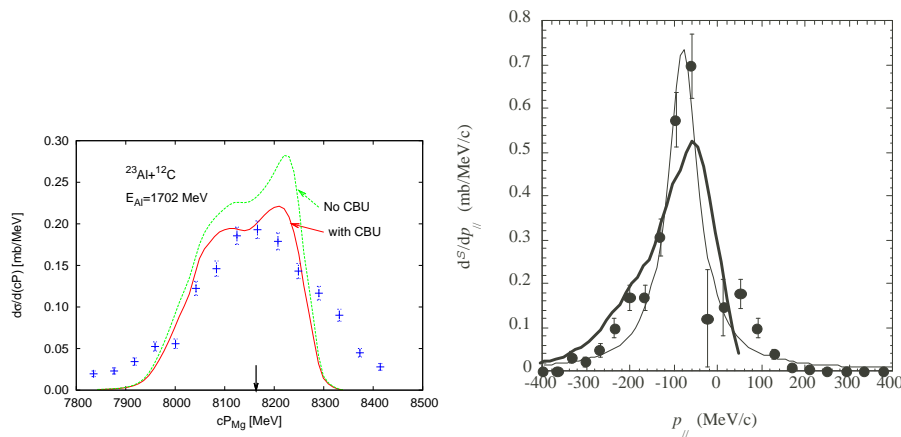


図10: (左) $^{23}\text{Al}+^{12}\text{C}$ 反応で0度方向に放出される ^{22}Mg の運動量分布。実験結果はクロスで示されている。実線は CDCC での計算結果。(右) $^{19}\text{C}+p$ 反応での0度方向に放出される ^{18}C の運動量分布。実験結果は黒丸で示されている。太い実線は CDCC での計算結果。

図10の左の図は、運動エネルギーが1702 MeVの ^{23}Al を ^{12}C 標的に照射し、0度方向に置かれた開き角が5度の検出器で測定した ^{22}Mg の運動量分布である。

二本の曲線は、核力のみによる分解(緑)及びクーロン分解を核力に加えた場合(赤)のCDCCによる計算値である。絶対値まで含めて、特に計算値に修正は加えていない。但し、実験値の横軸は絶対値が与えられていないので、原理的にこの場所であるはずだという所(矢印の位置)までずらしてある。

図10の右の図は、運動エネルギーが760 MeVの ^{19}C を陽子標的に照射した時の ^{18}C の運動量分布である。CDCCによる計算値が太い実線で示されている。(薄い実線は実験値をローレンチアンでフィットした結果である) CDCC計算では、 ^{19}C を $^{18}\text{C}+n$ として考えている。先行研究より ^{19}C のバレンス中性子は、 s -waveが主要であるので、CDCC計算でも s -waveを仮定している。計算値は、実験値の一中性子剥離断面積に規格化しているが、実験値の幅はよく再現できている。

重イオン原子核物理は未だ歴史が浅いので、使用するパラメータに未だ不確定要素が多いので断定的では無いが、これらの計算結果を見ると将来性は充分にあると思われる。

ここで開発したプログラムは、詳しい説明付きで、以下のホームページにて公開している。

<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/~yaoki>

更に、このプログラムに関連した mini-workshop を行い、その結果、九州大学でも重陽子関連の CDCC プログラムが公開された。

(1-7) 加速器質量分析法 (AMS) による宇宙線生成核種分析

筑波大学 AMS システムでは、半減期 30.1 万年の宇宙線生成核種 ^{36}Cl について 10 MV の加速電圧で加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry : AMS) が可能となっている。 ^{36}Cl は同重体 ^{36}S が妨害となり検出が難しい放射性核種であるが、地球環境分野への応用が期待されている。 ^{36}Cl -AMS の検出限界は $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 同位体比で 10^{-16} レベルであり、測定可能な同位体比範囲は $10^{-10}\sim 10^{-15}$ となっている [9]。また現在、新たに宇宙線生成核種 ^{41}Ca の AMS 開発を進めている。

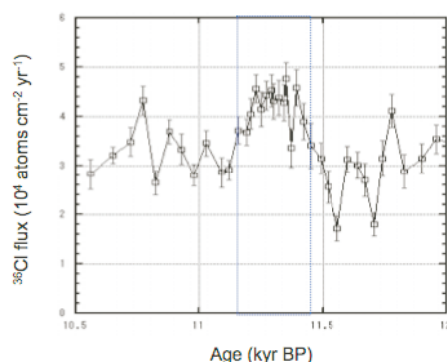


図 11: 南極ドームふじアイスコアを用いて測定された宇宙線生成核種 ^{36}Cl の降下量変動。約 11.2-11.4 kyr BP 付近に宇宙線強度変動に起因する ^{36}Cl 降下量の増大が確認できる。

2009 年度は地球環境試料を中心に 332 試料の AMS 測定を実施した。「南極ドームふじアイスコア第二期プロジェクト」では、コア深度 320 - 547 m (10.5-22.5 ka BP) のアイスコア試料を 0.5 m 間隔 (時間分解能 30-40 yr/sample) で測定をおこなった。約 11.2- 11.4 kyr BP に、宇宙線強度変動が原因と考えられる ^{36}Cl 降下量の増大が確認された (図 11)。南極内陸域の ^{36}Cl 降下量は $1\sim 4\times 10^4$ atom cm^{-2} yr^{-1} の範囲にあると見積もられた。アイスコア研究では、新たに「グリーンランド NEEM アイスコア国際共同研究プロジェクト」への参加も計画している。核実験起源 ^{36}Cl パルスを用いた地下水滞留時間の推定 [10] では、「富士山周辺湧水の年代測定と地下水流動系の解明」が実施された。カルスト地形の形成過程に関する研究では、カルサイト中の ^{36}Cl を用いて炭酸塩岩の削剥速度の決定を行った [11]。本研究の応用として、「中国天抗の形成過程を探る国際共同研究プロジェクト」に参加している。また、ミュオンにより生成される ^{36}Cl の核反応断面積を AMS で測定する実験を実施した。

(1-8) 宇宙元素合成に関する研究

ゲルマニウム検出器によるガンマ線分光は原子核の励起状態のエネルギーを精密に観測する優れた研究手法である。この為、宇宙元素合成の計算に必要な陽子閾値近傍の励起準位を正確に知ることができ、原子核反応率を精密に求める事ができる。この観点から、我々は ^{26}Si の励起状態のガンマ線分光を行っている。

ガンマ線観測衛星によって ^{26}Al からの 1.8 MeV のガンマ線が観測された [12]。 ^{26}Si はこの ^{26}Al の生成過程のバイパス過程である。 ^{26}Al は $^{25}\text{Al}(e^-, \nu)^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反応で生成される。一方、新星や超新星爆発などの内部で核反応が短時間に進行した場合は ^{25}Al が β 崩壊する前に反応を起こし、 $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ 反応が進むと推定されるが、この ^{26}Si は β 崩壊で ^{26}Al のアイソマー状態に崩壊し、 2^+ の励起状態を経由せずに ^{26}Mg の基底状態へ崩壊する。即ち 1.8 MeV のガンマ線を放出しないパイ

パス経路が進行する。 ^{26}Al の生成率を正確に求めるためにはこのバイパス経路の反応率も同様に求める必要がある。特に、 $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ 反応は ^{26}Si の励起状態 3^+ を経由して共鳴核反応が進行すると予想されるが、この励起状態には実験的に不確定な部分がある。我々はゲルマニウム検出器3台によるガンマ線同時計数測定によって、これまで見出されていなかった 5886 keV の準位を観測した。この状態のスピンを決定する為にガンマ線角度相関測定を行った。

このガンマ線角度相関測定は2台のゲルマニウム検出器を90度と90度に配置した実験と90度と135度に配置した実験から求めたが、立体角の異なる2つの実験から導いた為、導出の過程においてノーマリゼーションパラメーターの任意性を生じた。そこで、今年度の実験では、検出器の立体角を一定に保ったまま角度を変えられる様に、直径 1.5 m のゴニオメーターを新たに設置した。

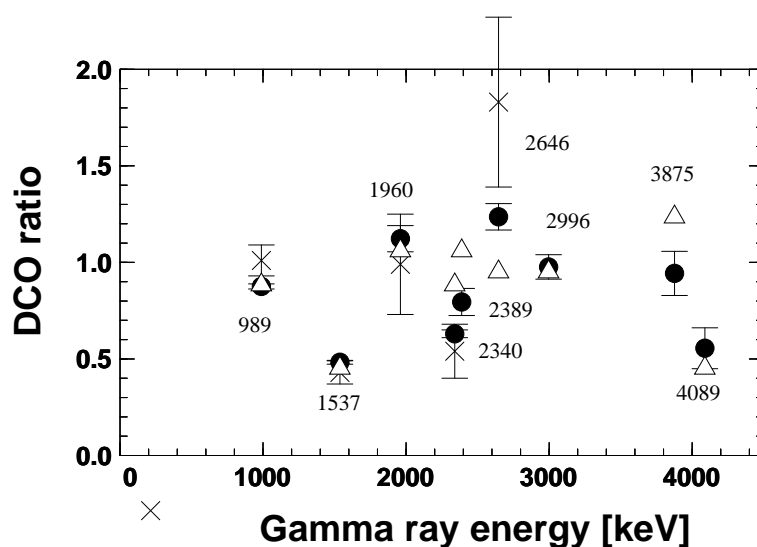


図 12: ^{26}Si の DCO 比。

^{26}Si の角相関実験は筑波大学応用加速器部門の 1 2 UD タンデム加速器を用いて行った。 ^{26}Si は 10 MeV に加速された ^3He ビームを用いて $^{24}\text{Mg}(^3\text{He},n)^{26}\text{Si}$ 反応で生成した。ターゲットは $3\text{mg}/\text{cm}^2$ のマグネシウムを用いた。検出効率 40% と 35% の 2 台のゲルマニウム検出器を用いて、ガンマ線同時計数の頻度の角度依存性を測定した。35% のゲルマニウム検出器を 90 度に固定し、40% のゲルマニウム検出器の角度を変化させ 90 度または 135 度とした。実験の結果を図 12 の × 印で示す。昨年度の結果は ● で示した。また、既知のスピンの基づく理論値をプログラム CORREL [13] を用いて計算し白三角で示した。989-keV、1537-keV、1960-keV と 2340-keV 遷移については今年度の結果と昨年度の結果は良く一致した。今年度の実験は、ゲルマニウム検出器の検出効率が小さかった為、3875-keV と 4089-keV のガンマ線は統計精度が悪く、値を算出できなかった。今年度と昨年度の角相関実験の結果の比較から、昨年度のノーマリゼーションパラメーターの決め方の正当性が確認された。

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

(1) RHIC-PHENIX 実験における荷電ハドロン の 楕円 的 方位 角 異 方 性 の 系 統 的 研 究

相対論的重イオン衝突は、地球上で Quark と Gluon が束縛から解放される状態、Quark-Gluon Plasma (QGP) 状態を作り出す方法として提案され、QGP を生成しその性質を調べることを目的

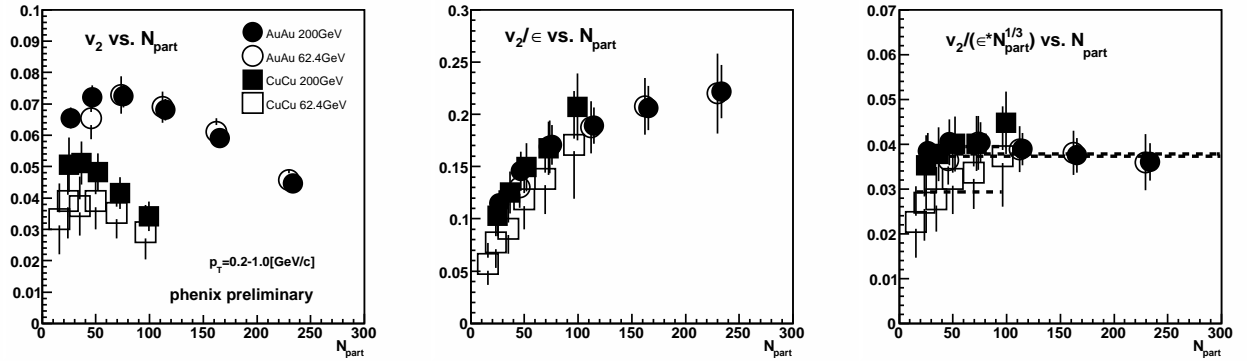


図 13: 4つの異なる衝突系における v_2 の N_{part} 依存性の比較。左図； v_2 vs. N_{part} 、中央図； v_2/ϵ vs. N_{part} 、右図； $v_2/(\epsilon \cdot N_{part}^{1/3})$ vs. N_{part} 。

として、米国ブルックヘブン国立研究所で相対論的重イオン型加速器 (RHIC) が建設され西暦 2000 年から実験が行われている。QGP 生成を証明し、その性質を明らかにすることのできる測定量であると近年特に注目されているのが、生成粒子の方位角異方性である。特に、楕円の方位角異方性 (運動量空間における方位角異方性) は、反応初期の幾何学的な異方性が原因であることが自明であるために、その変換効率は圧力勾配など、反応衝突の高温高密度物質の状態方程式を反映する。

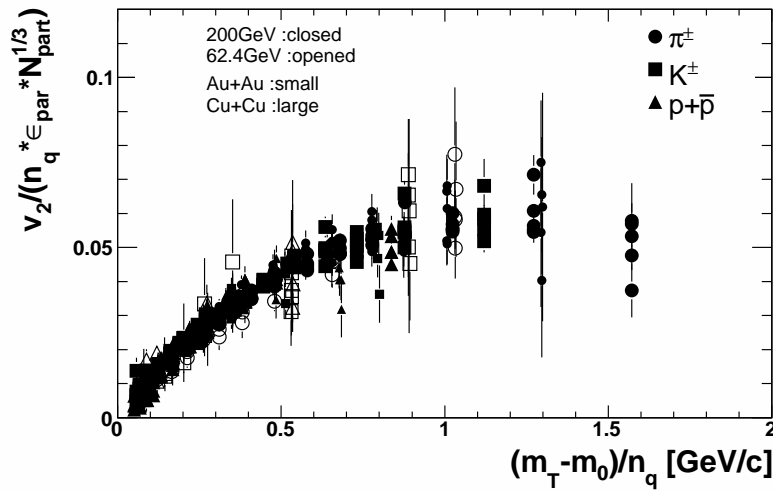


図 14: 金金-200 GeV, 金金-62.4 GeV, 銅銅-200 GeV 衝突における π , K, p の $v_2/(\epsilon \cdot N_{part}^{1/3} \cdot n_q)$ vs. K_{ET}/q_n 。中心衝突度は、0-50% を 10% ステップに 5 クラス、合計 45 本の曲線でできている。系統誤差を含めて polinormal fit を行ったときの χ^2/NDF は 2.1。

これまでの RHIC 実験における重要な発見の一つとして、 v_2 の測定から、低横運動量領域 ($p_T < \sim 2$ GeV/c) では、 v_2 は、非常に短い熱平衡の到達時間 (< 0.5 fm/c) を仮定する流体力学計算と一致し、低・中間横運動量領域 ($p_T = 1 - 4$ GeV/c) では、クォーク数 (n_q) でスケールするリコンビネーションモデルを示唆する結果がある。[14][15] また、衝突エネルギーが 17 GeV, 62 GeV, 130 GeV, 200 GeV における系統的測定から、荷電ハドロン の v_2 はエネルギーと共に大きくなるが、62 GeV 以

上ではほぼ一定で飽和していることから、QGP 生成の閾値に相当するのではないかという指摘がある。[16] この方位角異方性の起源に対する包括的理解を目的として、我々は、 v_2 の系統的測定、すなわち衝突核子当り 200 GeV と 62 GeV の金+金及び銅+銅衝突実験において粒子識別されたハドロンの方位角異方性を測定し、衝突エネルギー、衝突系、衝突の中芯度による依存性や規則性について v_2 の系統的比較を行った。その結果、金+金衝突で 62.4 GeV と 200 GeV の v_2 vs. p_T は、測られた全ての中心衝突度において、 π , K, p, 包括荷電ハドロンとも、よく一致していることがわかった。(図 13 の左図) また、62 GeV の金+金衝突、200 GeV の銅+銅衝突での v_2 も KE_T +クォーク数スケールリング則をほぼ満たすことがわかった。銅+銅の周辺衝突には、これらのスケールリング則からのずれが見えはじめており、サイズの小さい系では、十分な熱平衡に達していない可能性を示唆しているが結論を出すにはさらに詳細な研究が必要である。さらに、金+金衝突と銅+銅衝突の比較から、 v_2 をエキセントリシティ、 ϵ (衝突関与粒子群の楕円率) で規格化したものを衝突関与核子数 (N_{part}) の関数として比べると一致することがわかった。(図 13 の中央図) これは衝突後、初期の幾何学的異方性が消える前に、非常に短い時間で物質が熱平衡に達していることを示している。

また、幾何学的楕円率のみで規格化しようと考えられていた v_2 は、衝突関与粒子数依存性が明確に観測され、衝突関与粒子数の 1/3 乗に比例して大きくなっていることがわかった。(図 13 の右図) これにより、従前の幾何学的楕円率、及びクォーク数によるスケールリングに加えて衝突関与粒子数の 1/3 乗則を新たに適用することにより、RHIC で観測されたすべての衝突系、すべての粒子種の v_2 が一つの曲線として表現できる (v_2 の Universal Scaling) こととなった。(図 14) この結果について膨張速度 β_T と熱的凍結温度 T_{fo} をパラメータとする単純膨張モデルであるブラストウェーブモデルを用いて、測定された荷電ハドロンのスペクトラと v_2 両方から考察したところ、 β_{T} の方位角依存性は、系の大きさによらず初期の幾何学的異方性にのみよっていることを発見した。また、この結果と断熱膨張を仮定したモデル計算より、衝突関与粒子数の 1/3 乗則は、運動学的凍結条件に対応していることがわかり、このモデルによって、低横運動量領域の v_2 の Universal Scaling のみならず、横運動量分布を統合的に記述しうることがわかった。[17]

(2) RHIC-PHENIX $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 陽子・陽子衝突実験における 累積方位角相関と平均横運動量の粒子多重度依存性

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) における実験から $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ の重イオン衝突ではクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) が生成されていることが明らかとなってきた。QGP の今後の研究は QGP 物性の研究、特に、QGP 相転移 (広義) の次数や相転移温度など相転移の物性的特徴を調べることが重要である。従来、十分な反応体積が期待できない陽子・陽子衝突では QGP は生成されていないと考えられてきた。しかしながら、高エネルギーの陽子・陽子衝突では極めて多数の粒子を生成する事象が存在し、そのような稀な事象では QGP 生成の可能性を排除できない。欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器においては 9 TeV から 14 TeV の陽子・陽子衝突が予定されており、さらに粒子多重度の大きな事象の観測が可能になる。QGP 生成の有無を予想する際に、粒子生成のメカニズムの検証は重要な課題である。高エネルギー衝突における粒子生成過程として、大きな運動量変化を伴う「ハード」プロセスと、大きな運動量変化を伴わない「ソフト」プロセスに大別されることが知られ、その様子は標準的衝突模型 (PYTHIA) で記述できると考えられている。QGP など集団的なメカニズムによる粒子生成が起ると標準的衝突模型 (PYTHIA) からのズレとして観測出来よう。

本研究では LHC における陽子・陽子衝突解析の準備研究として、高粒子多重度事象の反応メカニズムを検証するために、RHIC-PHENIX で行われた 2006 年に収集された $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 陽子・陽子

衝突実験のデータを解析した。粒子生成過程の違いを反映する量として平均横運動量 \bar{p}_t 及び累積方位角相関 (C_C) を各事象において評価し、事象の粒子多重度との依存性を調べた。事象分けに際して、粒子多重度を中央領域 ($|\eta| < 0.35$) と前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$) の2つの領域で測定し、2種類の衝突事象分けを行って比較を行った。

$$\bar{p}_t = \langle p_t \rangle \quad (1)$$

$$C_C = \left\langle \sum_i \cos 2(\phi_{p_t} - \phi_i) \right\rangle \quad (2)$$

図 15 は観測された平均横運動量の粒子多重度依存性である。Central 領域を用いた事象分けでは粒子多重度とともに平均横運動量の増加が見られる。標準的衝突模型 (PYTHIA) においても同様の傾向が見られる。ところが、Forward 領域を用いた衝突事象分けでは PYTHIA では粒子多重度に対して変化を見せないが、観測データは増加を示すことがわかった。次に、図 16 に累積方位角相関の粒子多重度依存性を示す。平均横運動量と同様に、Central 領域を用いた衝突事象分けでは粒子多重度と共に累積方位角相関が増加する様子が見られた。一方で Forward 領域を用いた衝突事象分けでは粒子多重度に対する変化は見られず、PYTHIA 模型の計算結果も同様の傾向を示すことがわかった。

高エネルギー衝突における粒子生成メカニズムの理解は QGP 生成のみならず興味深い課題である。LHC 実験における高多重度事象のデータが望まれる。

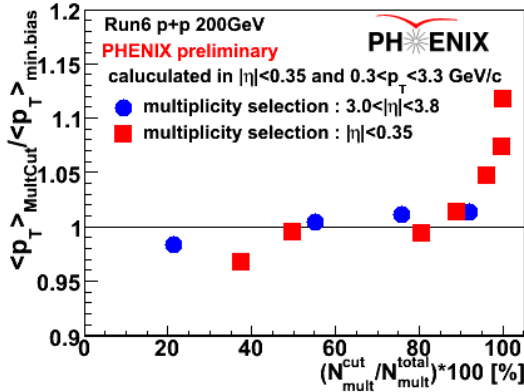


図 15: 平均横運動量の粒子多重度依存性。縦軸の平均横運動量は横運動量平均値と全観測事象の横運動量平均値の比で示している。横軸は規格化された粒子多重度を示す。●印が前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$)、■印が中央領域 ($|\eta| < 0.35$) を示す。

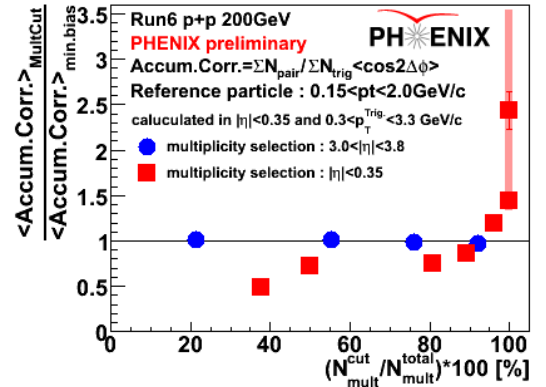


図 16: 累積方位角相関の粒子多重度依存性。縦軸の平均横運動量は横運動量平均値と全観測事象の横運動量平均値の比で示している。横軸は規格化された粒子多重度を示す。●印が前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$)、■印が中央領域 ($|\eta| < 0.35$) を示す。

(3)2 粒子方位角相関解析によるジェットの研究

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行われている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー原子核衝突実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ物質相の実験的検証が進められている。高エネルギー衝突で発生する初期パートンのその物質相内でのエネルギー損失や、初期の幾何学的形状を源とした楕円型集団運動的膨張を裏付ける大きな楕円型方位角異方向性が観測された。この2つの観測を結びつける一つの試みが、ハード・ソフト相関解析であり、高い運動量を持ったトリガー粒子を基準として、低い運動量を持ったパートナー (アソシエート) 粒子の相対方位角分布や相対ラピディティ分布を測る事である。トリガー粒子の反対側の方位角へのマッハコーン状の粒子

生成や、トリガー粒子の方位角と同じ方向でラピディティ方向へ広がったリッジ状の粒子放出が注目されているが、その原因はいまだ明らかではない。そこで、さらに衝突の幾何学的形状を決める反応平面に対するトリガー粒子の方位角の関数として、そのパートナー粒子のトリガー粒子に対する相対方位角分布を詳細に評価する事を提案した。[18, 19]RHIC-PHENIX 実験でこれまで測定してきたデータを用いて、200GeV 金+金衝突実験における荷電ハドロン²の2粒子方位角相関分布のトリガー粒子方位角依存性結果 (PHENIX Preliminary) を図 17 に示す。[20] 実験データの条件の詳細は、図 17 の脚注に記す。この結果から、クォーク・グルーオン・プラズマ中を通過して放出されるトリガー粒子、及び、パートナー粒子の生成が、その物質相内の通過距離に依存している事を見出す事ができる。[21] さらに、その通過距離依存性は、先ず反応平面に対して水平方向への粒子放出は厚みによる減少、吸収を示し、さらに垂直方向への粒子生成は表面放出の寄与がある事を示唆している。現在進行中であるさらに詳しい多粒子相関解析及び多次元解析により、マッハコーン状の粒子生成や、リッジ状の粒子放出の原因を解くヒントがより良く見えてくるようになり、それによって、このようなハード・ソフト相関を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ物質相の理解がより深まると思われる。

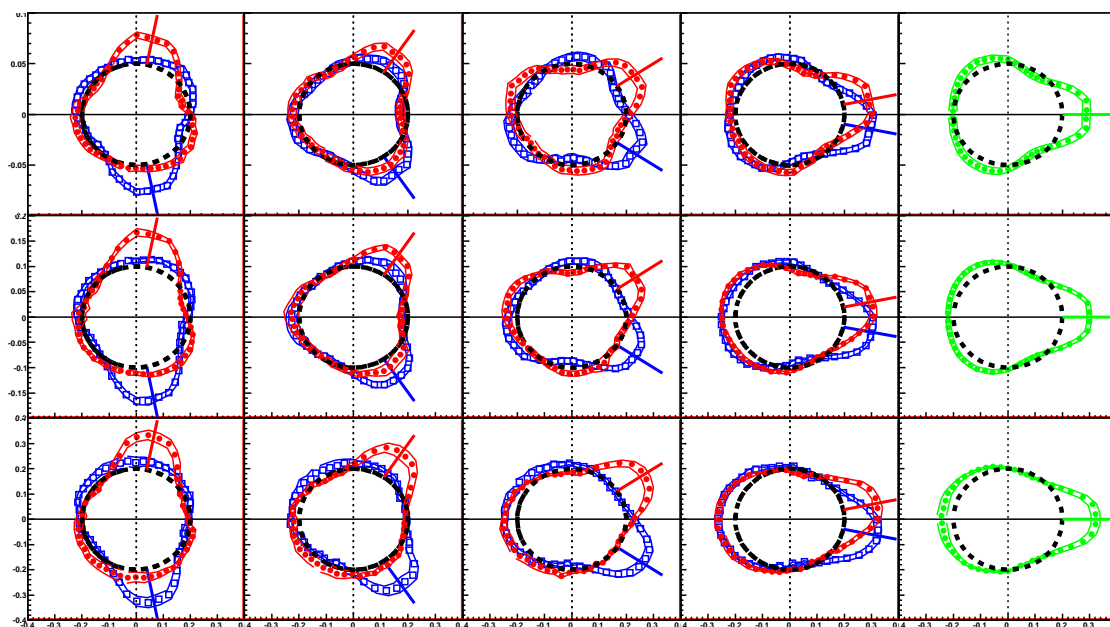


図 17: 200GeV 金+金衝突実験における荷電ハドロン²の2粒子方位角相関の反応平面に対するトリガー粒子方位角依存性の解析結果 (PHENIX Preliminary) を示している。粒子の横運動量領域は、トリガーハドロン $p_T = 2 \sim 4$ GeV/c、アソシエートハドロン $p_T = 1 \sim 2$ GeV/c。反応平面を横 (x) 軸にとり、トリガーハドロン方位角方向を実線で示し、点線の円を収量ゼロの基準線として、アソシエートハドロン分布を半径方向に極座標表示した。左から右へ、トリガーハドロン方向が反応平面に対して垂直方向から平行方向へと変わっており、最も右側は、反応平面に対してトリガーハドロン²の方向を区別しない場合 (右から4図全ての平均) をトリガー方向を x 軸に合わせて表示している。上から下へ、中心衝突度が 0 ~ 20% (中心衝突)、20 ~ 50%、50 ~ 93% (周辺衝突) と表示している。

(4) 高エネルギー重イオン衝突における楕円方位角異方性の精密測定

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行われている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー原子核衝突実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ物質相の実験的検証が進められている。重心系 200GeV の金原子核衝突における重要な発見の一つとして生成粒子の非常に大きな楕円方位角異方性が観測されたことが挙げられる。これは反応平面 (衝突する両原子核のビーム軸を含む平面) に対して、粒子の放出分布が方位角 ϕ 方向に楕円的偏りを見せる現象で、その強度はフーリエ級数 2 次の項を以って表し、 v_2 と呼ぶ。(図 18)

$$\frac{dN}{d\phi} = N\{1 + \cos 2(\phi - \Psi)\} \quad (3)$$

N: 粒子数, Ψ : 反応平面 [rad], ϕ : 粒子放出角 [rad], v_2 : 楕円強度

この楕円方位角異方性 v_2 は相対論的重イオンの衝突領域の最初期の形状 (非中心衝突をした時に、楕円形となる) に起因すると考えられ、生成粒子が高温・高エネルギーの衝突領域内で、十分短い平均自由行程を持っていたことになる。言い換えれば、大きな方位角異方性は反応初期の高密度状態と、衝突直後の QGP 生成を示唆するものである。また興味深いことに、測定される方位角異方性は、衝突反応直後の熱平衡状態と、クォークやグルーオンが完全流体として振舞うと仮定した理論計算と極めて良く一致した。(図 19) [22] これはクォークとグルーオンの集団運動を示唆し、QGP 生成を示す重要な証拠の一つである。

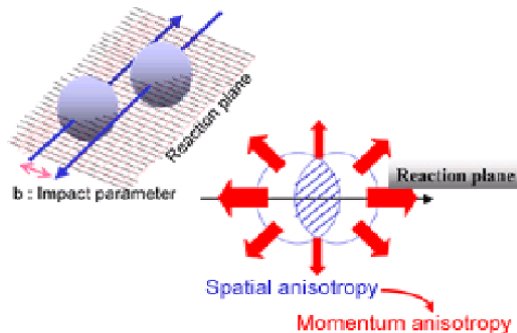


図 18: 反応平面 (reactionplane) と方位角異方性

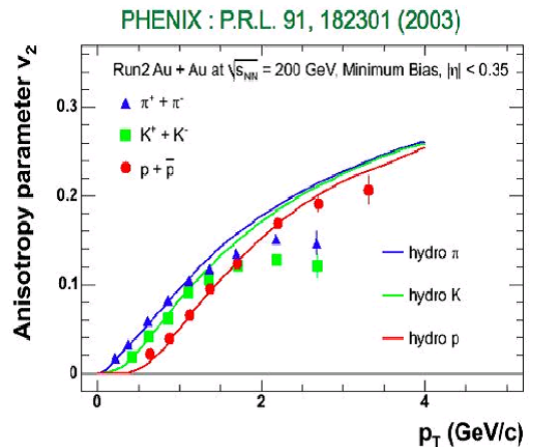


図 19: 楕円方位角異方性 v_2 と流体モデル計算

方位角異方性 v_2 は反応平面 Ψ を基準に測定されるため、統計の小さな衝突エネルギー、高運動量領域、希少粒子等の観察には高精度の反応平面分解能が必要となる。これまでの PHENIX における反応平面分解能はそういった測定に対しては十分でなく、方位角異方性測定は比較的統計の多い粒子の低運動量領域のみに限られていた。そこで我々は新たに反応平面決定精度向上のために新たな検出器 Reaction Plane Detector (RxP) を開発し実装した。(図 20) これによって PHENIX の反応平面分解能は従来の 2 倍に向上した。これは測定される方位角異方性の統計誤差が半減することを意味する。図 21 は PHENIX における衝突中芯度 (0% を中心衝突、100% をかすり衝突とした値) に対する反応平面分解能の新旧の値の比較である。反応平面の分解能は測定値 Ψ_{obs} と真の値 Ψ_{real} との関係から次式で定義される。

$$\text{R.P. resolution} = \langle \cos 2(\Psi_{obs} - \Psi_{real}) \rangle \quad (4)$$

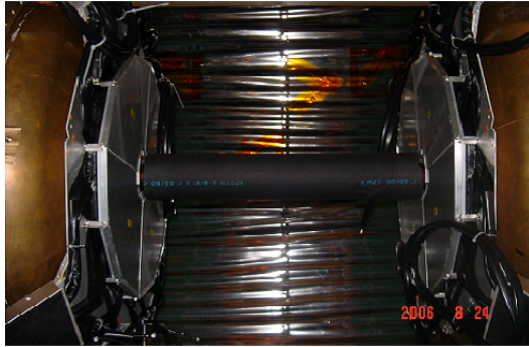


図 20: 反応平面検出器 RxP

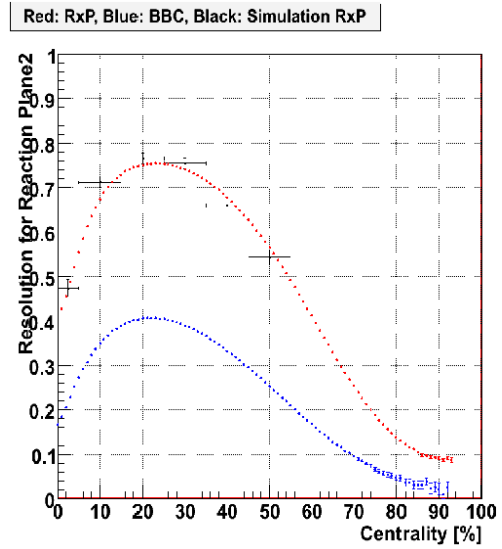


図 21: 反応平面分解能

図 22 は RxP を以って解析したハドロンの楕円方位角異方性 v_2 の p_T (ビームに垂直方向の運動量) に対する値を表す。ここから興味深い事実が見えてくる、先ず質量の重い粒子ほど高 p_T 側にシフトしている、そしてピークを迎える $p_T=3-5\text{GeV}$ 辺りの値はバリオンとメソンで決まった値をとる。これらの事実もクォークの集団運動を示唆する証拠であると考えられる。前者は生成粒子が高エネルギー媒体中である速度の集団運動 (流体的相互作用) を経るなら、重い粒子ほど高い運動量を得ると解釈できる。後者は、粒子がそれを構成するクォークの数に依存した方位角異方性 v_2 を持ち、その物理量がクォークレベルの集団運動によって (即ち QGP 相にて) 生まれたことを示唆する。これらの事実をより比較しやすくするために、 KE_T (ローレンツ因子であるビーム軸に対する横質量 m_T から静止質量 m_0 を引いた値) 及び構成クォーク数 n_q によるスケーリングを行った。横軸を KE_T とすることによって、質量依存の効果を打ち消すことが出来る (図 23)、さらに縦横の軸をクォーク数 n_q でスケールすることで、各粒子種からクォーク 1 個分の値を導き出すことが出来る。(図 24) その結果、主にソフトな成分である低運動量領域において、各ハドロןから見積もったクォークの方位角異方性に、美しい一致がみられた。ハードな運動量領域ではこれが破れており、ソフトとハードで異なる粒子生成と方位角異方性の起源が考えられる。

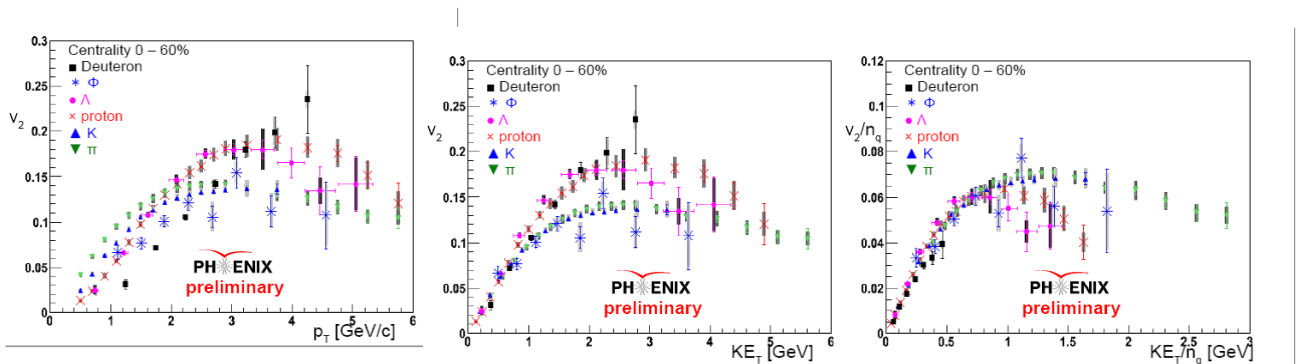


図 22: RxP によって測られたハドロンの方位角異方性

図 23: KE_T スケーリング

図 24: クォーク数スケーリング

2010年現在 PHENIX では 200GeV, 63GeV, 39GeV, 7.7GeV と、四種類の重心系エネルギーの衝突が測定されている。Rxp 検出器の性能を生かして粒子統計の取り難い低エネルギーの衝突を解析することで、クォーク集団運動に対する衝突エネルギーの閾値を得ることが期待されている。また 2011 年に実装される VTX 検出器によって D 中間子の可能になれば、比較的重い c クォークが他の軽いクォークと共に集団運動に参加しているか知ることが出来、粒子の生成過程の重さによる違いを調べることが出来る。このように PHENIX における方位角異方性の研究は、検出器のアップグレードにより反応平面分解能や粒子識別能を向上させ、より幅広い解析が可能となってきた。

(5) 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ および 62.4 GeV におけるハドロン横運動量分布 (RHIC-PHENIX 実験)

陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ および 62.4 GeV における、中心ラピディティ領域でのハドロン横運動量 (p_T) 分布の測定を、RHIC-PHENIX 実験で行った。測定した荷電粒子は π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子である。粒子識別には筑波大学で製作した飛行時間測定器 (TOF) を用いた。これらの結果は、重イオン衝突データに対する重要なリファレンスを与えると同時に、高エネルギー陽子・陽子衝突におけるハドロン生成機構、さらには摂動論的 QCD 計算で用いる破砕関数への知見を与える。

今回使用したデータは、2005年 (200 GeV) と 2006年 (62.4 GeV) に収集されたデータである。統計量はそれぞれ 920 M イベント (200 GeV)、264 M イベント (62.4 GeV) である。これら高統計のデータを使うことによって、陽子と反陽子の測定可能な p_T 領域の上限値が、従来の 3.2 GeV/c から 4.5 GeV/c にまで上がり、($p+p$ 200 GeV の場合)、低い p_T 領域におけるソフトな粒子生成から、高い p_T 領域でのハード散乱による粒子生成まで、幅広い運動学的領域のスペクトルをカバーすることが可能となった。一方、 $p+p$ 62.4 GeV のデータは、1970~80年代に行われた従来の測定結果より高精度であり、同一エネルギーで測定された重イオンデータに対して重要な参照データを与える。

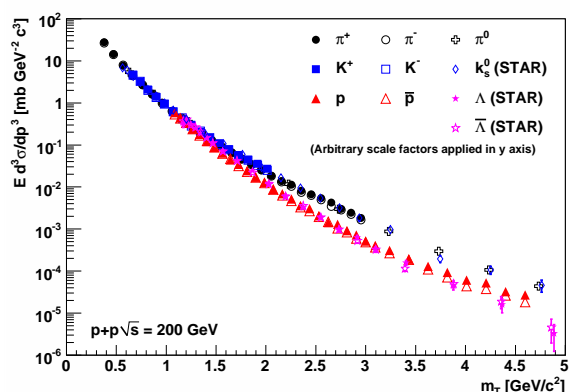


図 25: 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ GeV での π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子の m_T 分布. π^0 (PHENIX) は [23], K_s^0 , Λ , $\bar{\Lambda}$ (STAR) は [25] を参照。

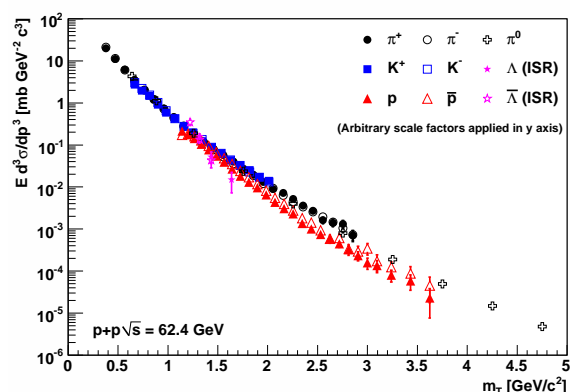


図 26: 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 62.4$ GeV での π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子の m_T 分布. π^0 (PHENIX) は [24], Λ , $\bar{\Lambda}$ (ISR) は [26] を参照。

陽子・陽子衝突における π^\pm , K^\pm , 陽子及び反陽子の m_T 分布を図 25 (200 GeV) と図 26 (62.4 GeV) に示す。横軸は $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$ (m はハドロンの静止質量)、縦軸は不変微分断面積である。さらに縦軸のスケールは、 $m_T = 1.0 - 1.5$ GeV/c² 付近の π 中間子の収量で全ての分布を規格化している。これらの図から、バリオン (陽子、反陽子、ラムダ等) とメソン (π^\pm , K^\pm 等) の2つの

ラインに明瞭に分かれていることが分かる。この現象の一つの解釈としては、メソン生成にはクォーク・反クォーク対のみが要求されるのに対し、バリオンはダイクォーク・反ダイクォーク対が要求されるため、ある与えられたジェットエネルギーに対して、バリオンよりもメソンの方が作られやすいことが考えられる。

これらの結果の他、運動量分布のスロープパラメータ、平均横運動量、単位ラピディティあたりの収量 dN/dy 等を求め、他の実験結果との比較を行った。また x_T スケーリング則、 m_T スケーリング則について調べ、流体モデルとの比較や NLO pQCD 計算との比較を行った。

これらの結果をまとめ、近日中に Physical Review D 誌に投稿する予定である。

(6)DCal 設計とシミュレーション

欧州原子核研究機構 (CERN) における Large Hadron Collider(LHC 加速器) を用いた ALICE 実験では、2009 年 11 月の本格始動以来、重心系エネルギー 900GeV および 7TeV の陽子・陽子衝突実験が行われている。ALICE 実験の先行実験である RHIC-PHENIX 実験、STAR 実験では、クォーク・グルオンプラズマ (QGP) 物質相の探索および物性理解において、ジェットおよびジェット変貌効果が重要なプローブとなることが発見されたが、RHIC よりもさらに高エネルギー重イオン衝突実験 (鉛・鉛衝突、 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5TeV$) が予定される ALICE 実験では、ジェット事象の生成断面積はより大きくなることから、その重要性はさらに増すと考えられる。特に、ダイジェット事象 (反対方位角方向にジェット対が生成される事象) の測定は、ジェット変貌効果の理解において必要不可欠であり、我々のグループでは、この測定を可能とする電磁カロリメータ : DCal の ALICE 実験への搭載を計画している。

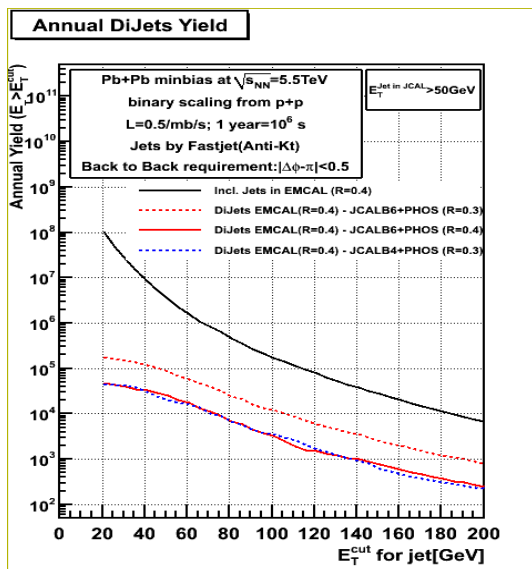


図 27: 鉛・鉛衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5TeV$ でのダイジェット事象の年間収量 (異なる DCal super module 数、設置方法の場合を併記) . トリガージェット $E_T > 50GeV$.

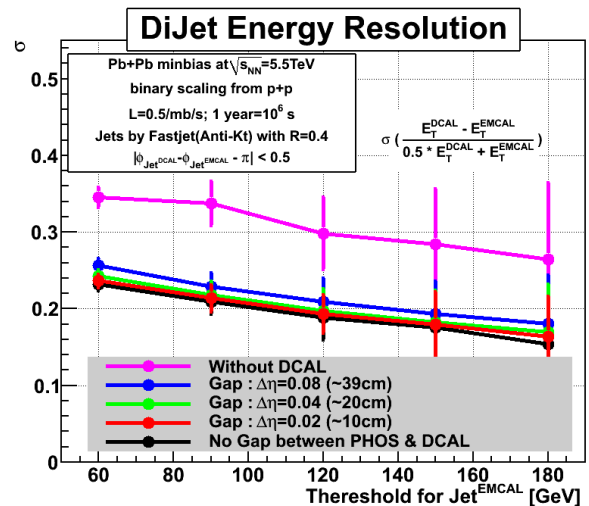


図 28: ダイジェットエネルギーバランス分解能のトリガージェット E_T 依存性. 分解能は図中の式として定義. 既存の電磁カロリメータ (PHOS) と DCal 間の異なる Gap 間隔の結果を示している. DCal を使わない場合の値が一番上のラインで、Gap 間隔を小さくしていくと共に値が小さくなり、Gap 間隔が 0 の場合が一番下のラインとなる。

図 27 は異なる DCAL super module の数、設置方法における、ダイジェット事象の年間収量を表す。建設予定の DCal (図中の JCALB6) では、 $E_T = 100\text{GeV}$ 程度まで年間 10000 事象ものダイジェット事象の測定が期待できる (Jet Cone Size: $R=0.3$)。さらに、ダイジェットエネルギーバランス分解能のトリガージェット E_T 依存性を図 28 に記す。図 28 には、DCal 無しの場合の分解能が一番上のデータで、既存の電磁カロリメータ (PHOS) と DCal との異なる Gap 間隔を小さくすると共に分解能が改善 (小さくなっている) している事を示す。図 28 から分かるように、現実的な 3 通りの Gap 間隔と理想的な Gap 無し (最も下のライン) の場合を比較し、期待される年間収量の統計誤差の範囲内でほぼ同等であるが、DCal 無し (最も上のライン) の場合と DCal 有りの場合を比較すると、最大 10% 程度のエネルギーバランス分解能の改善が見られる。このような分解能の向上はジェット変貌効果の理解において、重要な知見を与えると考えられる。これらのようなシミュレーションから、ダイジェット測定において DCal の重要性が定量的に示され、現在では、アメリカ、中国、イタリアなどのグループとの協力のもと、着々と DCAL の Construction が行われている。

(7) ALICE Di-Jet Calorimeter における検出器シミュレーションの構築

欧州原子核研究機構 (CERN) における Large Hadron Collider (LHC) は、2009 年秋季より運転を再開し、陽子-陽子衝突における重心系衝突エネルギー 900GeV 及び 7TeV のデータを蓄積中である。また、2010 年冬季には LHC において初となる重心系衝突エネルギー 5.5TeV の鉛-鉛衝突実験が予定されている。LHC ALICE では、今後の更なる物理推進のために、LHC 初年度のデータ収集の成功と同時に、ALICE 検出器のアップグレード計画を推進中である。筑波大学では、ALICE アップグレード計画の一つとして、Di-Jet 測定に焦点を当てた Di-Jet カロリメータ (DCAL) の開発を推進している。図 29 に CERN-LHC 加速器を使った ALICE 実験の現在のセットアップと、EMCAL (図 30 上) 及び DCAL (図 30 下) を追加する事によるアップグレード計画を示す。

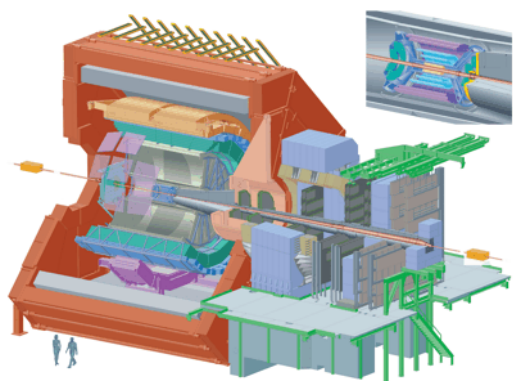


図 29: LHC-ALICE 実験のセットアップ

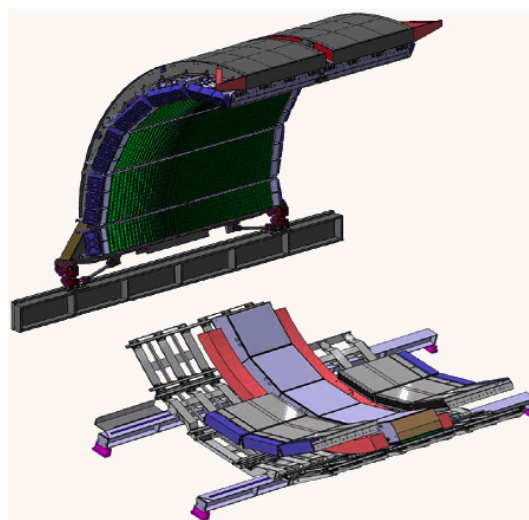


図 30: EMCAL/DCAL によるアップグレード計画

Di-Jet とは、陽子-陽子及び重イオン衝突において一つのジェットを観測した際に、そのジェットの反対方向に放出されるジェットとの対のことである。特に、重イオン衝突下の初期衝突において生成されたジェット対は、重イオン衝突下で生成されるであろう QCD 物質中との相互作用によって、エネルギーを失うと考えられている。このような現象はジェット抑制と呼ばれ、Di-Jet が生成された位置によって QCD 物質中との相互作用する距離が変わることから、QCD 物質の厚みに関する情報を

抽出することが期待されている。これはジェットトモグラフィーと呼ばれる手法で、Di-Jet 測定を利用したクォーク・グルーオンプラズマの探索及び物性解析に強力な指針を与えられている。

筑波大学では、このDCALによる物理シミュレーションを積極的に推進し、筑波大学LHC ALICE実験解析用コンピューターファームに於いて、DCAL用検出器シミュレーションを構築した。筑波大学では、このDCALを含む検出器シミュレーションを用いて、DCALによる今後の物理解析における基盤を構築すべく研究を推進中である。

参考文献

- [1] Y.Yano, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B261**, 1009 (2007).
- [2] T.Kubo, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B204**, 97 (2003).
- [3] T.Yamaguchi *et al.*, Proceedings of STORI'05, 297 (2005).
- [4] Y.Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B266**, 4575 (2008).
- [5] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978).
- [6] T.Vandana *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 162501(2005).
- [7] M. Kamimura *et al.*, Prog. Theor. Phys. Jpn, Supp. **89**, (1986).
- [8] D. Q. Fang *et al.*, Phys. Rev. **C76**, 031601(R) (2007).
- [9] Kimikazu Sasa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 871 (2010).
- [10] Yuki Tosaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 1261 (2010).
- [11] Yuki Matsushi *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 1205 (2010).
- [12] R. Diehl, *et al.*, Nature **439**, 45 (2006).
- [13] K.S. Krane, *et al.*, Nuclear Data Tables **11**, 351 (1973).
- [14] S. S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 182301 (2003)
- [15] A. Adare *et al.*, PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 162301 (2007)
- [16] S. S. Adler *et al.*, PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **94**, 232302 (2005)
- [17] M. Shimomura for the PHENIX Collaboration, Nucl.Phys.**A830** 183C-186C (2009)
- [18] J. Phys. G, Nucl. Part. Phys. 36(2009)064060, S. Esumi for the phenix collaboration.
- [19] Proceedings of Science, PoS(High-pT physics09)031, S. Esumi.
- [20] Quark Matter 2009 poster, S. Esumi for the PHENIX Collaboration.
- [21] Jiangyong Jia, ShinIchi Esumi, Rui Wei, Phys. Rev. Lett. 103(2009)022301.
- [22] S. S. Alder *et al.* PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. 91, 182301 (2003)

- [23] A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Phys. Rev. **D76**, 051106 (2007).
- [24] A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Phys. Rev. **D79**, 012003 (2009).
- [25] B. I. Abelev et al. (STAR collaboration), Phys. Rev. **C75**, 064901 (2007).
- [26] D. Drijard et al., Zeit. Phys. **C12**, 217 (1982).

<論文>

1. Daiya Kaji, Kouji Morimoto, Nozomi Sato, Takatoshi Ichikawa, Eiji Ideguchi, Kazutaka Ozeki, Hiromitsu Haba, Hiroyuki Koura, Yuki Kudou, Akira Ozawa, Takayuki Sumita, Takayuki Yamaguchi, Akira Yoneda, Atsushi Yoshida, Kosuke Morita, Production and Decay Properties of ^{263}Hs , J. Phys. Soc. Jpn., Vol.78, No.3, (2009) p.035003.
2. K.Tanaka, T.Yamaguchi, T.Suzuki, T.Ohtsubo, M.Fukuda, D.Nishimura, M.Takechi, K.Ogata, A.Ozawa, T.Izumikawa, T.Aiba, N.Aoi, H.Baba, Y.Hashizume, K.Inafuku, N.Iwasa, K.Kobayashi, M.Komuro, Y.Kondo, T.Kubo, M.Kurokawa, T.Matsuyama, S.Michimasa, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, S.Nakajima, T.Nakamura, H.Sakurai, R.Shinoda, M.Shinohara, H.Suzuki, E.Takeshita, S.Takeuchi, Y.Togano, K.Yamada, T.Yasuno, M.Yoshitake, Observation of a Large Reaction Cross Section in the Drip-Line Nucleus ^{22}C , Phys. Rev. Lett. 104, 062701 (2010).
3. N.Aoi, E.Takeshita, H.Suzuki, S.Takeuchi, S.Ota, H.Baba, S.Bishop, T.Fukui, Y.Hashimoto, H.J.Ong, E.Ideguchi, K.Ieki, N.Imai, M.Ishihara, H.Iwasaki, S.Kanno, Y.Kondo, T.Kubo, K.Kurita, K.Kusaka, T.Minemura, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Nakao, M.Niikura, T.Okumura, T.K.Onishi, H.Sakurai, S.Shimoura, R.Sugo, D.Suzuki, M.K.Suzuki, M.Tamaki, K.Tanaka, Y.Togano, K.Yamada, Development of Large Deformation in ^{62}Cr , Phys.Rev.Lett. 102, 012502-012505 (2009).
4. Y.Ichikawa, T.K.Onishi, D.Suzuki, H.Iwasaki, T.Kubo, V.Naik, A.Chakrabarti, N.Aoi, B.A.Brown, N.Fukuda, S.Kubono, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Nakao, T.Okumura, H.J.Ong, H.Suzuki, M.K.Suzuki, T.Teranishi, K.N.Yamada, H.Yamaguchi, H.Sakurai, β decay of the proton-rich nucleus ^{24}Si and its mirror asymmetry, Phys. Rev. C 80, 044302-044313 (2009).
5. S.Takeuchi, N.Aoi, T.Motobayashi, S.Ota, E.Takeshita, H.Suzuki, H.Baba, T.Fukui, Y.Hashimoto, K.Ieki, N.Imai, H.Iwasaki, S.Kanno, Y.Kondo, T.Kubo, K.Kurita, T.Minemura, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Okumura, T.K.Onishi, H.Sakurai, S.Shimoura, R.Sugou, D.Suzuki, M.K.Suzuki, M.Takashina, M.Tamaki, K.Tanaka, Y.Togano, K.Yamada, Low-lying states in ^{32}Mg studied by proton inelastic scattering, Phys.Rev. C 79, 054319-054329 (2009).
6. S.Takeuchi, N.Aoi, H.Baba, T.Kubo, T.Motobayashi, K.Tanaka, K.Yamada, T.Fukui, S.Ota, Y.Hashimoto, Y.Kondo, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Okumura, K.Ieki, S.Kanno, K.Kurita, R.Sugou, E.Takeshita, Y.Togano, N.Imai, T.Minemura, H.Iwasaki, T.K.Onishi, H.Sakurai, D.Suzuki, H.Suzuki, M.K.Suzuki, S.Shimoura, M.Tamaki, Study of low-lying states in ^{32}Mg , Int. J. Mod. Phys. E18, 2025-2029 (2009).
7. Masanori Kurosawa, Satoshi Ishii, Kimikazu Sasa, Trace-element compositions of single fluid inclusions in the Kofu granite, Japan: Implications for compositions of granite-derived fluids, The Island Arc, Volume 19, Number 1, March 2010, 40-59.
8. Norikazu Kinoshita, Hiroshi Matsumura, Kotaro Bessho, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Yuki Matsushi, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Shozo Mihara, Toshiyuki

- Oki, Masumi Matsumura, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Michiko Tamari, Yasuo Nagashima, Depth Profile of Radioactivity Induced in the Thick Concrete Shield in EP1 Beam Line at the KEK 12-GeV Proton Synchrotron Facility, Nuclear Technology, Volume 168, Number 3, 2009, Pages 694-699.
9. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Tosaki, Yuki Matsushi, Keisuke Sueki, Michiko Tamari, Takahiro Amano, Toshiyuki Oki, Shozo Mihara, Yoshihiro Yamato, Yasuo Nagashima, Kotaro Bessho, Norikazu Kinoshita, Hiroshi Matsumura, Status and research programs of the multinuclide accelerator mass spectrometry system at the University of Tsukuba, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (2010) 871-875.
 10. Kimikazu Sasa, Yuki Matsushi, Yuki Tosaki, Michiko Tamari, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Yasuyuki Shibata, Motohiro Hirabayashi, Hideaki Motoyama, Measurement of cosmogenic ^{36}Cl in the Dome Fuji ice core, Antarctica: Preliminary results for the Last Glacial Maximum and early Holocene, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (2010) 1193-1196.
 11. Yuki Tosaki, Gudrun Massmann, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Matsushi, Michiko Tamari, Yasuo Nagashima, Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Distribution of $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ in a river-recharged aquifer: Implications for the fallout rate of bomb-produced ^{36}Cl . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 268, 1261-1264.
 12. Yuki Matsushi, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Keisuke Sueki, Yasuo Nagashima, Yukinori Matsukura, Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic ^{36}Cl in calcite, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 268, 1205-1208.
 13. 笹 公和, 会議報告: 第 11 回重イオン加速器技術に関する国際会議 (HIAT09) 報告, 日本加速器学会誌「加速器」 Vol. 6(3) (2009) 251~255. Meeting report: Report on the 11th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT09), Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 6(3) (2009) 251-255.
 14. Plasmonic activity on gold nanoparticles embedded in nanopores formed in a surface layer of silica glass by swift-heavy-ion irradiation, K. Nomura, Y. Ohki, M. Fujimaki, X. Wang, K. Awazu, T. Komatsubara NANOTECHNOLOGY, 20-47, pp.475306-1-475306-7、2009/10
 15. Penning trap mass spectrometry of neutron-rich Fe and Co isotopes around $N=40$ with the LEBIT mass spectrometer R. Ferrer, M. Block, C. Bachelet, B. R. Barquest, G. Bollen, C. M. Campbell, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, A. A. Kwiatkowski, D. L. Lincoln, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. M. Prinke, R. Ringle, J. Savory, P. Schury, and S. Schwarz Phys. Rev. C 81, 044318 (2010).
 16. High-precision Penning trap mass measurements of neutron-rich sulfur isotopes at the $N=28$ shell closure R. Ringle, C. Bachelet, M. Block, G. Bollen, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, A. A. Kwiatkowski, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. M.

- Prinke, J. Savory, P. Schury, S. Schwarz, and C. S. Sumithrarachchi Phys. Rev. C 80, 064321 (2009).
17. Multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for short-lived radioactive ions P. Schury, K. Okada, S. Shchepunov, T. Sonoda, A. Takamine, M. Wada, H. Wollnik and Y. Yamazaki Eur. Phys. J. A 42 343-349 (2009).
 18. Isotope shift measurement of $^{11,9,7}\text{Be}^+$ A. Takamine, M. Wada, K. Okada, T. Nakamura, P. Schury, T. Sonoda, V. Lioubimov, H. Iimura, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T.M. Kojima, A. Toshida, T. Kubo, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik and H.A. Schussler Eur. Phys. J. A 42 369-373 (2009).
 19. Precision Penning trap mass measurements of rare isotopes produced by projectile fragmentation S. Schwarz, M. Block, G. Bollen, C.M. Campbell, M. Facina, R. Ferrer, C.M. Folden III, A.A. Kwiatkowski, D.J. Morrissey, G.K. Pang, A.M. Prinke, R.J. Ringle, J. Savory and P.H. Schury Eur. Phys. J. A 42 323-326 (2009).
 20. rp Process and Masses of $N \sim Z \sim 34$ Nuclides J. Savory, P. Schury, C. Bachelet, M. Block, G. Bollen, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, E. Kwan, A. A. Kwiatkowski, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. Prinke, R. Ringle, H. Schatz, S. Schwarz, and C. S. Sumithrarachchi Phys. Rev. Lett. 102, 132501 (2009).
 21. S. Afanasiev, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), High-pT π^0 Production with Respect to the Reaction Plane in Au + Au Collisions at $\sqrt{s(\text{NN})} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:054907,2009.
 22. S. Afanasiev, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Kaon interferometric probes of space-time evolution in Au+Au collisions at $\sqrt{s(\text{NN})} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.Lett.103:142301,2009.
 23. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Measurement of Bottom versus Charm as a Function of Transverse Momentum with Electron-Hadron Correlations in p+p Collisions at $\sqrt{s}=200\text{ GeV}$. Phys.Rev.Lett.103:082002,2009.
 24. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Photon-Hadron Jet Correlations in p+p and Au+Au Collisions at $\sqrt{s(\text{NN})} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:024908,2009.
 25. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Photoproduction of J/psi and of high mass e^+e^- in ultra-peripheral Au+Au collisions at $\sqrt{s(\text{NN})} = 200\text{-GeV}$. Phys.Lett.B679:321-329,2009.
 26. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Systematic Studies of Elliptic Flow Measurements in Au+Au Collisions at $\sqrt{s(\text{NN})} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:024909,2009.
 27. D. Adamova, S. Esumi et al. (CERES Collaboration), Modification of jet-like correlations in Pb-Au collisions at $158\text{A-GeV}/c$. Phys.Lett.B678:259-263,2009

28. Jiangyong Jia, ShinIchi Esumi, Rui Wei, Away-side asymmetry of jet correlation relative to reaction plane: A Sensitive probe for jet in-medium modifications. Phys.Rev.Lett.103: 022301,2009
29. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Double Helicity Dependence of Jet Properties from Dihadrons in Longitudinally Polarized p+p Collisions at $s^{**}(1/2) = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.D81:012002,2010.
30. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Detailed measurement of the $e^+ e^-$ pair continuum in p+p and Au+Au collisions at $s(\text{NN})^{**}(1/2) = 200\text{-GeV}$ and implications for direct photon production. Phys.Rev.C81:034911,2010.
31. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Enhanced production of direct photons in Au+Au collisions at $s(\text{NN})^{**}(1/2)=200\text{ GeV}$ and implications for the initial temperature. Phys.Rev.Lett.104:132301,2010

< 学位論文 (博士論文) >

1. 理学 (博士)、下村真弥 (Shimomura, Maya)、Systematic Study of Azimuthal Anisotropy for Charged Hadrons in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at RHIC-PHENIX、(RHIC-PHENIX 実験での相対論的原子核衝突における荷電ハドロンの方角異方性の系統的研究)

< 学位論文 (修士論文) >

1. 修士 (理学)、生山友博 (Ikuyama, Tomohiro)、銅クラスター陽イオンと硫化水素との反応についての研究
2. 修士 (理学)、伊藤由太 (Itoh, Yuta)、RI 蓄積リングの磁場校正のためのクラスターイオン源の開発 (Developments of Cluster Ion Source for Magnetic-field Calibration in Rare RI Ring)
3. 修士 (物理学)、小川賢一郎 (Ogawa, Ken-ichiro)、RI ビームのエネルギー損失測定用傾斜電極型電離箱の性能評価 (Developments of Tilted Electrode Grid Ion Chamber for measurements of energy loss for RI beams)
4. 修士 (理学)、梶谷緑 (Kajigaya, Midori)、RHIC-PHENIX $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$ 陽子-陽子衝突実験における累積方位角相関と平均横運動量の粒子多重度依存性の研究、(Multiplicity dependence of the accumulative correlation and mean pT in $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ p+p collisions at RHIC-PHENIX)
5. 修士 (理学)、木村瑞希 (Kimura, Mizuki)、核子対当たり重心系衝突エネルギー 200GeV での銅-銅衝突における荷電二粒子相関のジェット分布測定、(Jet distribution of two particle correlations for charged hadrons in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200\text{GeV}$)

6. 修士 (理学)、轟木貴人 (Todoroki, Takahito)、 $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ 金・金衝突における包括光子 - ハドロン相関の反応平面及びラピディティ依存性の研究、
(Study of reaction plane and rapidity dependence of inclusive photon - hadron correlation in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$)
7. 修士 (理学)、浜田英太郎 (Hamada, Eitarou)、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における多粒子相関の反応平面依存性を用いたパートン-QGP 間相互作用の研究、
(Study of parton-QGP medium interactions by measurements of reaction plane dependence of multi-particle correlations for charged hadrons in $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-PHENIX)
8. 修士 (理学)、横山広樹 (Yokoyama, Hiroki)、LHC-ALICE 実験における QGP 研究のためのクォーク/グルーオン・ジェット識別能力の評価、
(Capability of Quark/Gluon-Jet Separation for QGP Study at LHC-ALICE)

< 学士論文 >

1. 学士、阿部康志 (Abe, Yasushi)、不安定核 ^{30}P の生成量評価 (Estimation of yield of unstable nuclei ^{30}P)
2. 学士、上口長昭 (Kamiguchi, Nagaaki)、固体ネオン検出器の開発と性能評価 (Developments of solid Ne detector)
3. 学士、杉山由紀 (Sugiyama Yuki)、ゴニオメーターを用いた γ 線測定による ^{26}Si の核構造の研究 (Gamma-ray spectroscopy for ^{26}Si by using goniometer)
4. 学士 黒住和奈 (Kazuna Kurosumi)、宇宙線生成核種 ^{36}Cl の加速器質量分析による宇宙線強度変動の測定 (Measurement of cosmic ray changes by cosmogenic Cl-36 AMS)
5. 学士、窪田晋太郎・近藤祐樹 LHC-ALICE 実験における Di-jet 測定用電磁カロリメータの製作と性能評価
6. 学士、水野三四郎 RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金-金衝突におけるストレンジネス重粒子探索
7. 学士、渡辺吉彬 LHC-ALICE 検出器シミュレーションを用いた $\sqrt{s} = 14\text{ TeV}$ p-p 衝突における Di-Jet 再構成の研究

< 招待講演 (国際会議) >

1. Kimikazu Sasa (Invited talk),
Multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, November 9 - 13, 2009, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan
2. Kimikazu SASA (Invited lecture)
AMS programs at the University of Tsukuba, Guangxi University, China, 23 July, 2009.

3. Y. Ikeda (Invited talk),
 "Measurement of Azimuthal Anisotropy with the New Reaction Plane Detector in the PHENIX experiment", 25th Winter Workshop on Nuclear Dynamics(WWND2009), Feb. 1-8, 2009, Big Sky Montana, USA
4. S. Esumi (Invited talk),
 "Interplay between jet and v_2 ", 4th international workshop High-pT physics at LHC 09, Feb. 4-7, 2009, Prague, Czech
5. S. Esumi (Invited talk),
 "Flow and non-flow in jet correlation" CATHIE-RIKEN Workshop Critical Assessment of Theory and Experiment on Correlations at RHIC, Feb. 25-26, 2009, BNL, USA,
6. Maya Shimomura (Invited talk),
 "System Size and Collision Energy Dependence of v_2 for Identified Charged Hadrons at RHIC-PHENIX", Quark Matter 2009, Knoxville, TN, USA, Mar.30 -Apr.4, 2009
7. S. Esumi (Invited talk),
 "Jet-flow correlations", Flow and dissipation in ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, ECT* Trento, Italy, Sep.14-18, 2009,
8. M. Ikeda (Invited talk),
 "Measurement of Azimuthal Anisotropy with the New Reaction Plane Detector in the PHENIX experiment", V Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, CERN, Oct. 14-17, 2009,
9. M. Shimomura (Invited talk),
 "What We Have Learned from the Measurement of Azimuthal Anisotropy of Identified Particles in Relativistic Heavy Ion Collisions, Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
10. Y. Miake (Invited talk),
 "Jet as a homework from RHIC to LHC", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
11. T. Horaguchi (Invited talk),
 "Photon analysis and J-Cal", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
12. T. Chujo (Invited talk),
 "ALICE-EMCal Extension Project -status and plan-", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
13. H. Yokoyama (Invited talk),
 "Jet analysis at ALICE", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009

14. S. Esumi (Invited talk),
"Experimental studies of quark gluon plasma at RHIC" (invited talk), 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium(JCNP 2009), Nov. 9-13, 2009, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

<招待講演 (国内) >

1. 笹 公和 (招待講演)
加速器質量分析 (AMS) による Cl-36 の測定とその応用 2009 日本放射化学会年会・第 53 回放射化学討論会 日本大学文理学部百周年記念館, 2009 年 9 月 28 日 (月)~30 日.
2. 江角晋一 Towards Understanding of QGP Transport Properties- Recent jet-related results from RHIC、第 1 2 回 Heavy Ion Cafe、東京大学、2009 年 5 月 9 日
3. 江角晋一 Jet Quenching and Modification at RHIC and Jet Calorimeter for ALICE-LHC、第 6 回 Heavy Ion Pub、名古屋大学、2009 年 7 月 10 日
4. 中條達也 「RHIC 加速器をつかった QGP 生成とその性質の解明」名古屋大学 EHQ 研合同セミナー (2009 年 6 月 16 日)
5. 中條達也 "Proving Quark Gluon Plasma via Baryon Production at RHIC" 広島大学・セミナー (2009 年 11 月 30 日)
6. 中條達也 「加速器で探るビクバン直後の宇宙と QCD 相転移」広島大学・高エネルギー物理学特論 (学部 3 年生向け授業、2009 年 12 月 1 日)

<国際会議発表>

1. D. Nagae, T. Ishii, R. Takahashi, M. Asai, H. Makii, A. Osa, T.K. Sato, S. Ichikawa, Y.R. Shimizu, T. Shoji, "Lifetime Measurements for the First 2^+ States in $^{162,164}\text{Gd}$ Populated by the beta Decay of $^{162,164}\text{Eu}$ ", International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2009)
2. The 10 th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, March 8-10, 2010, RCNP, Osaka, Japan, Astrophysical studies by means of gamma-ray spectroscopy
3. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Toshiyuki Oki, Takahiro Amano, Hiroshi Matsumura, Kotaro Bessho, Norikazu Kinoshita, Yuki Matsushi, Progress of an accelerator mass spectrometry system at the Tsukuba 12UD Pelletron tandem accelerator, The 11th edition of the International Conference "Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT", Venice, Italy, from 8 to 12 June 2009.
4. K. Sasa, T. Takahashi, Y. Nagashima, Y. Tosaki, K. Sueki, Y. Takaya, N. Kinoshita, T. Amano, J. Kitagawa, K. Kurozumi, M. Matsumura, H. Matsumura, K. Bessho, Y. Matsushi, Application of Cl-36 AMS to geo-environmental sciences at the University of Tsukuba, 3rd East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry (EA-AMS-3), 19th-22nd October, 2009, Xi ' an AMS Center, Xi ' an China.

5. Kimikazu Sasa, Yuki Matsushi, Yuki Tosaki, Michiko Tamari, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Hiroyuki Matsuzaki, Kazuho Horiuchi, Yasuyuki Shibata, Motohiro Hirabayashi and Hideaki Motoyama, C osmogenic ^{36}Cl record in an ice core at the Dome Fuji station, Antarctica from the Last Glacial Maximum to Holocene, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, November 18-20, 2009. NIPR in Tachikawa City, Tokyo.
6. Peter Schury Status of Multi-Reflection Time-of-Flight Spectrometer for Radio-Isotopes at RIKEN 第3回日米物理学会合同核物理分科会 October 13-17, 2009, Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island, USA.
7. Tatsuya Chujo, "JCAL - Status overview" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
8. Yasuo Miake, "To-do list towards the next collaboration meeting" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
9. Hiroki Yokoyama, "di-jet simulation study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
10. Takuma Horaguchi, "Preparation for the Di-Jet Study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
11. Shinichi Esumi, "di-jet rate study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
12. Shinichi Esumi (Poster), "Trigger Angle Dependence of Near- and Away-side Jet Shape with respect to the Reaction Plane at mid-pT region with a special emphasis on Left / Right Asymmetry" Quark Matter 2009, Knoxville, TN, USA, Mar.30 -Apr.4, 2009
13. S. Esumi, "Hard - Soft Interplay at RHIC", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
14. T. Horaguchi, "Photon Physics at LHC-ALICE", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
15. T. Todoroki, "Reaction plane and pseudo rapidity dependence of inclusive photon - hadron $\Delta\phi - \Delta\eta$ correlation in Au+Au $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV collisions at RHIC-PHENIX", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
16. T. Chujo, "Identified Charged Hadron Spectra at RHIC and Phase of QCD from PHENIX", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
17. D. Sakata and T. Horaguchi, "Optimization of Jet Finding Algorithm in High Energy Heavy Ion Collisions with ALICE at LHC", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
18. M. Sano, "Study of jet trigger with ALICE EMCAL for PbPb 5.5TeV", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009

<日本物理学会発表>

1. 池田義雅、RHIC-PHENIX 実験における J/Psi とその他ハドロンの方位角異方性の比較、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
2. 坂田洞察、LHC-ALICE 実験における back-to back ジェットの観測と再構成、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
3. 横山広樹、LHC-ALICE 実験におけるクォークジェット・グルーオンジェット識別の研究、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
4. 浜田英太郎、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における多粒子相関の反応平面依存の研究、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学

<国内学会発表>

1. 小沢顕、RI ビームの粒子識別検出器の開発平成20年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会 2009, 4/13-14, ホテルポートプラザちば、千葉市
2. Akira Ozawa、Present status for rare RI ring project in RIBF Workshop on nuclear data and its application to nuclear astrophysics 2009, 4/20、理研、和光市
3. 小沢顕、Rare RI Ring in RIBF R I B F 実験における測定器についての検討会 2009, 12/21-22、理研、和光市
4. 小沢顕、UTTAC における不安定核研究と今後第6回停止低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 2010, 3/1-2、東京工業大学、東京都目黒区
5. 小沢顕、RI ビームの質量測定とウラン元素合成過程の解明高度制御量子ビーム応用研究創出事業 研究成果報告会 2010, 3/15、筑波大学、つくば市
6. 小沢顕、重イオン用 CDCC による不安定核からの破碎片運動量分布の解析日本物理学会第65回年次大会 2010, 3/20-23、岡山大学、岡山市
7. 小沢顕、HCTAK を使った計算の例重イオン用 CDCC に関するワークショップ 2010, 3/31、理研、和光市
8. 森口哲朗、固体水素標的を用いた ^{11}Li の反応断面積測定原子核若手三者夏の学校 2009, 8/24-29、パノマランド木島平、長野県木島平村
9. 笹 公和, 石井 聡, 大島 弘行, 木村 博美, 高橋 努, 田島 義一, 大和 良広, 小松原 哲郎, 関場 大一郎, 工藤 博, 筑波大学タンDEM加速器施設の現状, 第22回「タンDEM加速器及びその周辺技術の研究会」, 筑波大学 大学会館ホール, 2009年7月16日(木)~17日(金).
10. 笹 公和, 高橋 努, 戸崎裕貴, 末木 啓介, 筑波大学 12UD タンDEM加速器を用いた加速器質量分析装置による極微量放射性核種の検出, 第6回日本加速器学会年会 2009, 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所, 2009年8月5日(水)~7日(金).

11. 笹 公和, 「マルチタンデム加速器施設の学術・産業共用促進事業- 高度制御加速イオンビーム産業利用によるイノベーション創出と人材育成 -」, 先端機器共用施設ネットワーク「イノベーションつくば」ワークショップ: テーマ「つくばを元気にするネットワークと人材育成」, 平成 22 年 1 月 23 日 (土), 筑波大学会館 国際会議室, TX テクノロジー・ショーケース in つくば 2010 (第 9 回つくばテクノロジー・ショーケース) .
12. 笹 公和, 高橋 努, 戸崎裕貴, 末木 啓介, 極微量放射性核種の加速器質量分析による環境モニタリング研究, 日本原子力学会 2010 年春の年会, 茨城大学, 2010 年 3 月 26-28 日.
13. Peter Schury Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph at RIKEN 第 6 回停止低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 2010, 3/1-2、東京工業大学、東京都目黒区

< 科学研究費取得状況 >

1. 基盤研究 (C) 課題名: 銀河系ガンマ線源 A 1 - 2 6 の天体起源の解明
代表者: 小松原 哲郎 連携研究者: 早川 岳人、静間 俊行
2009 年度 2,100,000 円 (間接経費 630,000 円)
2. 基盤研究 (B) 花崗岩深部地下水に対する流体包有物組成の影響に関する研究
代表者: 黒澤正紀、分担者: 小松原 哲郎、笹 公和、安間 了、辻村 真貴
2009 年度 1,100 千円
3. 基盤研究 (B) (2009~2012) 加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確立
代表者: 笹 公和 分担者: 末木啓介、戸崎裕貴、大木俊征、別所光太郎、松村宏
2009 年度: 8,200 千円 (間接経費 2,460 千円)
4. 基盤研究 (A) (2007~2009) アイスコア中の宇宙線生成核種による宇宙線と地球環境の変動史に関する研究
代表者: 松崎 浩之 分担者: 笹 公和、横山祐典、堀内 一穂、村松康行、柴田康行、本山秀明
2009 年度: 6,300 千円 (間接経費 1,890 千円)
筑波大学 笹 公和 分担金: 1,000 千円 (間接経費 300 千円)
5. 基盤研究 (B) (2007~2009) 富士山周辺湧水の年代測定と地下水流動系の解明
代表者: 田瀬 則雄 分担者: 辻村真貴、笹 公和、藪崎志穂
2009 年度: 1,900 千円 (間接経費 570 千円)
笹 公和 分担金: 200 千円

< 外部資金取得状況 >

1. 平成 20 年度「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」若手原子力研究プログラム「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」研究代表者 笹 公和研究期間 2008-2009 年度委託経費 計 20,000 千円
2. 日本学術振興会 国際学会派遣事業 平成 21 年度 I 期採択 The 11th edition of the International Conference "Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT, Venice, Italy, from 8 to 12 June 2009.
3. 基盤研究 (S) 課題名：ジェット識別測定によるクォーク・グルーオンプラズマ物性の研究
代表者：三明康郎 分担者：江角晋一、中條達也、稲葉基、濱垣秀樹
直接経費 23,600,000 間接経費 7,080,000 30,680,000
4. 特別推進研究課題名：クォーク物質創成とフォトン物理
代表者：杉立徹 分担者：志垣賢太、本間謙輔、三明康郎、浜垣秀樹、稲葉基
直接経費 2,000,000

<研究会開催>

1. 第 22 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」、
H21 年 7 月 16 日 (木)～17 日 (金)
筑波大学 大学会館ホール
2. The 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium,
from November 9 (Mon) to November 13 (Fri), 2009,
University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

VII – 1 . 非平衡統計物理

教授	有光 敏彦
助教	吉田 恭
博士後期課程大学院生	小松崎 慎人, 武智 公平, 大日向 正志
博士前期課程大学院生	阿部 朝彦
学群生 (卒業研究)	丸山 隆一
研究留学生	図力古爾, 程 コウ

【1】散逸場の量子論，量子情報物理 (有光) 著書 [1]

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

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

(1) 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 [1]

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。

(2) 空間相関を考慮した環境下での量子誤り訂正 (有光) 論文 [2]

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, スタビ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。

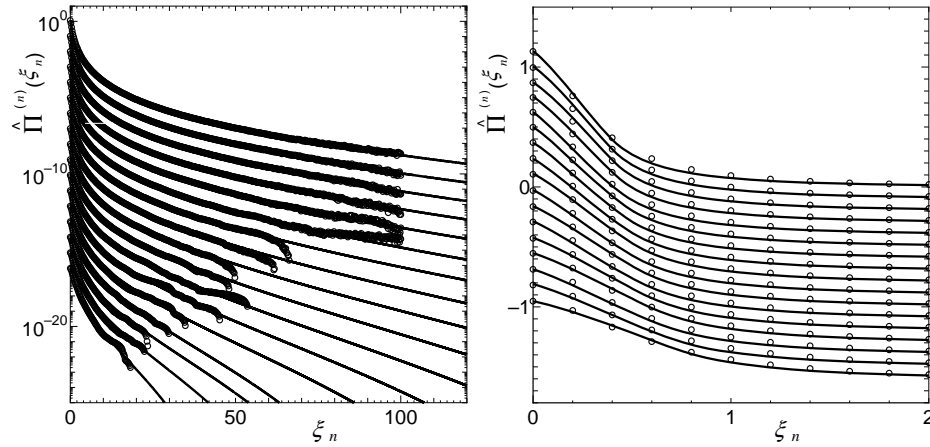


図 1: The PDFs of energy transfer rates for $\delta = 2^{1/4}$ on (a) log and (b) linear scale in the vertical axes. For better visibility, each PDF is shifted by -1 unit along the vertical axis in (a) and by -0.1 unit along the vertical axis in (b). Open circles are the PDFs by DNS from the smallest value (top) to the largest value (bottom) in $2r/\eta$. Solid lines represent the curves given by the present theory with $\mu = 0.320$ ($(1-q)\ln\delta = 0.323$, $\alpha_0 = 1.19$, $X = 0.382$). Note that $q = -0.862$.

(3) 連続量量子テレポーテーション (院生: 大日向, 有光, 吉田)

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

連続量量子情報の伝送では, エンタングル状態がスクイーズド状態を利用して作られているが, 実験室で生成されるスクイーズド真空では, そのスクイーズドの程度をあまり大きくできないため, Alice と Bob が共有するエンタングル状態は不完全である。Alice が実施するホモダイン測定の基底も, スクイーズド状態を利用して作られたものと仮定すると, スクイーズド状態が不完全であるため, 測定量演算子 (位置の差および運動量の和) の固有状態にはならない。従って, Alice の得る測定値に量子的不確定さが入り込む。これらの不完全性が出力状態に与える影響を, NETFD を駆使して調べた。その結果, Alice と Bob 間のエンタングル状態の不完全さの程度とホモダイン測定の不完全さの程度には, 興味深い関係のあることが分かった。それは, 「前者の不完全さと後者の不完全さが同程度のときに, フィデリティが最も良い値を与える」というものである。引き続き, 上記の不完全さに加え外部環境の影響を受けた場合の出力状態の被る変化を調べている。

【2】 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) 論文 [3, 4], 講演 [3, 4, 5, 7]

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

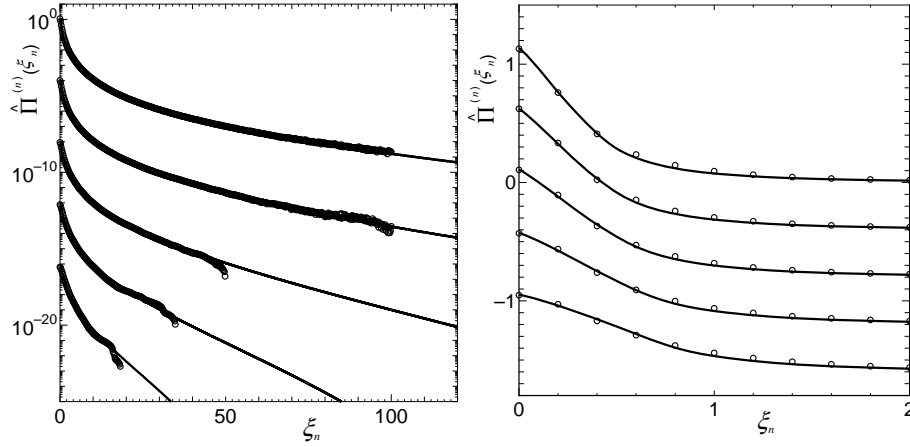


図 2: The PDFs of energy transfer rates for $\delta = 2$ on (a) log and (b) linear scale in the vertical axes. For better visibility, each PDF is shifted by -4 unit along the vertical axis in (a) and by -0.4 unit along the vertical axis in (b). Parameters are the same as Fig. 1. Note that $q = 0.534$.

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。

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は

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

の形に拡張すべきであることを明らかにした。ただし、 α_- と α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は、注目している物理量のマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ のゼロ点である。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 4096³ 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、 $\delta = 2^{1/4}$ と $\delta = 2$ の場合におけるエネルギー輸送率 PDF の解析結果を載せてある。こ

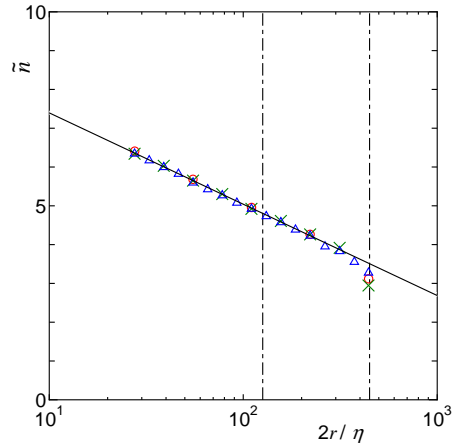


図 3: The relation between \tilde{n} and $2r/\eta$ extracted from the PDFs of energy transfer rates for $\delta = 2^{1/4}$ (open triangles), $\delta = 2^{1/2}$ (crosses) and $\delta = 2$ (open circles). The line is $\tilde{n} = -1.02 \ln(2r/\eta) + 9.75$. Note that the inertial range is the region between the vertical dash-dotted lines.

の乱流 DNS 系の間欠性指数が $\mu = 0.320$ であることが、何れの δ での解析からも得られ、新しいスケール関係式の検証に成功した。さらに、慣性領域より遥かに小さいスケールまで、特異性がスケール則を満たしていることを見出した。 \tilde{n} はエネルギー・カスケードモデルにおけるステップ数に対応し、それが δ に依存しないことが示された (図 3)。

(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: 小松崎, 有光) 講演 [3, 4, 5, 7]

新しいスケール関係式 (1) は『十分発達した乱流は、 δ^∞ 不安定周期軌道に基づく δ スケール・カントール集合の集合体である』という新しい解釈が可能であることを示唆している。

δ^∞ 超安定周期軌道でさえ、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ことがほとんどなかった。そのような状況の中、 δ^∞ 不安定周期軌道の構造を解析するために、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を進めている。まず、その方法とそれに基づいた数値計算手法を考案し、 δ^K 不安定周期軌道 ($K \gg 1$) を具体的に追跡する。これにより、『 δ^∞ 不安定周期軌道の階層構造解析』の抽出を進めている。これは、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くものである。

(3) 極性流体としての粉粒体流の構成方程式 (院生: 武智, 吉田, 有光) 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、一様トルク外場下における 2 次元粉粒体の振り舞いを調べた。散逸関数や構成方程式を測定し、その関数形を決定した。粉粒体の体積分率 ν が小さい場合 ($\nu = 0.1$)、シミュレーション結果は roughness 係数をフィットすれば Lun による運動論的理論と整合することが示された。また $\nu = 0.7$ の高密度で応力への衝突による寄与が運動論的寄与を凌駕するようになってもなお、運動論的理論による構成方程式の見積もりが有効であることが示された。更に密度を上げてジャミング転移点に近い密度 $\nu = 0.8$ になると、シミュレーションと運動論的理論の結果に乖離が生じることが明らかになった。比較的密な粉粒体流においては、金谷理論が有効であることが期待されたが、(i) 散逸関数の動

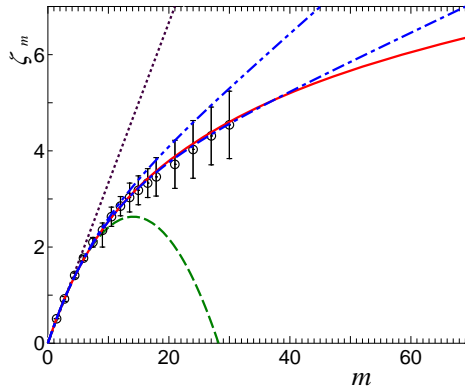


図 4: 記号 \circ が DNS の結果，実線が A&A モデル (MPDFT)，一点鎖線が S-W モデルである。比較のため，K41(点線)，K62(破線)，She-Leveque (1984) モデル (二点鎖線) のスケーリング指数も描いてある。

摩擦係数依存性，(ii) 散逸関数から構成関係式への分解方法，の 2 点において， $\nu = 0.8$ の本シミュレーション結果と金谷理論は整合しないことが示された。従って，粉体流でジャミング転移に近い体積分率の場合には，運動論における互いに独立な短時間衝突過程とも，金谷理論における接触点での 2 粒子の表面速度差が維持される長時間接触過程とも異なる粒子間相互作用の描像が必要であることが示唆された。

(4) 電磁流体乱流の統計解析 (吉田) 講演 [1, 2, 8]

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。

これ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。また，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。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，現象論的解析から，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) 一般化された log-Poisson モデルの検証 (有光) 講演 [6]

一般化された log-Poisson モデルに基づいて速度構造関数 ζ_m が，各種の実験から得られた速度構造関数を精度良く再現することが報告されている。速度構造関数は $\langle (\delta u_n / \delta u_0)^m \rangle = (\ell_n / \ell_0)^{\zeta_m}$ で定義される。ただし， $\langle \cdot \rangle$ は $P(\alpha)$ での平均であり， $\delta u_n = |u(\bullet + \ell_n) - u(\bullet)|$ は速度場成分 u の速度差を表わす。

MPDFT の A&A モデルでは，マルチフラクタル・スペクトル

$$f(\alpha) = 1 + \left\{ \ln \left[1 - (\alpha - \alpha_0)^2 / (\Delta\alpha)^2 \right] \right\} / (1 - q) \ln \delta \quad (2)$$

を出発点とする。 $\alpha_0, \Delta\alpha, (1-q)\ln\delta$ は、1つのパラメータ μ (間欠指数) を与えると決まる。ただし、 q はエントロピー指数、 δ は拡大率である。一方、She-Waymire (S-W) モデル (1995) では、質量指数

$$\tau(\bar{q}) = 1 - (1 + \gamma)\bar{q} + \gamma^2[1 - (1 - \mu/\gamma)^{\bar{q}}]/\mu \quad (3)$$

を出発点とする。 μ と γ の2つのパラメータに依存する。質量指数 $\tau(\bar{q})$ は、 $f(\alpha)$ と Legendre 変換 $f(\alpha) = \alpha\bar{q} + \tau(\bar{q})$ で関連している。速度構造関数を通じて導入されるスケーリング指数 ζ_m は、 $\zeta_m = 1 - \tau(m/3)$ で与えられる。各種モデルのスケーリング指数を図 4 に掲げた。 $m \lesssim 40$ での A&A モデルと S-W モデルの解析精度が高いことが分かる。MPDFT の物理的背景を探る比較考察を進めている。

(6) 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: 武智, 吉田, 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。

【3】研究・教育成果の社会への還元・奉仕活動

(1) 雑誌編集委員 (有光) 社会還元等 [1, 2]

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

(2) 翻訳 (有光) 社会還元等 [3]

パリティー誌の依頼により、翻訳を行った。

(3) 研究集会代表者 (吉田) 社会還元等 [4]

研究集会の研究代表者を務めた。

< 論文 >

- [1] Kyo Yoshida, Tsuyoshi Hayashi, Sachiko Kitajima and Toshihico Arimitsu: “Dissipative squeezed vacuum in non-equilibrium thermo field dynamics”, *Physica A*, **389**(4), 705–722 (2010).
- [2] T. Arimitsu: “Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics and Its Application to Error-Correction for Spatially Correlated Quantum Errors”, *Interdisciplinary Information Sciences* **15** (2009) 441–471.
- [3] T. Arimitsu and N. Arimitsu: “Analysis of PDFs for Energy Transfer Rates from 4096³ DNS — Verification of the Scaling Relation within MPDFT —”, *J. of Turbulence* (2010) submitted.
- [4] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Verification of the scaling relation within MPDFT by analyzing PDFs for energy dissipation rates of 4096³ DNS”, *Physica A* (2010) submitted.

- [5] Kohei Takechi, Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Constitutive equations for granular flow under uniform shear and external torque”, Cond. Mat. Phys., submitted.

< 著書 >

- [1] 柴田文明, 有光敏彦, 番 雅司, 北島佐知子: 「量子と非平衡系の物理」(東京大学出版会, 2009) pp.369 [ISBN978-4-13-062611-8].

< 講演 >

- [1] 招待講演 Kyo Yoshida: “Small scale statistics of isotropic and weakly anisotropic MHD turbulences”, International Symposium on Modern Perspectives of Fluid Mechanics, 2009年6月, Nagoya University, Nagoya, Japan.
- [2] 招待講演 Kyo Yoshida: “Spectra in astrophysical turbulences”, RIMS Workshop “Mathematics and Physics across the Diversity of Turbulence Phenomena”, 2009年7月, Kobe Institute, Kobe, Japan.
- [3] T. Arimitsu, N. Arimitsu and T. Motoike: “Analyses of Fully Developed Turbulence by MPDFT — Generalized Scaling Relation and δ^∞ Unstable Orbits —”, International Symposium on Turbulence, 2009年9月21日–9月25日, Peking University, Beijing, China
- [4] 特別講演 有光敏彦, 有光直子, 本池巧: 「充分発達した乱流の新しい解釈に向けて — δ^∞ 不安定軌道の集団 —」, 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2009年11月12日–14日, 九州大学応用力学研究所, 福岡
- [5] 招待講演 有光敏彦, 有光直子: 「間欠的時系列のマルチフラクタルPDF理論による解析 — 乱流を題材にして —」, “非線形時系列に対する現象数学の発展” シンポジウム (明治大学グローバルCOEプログラム「現象数学の形成と発展」), 複雑系現象の時系列解析3 — 経済現象・物理現象 —, 2009年11月19日–20日, 明治大学, 駿河台
- [6] 有光敏彦, 有光直子: 「一般化された log-Poisson モデルの検証 — マルティフラクタル確率密度関数理論の視点から —」, 日本物理学会 第65回年次大会, 2010年3月, 岡山大学, 岡山
- [7] 有光直子, 有光敏彦: 「風洞乱流のマルチフラクタルPDF理論による解析」, 日本物理学会 第65回年次大会, 2010年3月, 岡山大学, 岡山
- [8] 招待講演 吉田 恭: 「乱流小スケールにおけるデータ同化の影響」, 統計数理研究所 2009年度共同利用共同研究集会『乱流の統計理論とその応用』, 2010年3月, 統計数理研究所, 東京, 日本.

< 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: 翻訳「拡散, その2筋の系譜」T.N. ナラシンハン (パリティ, 2010.04, 丸善) 22–29.
- [4] 吉田恭: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象および非平衡系の多様性と普遍性」研究代表者, 2009年1月–.

< 卒業論文 (学士) >

- [1] 筑波大学卒業論文: 丸山隆一 (有光) 「神経細胞の生理学的測定データへの隠れマルコフ解析の応用」(2010) 3月.

VII-2. 量子物性理論

教授：初貝安弘

研究科特別研究員：有川晃弘

大学院生：2名

【1】量子物質相における幾何学的位相の研究：論文 [1, 2, 4, 5, 7], 著書 [1], 講演 [1-3, 7, 10, 13, 17, 19, 20, 22]

(1) グラフェン、量子スピホール相、トポロジカル絶縁体の研究

Dirac フェルミオンとしての特異なエネルギー分散に起因する特異な幾何学的位相を示すグラフェン並びにトポロジカル絶縁体としての量子スピホール相に対して集中的な研究を行った。具体的に以下のようなテーマに関して研究を行った。

- グラフェン

グラフェンに関して、幾何学的位相が寄与する典型的な物理量としてのホール伝導度の計算を行った。特に乱れのあるグラフェンに対してカイラル対称性と $n=0$ ランダウ準位のトポロジカル安定性の観点に着目し詳しい数値的研究をおこないその結果をチャーン数の計算とともに公表した。(2) また、トポロジカルな物理量であるホール伝導度の有限の周波数への拡張に関する数値的に計算を行いある種のステップ構造を見出した。さらには Dirac cone の存在、ならびにカイラル対称性とフェルミオンのダブリングの問題に関する一般的な観点から研究を行った。

- トポロジカル絶縁体としての量子スピホール相

スピホール相に関連しては、時間反転不変性に起因するクラマース縮退する物理系における非可換ベリー接続の一般論を四元数 (quaternion) を用いて構築し、Dirac 単極子、Yang 単極子との関連を第一第二チャーン数との関連を含めて、極めて明解な形に定式化することに成功した。

(2) 量子液体相の幾何学的位相による特徴づけ

トポロジカル秩序、量子秩序等新規な概念に基づき、量子液体相、スピン液体相の対称性の破れによらない分類、特徴付けをめざす研究を行った。量子力学固有の幾何学的位相に基づき、固有値問題に伴い必然的に生ずるゲージ変換の自由度とゲージ構造に着目し、ある種の秩序変数の類似物として量子化ベリー位相と一般化されたホール伝導度としてのチャーン数を主たる研究の手段とする。これは量子系固有の量であり、古典的対応物を持たない。そのため、通常の相の理論としては明確な区別の困難な相に対しても有効な相分類が行えることとなる。この一般論の有効性は複数の論文において公表してあるが、本年度は概念の一層の発展を図るとともに、これらをより広範囲な強相関電子系、スピン系における「量子液体相」に対して適用し、各物質相のより深い理解と量子相転移の記述を目指した。具体的な量子液体としては量子ホール系、グラフェン、ハバード模型に代表される強相関電子系の模型等があるが、本年度はボーズアインシュタイン凝縮相と BCS 超伝導相とのクロスオーバー現象に着目して、これを局所的ひねりを導入することによる局所的量子相転移として捕らえることに成功し、これを論文にまとめ、公表した。また、直交ダイマー模型と呼ばれる2次元の模型での有効性も確認した。

(3) 量子液体とエンタングルメントエントロピー

エンタングルメントエントロピーを評価することで、「量子液体相」をその基底状態とすると考えられる種々の物理系に対してその基底状態を数値的に厳密対角化の手法でもとめ、量子液体相の特徴付けを行った。具体的手続きとしては種々の量子液体相をその基底状態とする模型ハミルトニアンを用い、多粒子状態の基底状態を数値的に求める。その際物理系を2つに何らかの意味で分割しておく。よってその基底状態は部分系での基底を用いて展開される。これから基底状態の密度行列（純粋状態）を標準的に定義し、それを部分系の1つの部分系について縮約することで密度行列をもとめる。すると一般にこれは混合状態にありその量子論的エントロピーとしてエンタングルメントエントロピーをもってエンタングルメントエントロピーとする。この手続きを種々の量子液体相に対して数値的手法を用いつつ適用し、対称性の破れを伴わない量子相の特徴付けの一般論を構築した。

【2】フラストレート磁性体における量子効果の研究：論文 [6]，講演 [4-6, 8, 9, 11, 14, 15, 18, 23-25]

フラストレートしたスピン液体相の対称性の破れによらない分類、特徴付けをめざし、トポロジカル秩序、より広くは量子秩序の概念を用いた研究を行った。フラストレート系に対して、幾何学的位相に基づく種の秩序変数の類似物としての量子化ベリー位相を主に用いた研究を行う。ここでは系の励起に有限のエネルギーギャップが存在すること、並びに時間反転対称性が重要である。局所的スピンひねりによるベリー位相をもって量子的局所秩序変数とすると、系に時間反転対称性があるとベリー位相は0または π に量子化する。このベリー位相の量子化値をもって局所的に特徴づけるわけである。これは量子系固有の量であり、古典的対応物を持たない。そのため、通常の相の理論としては明確な区別の困難な相に対しても有効な相分類が行えることとなる。本公募研究においては、上記の各概念の一層の発展を図るとともに、これらをより広範囲なフラストレートしたスピン系における「スピン液体相」に対して適用し、各スピン液体相のより深い理解とフラストレーション起源の量子相転移の記述を目指す研究を行った。具体的には、量子スピン系と電子系に関する数値的かつ解析的な研究を大阪大学の丸山勲氏と共同で行った。また筑波大学の大学院学生、棚谷も数値的手法を用いて研究をおこなった。特に直交ダイマ模型と呼ばれる2次元の模型に対する Z_2 ベリー位相の高い有効性を確認することができ、現在関連論文を執筆中である。

【3】第一原理計算と融合した位相不変量（トポロジカル絶縁体等）の研究：論文 [3]，講演 [12, 16, 21]

近年大きな話題となっているトポロジカル絶縁体に対する第一原理的計算のさきがけとなる、第一原理計算と融合した位相不変量によるホール伝導度の計算手法とその応用に関する基礎的論文を完成させた。さらには、その理論的枠組みを具体的なマルチバンドのグラフェン、有機物伝導体に対して適用することで物質に対する具体的な知見を得た。尚その結果の一部は既刊である。

【4】一次元量子系並びにスピントラップの研究：論文 [8, 9]

一次元スピントラップにおけるダイマリゼーションの効果に関する数値的研究ならびに、一次元スピンレスフェルミオンに関するスペクトル関数に関する理論的な研究を行った。

<論文>

1. T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Optical Hall conductivity in 2DEG and graphene QHE systems", *Physica E* **42** 751-754 (2010).

2. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Landau level broadening in graphene with long-range disorder — Robustness of the $n = 0$ level", *Physica E* **42** 759-762 (2010).
3. M. Arai, Y. Hatsugai, "Numerical study of quantum Hall effect in two-dimensional multi-band system: single- and multi-layer graphene", *Physica E* **42** 740-743 (2010).
4. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Quantum Hall plateau transition in graphene with correlated random hopping", *Phys. Rev. Lett.* **103** 156804 (4) (2009).
5. T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Optical Hall conductivity in ordinary and graphene QHE systems", *Phys. Rev. Lett.* **103** 116803 (4) (2009).
6. M. Arikawa, S. Tanaya, I. Maruyama, Y. Hatsugai, "Edge states of Spin-1/2 Two-Leg Ladder with Four-Spin Ring Exchange", *Phys. Rev. B* **79** 205107 (5) (2009).
7. Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in graphene with/without magnetic field: Chiral symmetry, Dirac fermions and Edge states", *Solid State Communication* **149** 1061-1067 (2009).
8. S. Nishimoto and M. Arikawa, "Dimerization transition of three-leg Heisenberg tube", *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 022039 (4) (2010).
9. M. Kohno, M. Arikawa, J. Sato, and K. Sakai, "Spectral Properties of Interacting One-Dimensional Spinless Fermions", *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 043707 (4) (2010).

<著書>

1. 初貝安弘、「グラフェンのエッジ状態の起源」「グラフェンの機能と応用展望」第2章（監修）齊木幸一朗、徳本洋志、シーエムシー出版 7月 (2009)

<講演>

1. 初貝安弘, "時間反転対称な多電子系の四元数表示とベリー接続", 日本物理学会第 65 回年次大会, 03/21 (2010) 岡山大学
2. 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, "グラフェン $n=0$ ランダウ準位における異常性とカイラル対称性", 日本物理学会第 65 回年次大会, 03/21 (2010) 岡山大学
3. 森本高裕, 初貝安弘, 青木秀夫, "蜂の巣格子模型に基づくグラフェン量子ホール系の光学ホール伝導度", 日本物理学会第 65 回年次大会, 03/23 (2010) 岡山大学
4. 棚谷翔, 有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘, "2次元直交ダイマー系における Z2 ベリー位相", 日本物理学会第 65 回年次大会, 03/22 (2010) 岡山大学
5. M. Arikawa, I. Maruyama, Y. Hatsugai, "Z2 topological classification in BEC-BCS crossover phenomena", American Physical Society March Meeting 2010, 03/18 (2010) March 15 - 19, 2010 Portland, Oregon, USA
6. Y. Hatsugai, "Quantum/Spin liquids, geometrical phases and edge states (selected oral)", Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials 2010 (PSM2010), 03/10 (2010) Hamagin Hall "VIA MARE", Yokohama

7. Y. Hatsugai, "Correspondence between the bulk quantum states and boundary states in topological phases in condensed matter (selected oral)", IPMU Focus Week Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics, 02/09 (2010) Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU) Kashiwa, JAPAN
8. 初貝安弘, "Berry phases and their generalization for frustrated quantum magnets", フラストレーションが創る新しい物性 平成 21 年度領域成果報告会, 01/08 (2010) 京都大学基礎物理学研究所パナソニック国際交流ホール
9. 丸山勲, 棚谷翔, 有川 晃弘, 初貝安弘, "フラストレーション系の量子相転移におけるトポロジカル不変量とエッジ状態", 第 5 回トピカルミーティング「誘電体にひそむランダムネスとフラストレーション」, 12/18 (2009) 大阪大学
10. 初貝安弘, "「グラフェンにおけるバルクエッジ対応」", 筑波大学—KEK 連携 mini 研究会 (初貝代表 基盤研究 B, 20340098 共催), 11/27 (2009) 筑波大学
11. 有川晃弘, 初貝安弘, "フラストレーションをもつ 1 次元スピン系の動力学の理論", 第二回連携研究会 (—筑波大学と KEK との研究連携を目指して—), 11/02 (2009) いばらき量子ビーム研究センター 会議室
12. M. Arai, Y. Hatsugai, "Numerical study of quantum Hall effect in graphene and related materials", The 12th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN12), 10/26 (2009) Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China
13. 初貝安弘, "電子相関と時間反転対称な系のベリー接続", 日本物理学会 2009 年秋季大会 7pQF-15, 09/27 (2009) 熊本大学
14. 河原林透, 小野嘉之, 初貝安弘, 小林健, "二次元六角格子における電子格子相互作用の効果", 日本物理学会 2009 年秋季大会 28aQF-11, 09/28 (2009) 熊本大学
15. 有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘, "引力相互作用系でのベリー位相", 日本物理学会 2009 年秋季大会 27pQF-14, 09/27 (2009) 熊本大学
16. 新井正男, 初貝安弘, "ゼロギャップ有機伝導体における量子ホール効果", 日本物理学会 2009 年秋季大会 25aYC-7, 09/25 (2009) 熊本大学
17. (招待基調講演) Y. Hatsugai, "Berry connections and Dirac dispersion (Keynote)", Quantum Gauge Theories and Ultracold Atoms, 09/02 (2009) Sant Benet, Barcelona, Spain
18. Isao Maruyama, Shou Tanaya, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, "Topological identification of location of spin-singlet pairs and edge states", The International Conference on Magnetism - ICM 2009, 07/30 (2009) Karlsruhe, Germany
19. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, and H. Aoki, "Quantum Hall transition in graphene with correlated disorder", Graphene Tokyo 2009, 07/26 (2009) Univ. of Tokyo, Tokyo
20. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Landau level broadening in graphene with long-range disorder; Robustness of the $n=0$ level", Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), selected oral presentation, 07/22 (2009) Kobe International Conference Center, Kobe Japan
21. Masao Arai and Yasuhiro Hatsugai, "Numerical study of quantum Hall effects in two-dimensional multi-band system: single- and multi-layer graphene", Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 07/23 (2009) Kobe International Conference Center, Kobe Japan

22. Takahiro Morimoto, Yasuhiro, Hatsugai, Hide. Aoki, "Optical Hall conductivity in 2DEG and graphene QHE systems", Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 07/19 (2009) Kobe International Conference Center, Kobe Japan
23. Y. Hatsugai, H. Takayanagi, T. Morimoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki, P. A. Maksym, S. Nomura, M. Arai, "「2009 年度第一回 対称性の破れを伴わない量子液体相」ワークショップ 主催", 07/10 (2009) Univ. of Tsukuba
24. 有川晃弘、棚谷翔、丸山勲、初貝安弘, "リング交換相互作用をもつスピン梯子系のバルク・エッジ対応", 第4回トピカルミーティング「フラストレーションとカイラリティ」, 07/03 (2009) 有馬温泉 メープル有馬
25. Y. Hatsugai, "Berry phases in quantum liquids with frustration (selected oral talk)", Joint European Japanese Conference : Frustration in Condensed Matter, 05/13 (2009) Ecole Normale Supérieure de Lyon Lyon, France

<社会還元等>

1. 初貝安弘, 理論物理学刊行会, "Progress of Theoretical Physics" 編集委員
2. Y. Hatsugai, Program Committee of the 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)
3. 教員免許講習講義「自発的対称性の破れ—物質科学から素粒子宇宙物理学まで(前半)」 2009年6月
4. 東京大学物性研究所附属施設物質設計評価施設スーパーコンピュータ共同利用課題審査委員会委員

<学位論文(修士)>

1. 棚谷 翔, 「スピン液体相におけるベリー位相の Z_2 量子化の数値的研究」

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 B 課題番号: 20340098 「対称性の破れを伴わない量子液体相:幾何学的位相による理論とその応用」(研究代表者: 初貝安弘)(平成 21 年度直接経費 4,200 千円)
2. 科学研究費 特定領域研究 (A) 課題番号: 20029004 「量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序」(公募研究)(研究代表者: 初貝安弘)(平成 21 年度直接経費 1,100 千円)
3. 科学研究費 特定領域研究 (A) 課題番号: 20046002 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相」(公募研究)(研究代表者: 初貝安弘)(平成 21 年度直接経費 700 千円)
4. 科学研究費 挑戦的萌芽研究 課題番号: 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」(研究代表者: 初貝安弘)(平成 21 年度直接経費 1,300 千円)

VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦
研究員 小口 悠 (物創 白石グループ所属)
大学院生 (1名) 磯崎健太

スピン・電荷の自由度を制御可能な「量子論理ゲート」の実現を目指し、現在、様々な系が提案されているが、GaAs/AlGaAs系に代表されるナノサイズの半導体量子ドット系は、スケーラビリティにも優れ最も実現が望まれている系である。量子ドット系を用いてスピン・電荷を制御する試みは多岐に渡っており、例えば(1)量子ドットが持つ強い電子相関、(2)リング系などの量子干渉効果(ファノ・近藤効果)、(3)磁場効果、(4)電場効果(ラシュバ型スピン軌道相互作用)、等から「適切な」組合せを探ることが必要とされる。我々は、これらの「複合ナノ構造系」に対して、量子輸送特性と荷電・スピン制御性を明らかにすべく継続的に研究を進めている。特に有効理論に基づいた普遍的挙動の観点から、電子相関効果と量子効果に着目した議論を行っている。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

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増強されることが知られる($N_d = 1$ の軌道近藤効果)。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するため、「内部縮退自由度を持つ」量子ドットとして同じ範疇に属すとみなすことができる。前年度までの線形コンダクタンスの計算結果を踏まえ、本年度は特に非線形コンダクタンス、及び非平衡揺らぎ(ショットノイズ)に関する議論を進めた。

(1) 非線形コンダクタンスの挙動 (論文 [1,2]、講演 [2])

軌道縮退量子ドット系において非線形コンダクタンス G の温度 T 依存性および有限バイアス V 依存性を有効理論により調べた。有限バイアス電圧は、繰り込みフローの切断エネルギーとして有限温度と同様の役割を果たすと期待されるが、我々の計算結果は基本的にこれを支持する(図1(左))。つまり、非線形コンダクタンスの普遍関数 $F_n(t = T/T^*, v = eV/T^*) \equiv G(T, V)/G_0$ は大きいエネルギー $\max[T, eV]$ によって支配される(ただし T^* は各ゲート電圧で定義される特性温度 = 近藤温度)。

有限バイアスの存在は量子ドットの電子間相互作用に大きな影響を及ぼす。しばしば $N_d = 2$ 領域における近藤効果によるコンダクタンス増大の有無と、 $SU(4)$ アンダーソン模型を用いた解析の妥当性が議論されるが、有限バイアスの存在によりコンダクタンス挙動は大きく変わるため、より注意深い議論が必要となることが明らかになった。実際、Wilhelm らのグループによる並列二重準位縮退量子ドット系の実験では $N_d = 1$ の領域のみでコンダクタンス増大が観測され、軌道縮退アンダーソン模型で説明することは困難と考えられていた。しかし我々は、相互作用の非対称性と有限バイアス電圧効果を適切に考慮すれば、軌道縮退アンダーソン模型の枠組の中でもこの実験結果に一貫した解釈を与えることが可能であることを示した (図 1(右))。

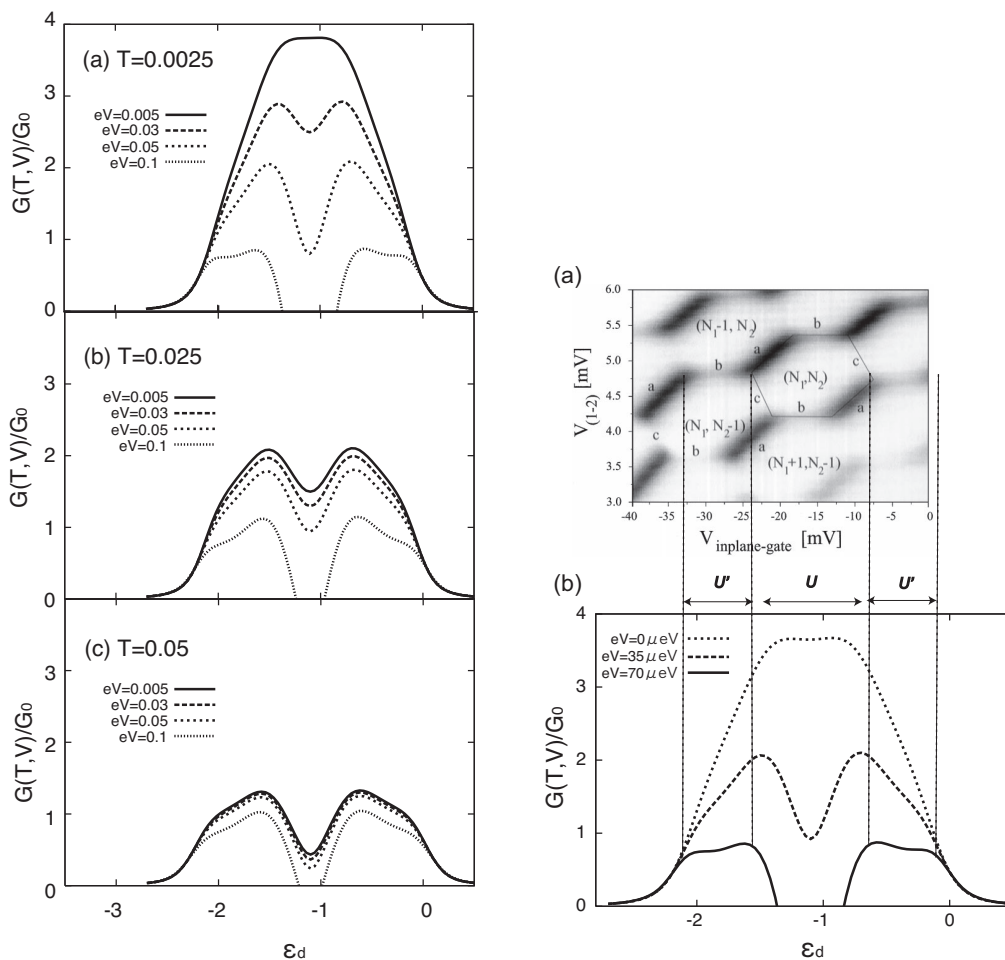


図 1 (左) 非線形コンダクタンスの温度依存性。バイアス電圧との大小関係により挙動が大きく変わる。(右) Wilhelm らによる実験結果と当グループの計算結果との比較

(2) 非線形コンダクタンスの普遍類 (論文 [2])

現在、実験で使われている量子ドットの軌道内/軌道間クーロン相互作用の大きさ U , U' は、ドットの緩和定数 Γ の 10 ~ 20 倍程度である。通常、相互作用 ∞ の極限では、 $U' < U$ においてコンダクタンス挙動を支配する普遍類に、 $SU(4) \leftrightarrow SU(2) \times SU(2)$ の乗り移りが起こることが期待されている。しかし、実験に対応する $U \approx 10 \sim 20\Gamma$ のパラメータレンジでは、コンダクタンスの普遍類は軌道内と軌道間のクーロン相互作用の大きさが異なる場合 ($U'/U \approx 0.6 \sim 1.0$) であっても、普遍類の乗り移りを起こしておらず、その挙動はむしろ常に $SU(4)$ 対称性により支配されていることが明らかになった。

(3) 非平衡揺らぎ (講演 [1])

量子ドット系の非平衡状態を記述する現象として非線形コンダクタンスとともに良く用いられているものが、非平衡揺らぎ (ショットノイズ) である。一般に、非平衡揺らぎは、典型的な「電子相関非平衡現象」であり、コンダクタンスに比べ電子相関がより重要な影響を及ぼす。ショットノイズを特徴づけるファノパラメータ \tilde{F}_0 は、ドットに相互作用のない場合には $\tilde{F}_0 = 1$ 、通常の単一量子ドットの近藤領域でのショットノイズに対しては $\tilde{F}_0 \approx 1.67$ となる。従来ショットノイズ測定は困難であるが、最近、Delattreらのグループにより、カーボンナノチューブ量子ドットの近藤領域 ($N_d = 1$) におけるショットノイズ測定が実施され、 $\tilde{F}_0 \approx 0.5$ という結果が報告された。我々は有効理論から $\tilde{F}_0 \approx 0.54$ という値を得ており、実験結果と比較的良好一致をみている。ただしこの値はドットのクーロン相互作用の大きさ U/Γ や、軌道間/軌道内のクーロン相互作用の比 U'/U にも依存しているため、今後更に詳しい解析が必要である。

【2】AB リング-量子ドット系の電荷制御性 (講演 [3]、学位論文 (修士)[1])

量子ドットを埋め込んだ Aharonov-Bohm 干渉系 (AB リング・ドット系) は、制御性が高く量子素子として有望である。しかしリング・ドット系は、低温において、多体効果 (近藤効果) と量子干渉効果 (ファノ効果) が影響を及ぼしあうファノ・近藤効果を示す系として知られ、微視的理論に基づいた解析を必要とする。一方、リング・ドット系は、「AB 効果 \leftrightarrow AC 効果」対応によりラシュバ型スピン軌道相互作用により生じるスピントロニクス現象を理解する上でも、重要な雛型ともなっている。本研究では、近藤効果が顕在化するファノ・近藤低温領域において、量子干渉と電子相関の複合的影響を調べた。特に、(1) 近藤温度の磁束依存性とクーロン相互作用との関連、(2) 単一量子ドット系で確

認められている温度・有限バイアスの普遍的スケーリングが、ファノ・近藤系で成立するか否か、の2点を議論対象とした。

非平衡グリーン関数法による標準的定式化により線形/非線形コンダクタンスを微視的理論から構成し、2,3のもっともらしい仮定を使うと、ファノ公式 $G(T \rightarrow 0, V_b \rightarrow 0) \propto |e + q|^2 / (e^2 + 1)$ を有限温度、有限バイアスに拡張することができる。有限相互作用スレーブボゾン法を適用すると、特性温度(近藤温度)がAB磁束に依存するだけでなく、その磁束依存性の様子自体がクーロン相互作用の大きさ U/Γ により大きな変化することを明らかになった(図2)。

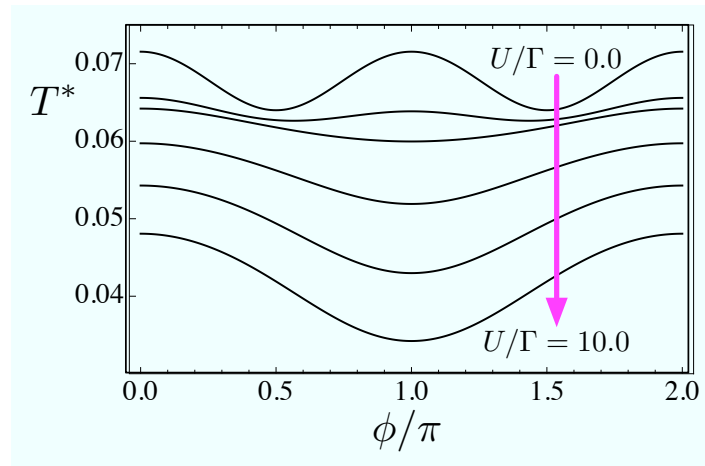


図2 特性温度 T^* の磁束依存性 (ゲート電圧=一定)。曲線は上から $U/\Gamma = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$ 。

【3】ファノ・近藤効果によるスピン操作 (講演 [4]、学位論文(修士)[1])

ラシュバ型スピン軌道相互作用は、スピン依存性をもつ位相効果を与えることから有効的な磁束として働き得る。そのため、電場によるスピン制御を可能とする期待から現在活発に研究が進められている。しかしラシュバ型スピン軌道相互作用のみだけでスピン依存輸送が実現されるわけではない。スピン依存輸送を誘起させるためには、更に有限バイアス電圧の存在、電子間に相互作用効果があることが必要と考えられているが、このような「電子相関非平衡現象」に対する理解は十分なされていない。このような観点から、我々は、有限バイアス下での近藤効果という「電子相関非平衡現象」がラシュバ型スピン軌道相互作用を介してスピン依存輸送にどのように関わっているかを調べている。特に本年度においては、スピン制御系(ラシュバリング・ドット系)の線形・非線形量子輸送現象

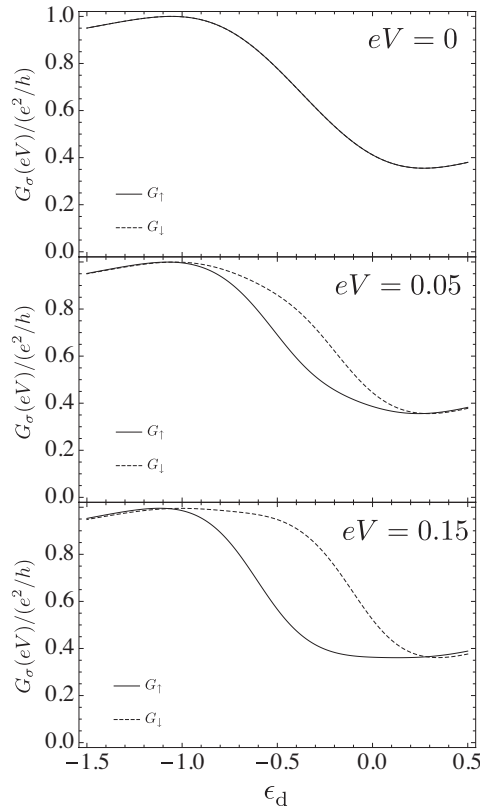


図 3 有限バイアス電圧によるスピン依存輸送の誘起。線形領域 (上) ではコンダクタンスにスピン依存性は現れないが、有限バイアスにするに従い (中、下)、スピン依存輸送が現れる。パラメータは $T_b = 0.71$, $\phi_{SO} = 0.25\pi$, $T = 0$ 。

をファノ近藤効果が顕著に現れる低温領域において調べた。その結果、(1) 有限バイアス下でスピン依存輸送が生じる (2) 印加するバイアス電圧が大き過ぎるとスピン依存輸送は小さくなる (3) 温度効果は、コンダクタンスのスピン依存性を壊す方向に働く、ということが理論計算より明らかになってきた。(2,3) は有限バイアス及び有限温度が近藤状態を破壊するためと解釈できる。(1)–(3) のため、スピン依存輸送を最大にする最適のバイアス電圧が存在することがわかった。最適なバイアス電圧は、アーム部の伝導率 T_b やラシュバ相互作用の大きさ ϕ_{SO} によるが、おおむね $eV \approx 0.3 \sim 0.7T^*$ の値を取る。

研究業績

< 論文 >

1. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Thermal Symmetry Crossover and Universal

- Behaviors in Carbon Nanotube Dots”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** 083711 (2009).
2. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Universal conductance enhancement and reduction of the two-orbital Kondo effect”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** 054709 (2010).
 3. N. Taniguchi, “Universal and Nonuniversal Dynamical Conductivity in Small Metallic Grains: an Ambivalent Role of T-invariance at Finite Frequency”, to appear in J. Prob. Statistics (2010).

< 著書等 >

1. 新井正男・井上純一・鈴浦秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 (上)」(2009年11月, 吉岡書店).
2. 新井正男・井上純一・鈴浦秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 (中)」(2010年1月, 吉岡書店).

< 学位論文 (修士) >

1. 修士論文: 磯崎健太「量子ドット系のファノ近藤効果と電荷・スピン制御性の理論的研究」(筑波大学大学院数理物質研究科 2010年2月提出).

< 講演 >

1. 小口悠, 谷口伸彦「二重軌道縮退量子ドット系のショットノイズ: 軌道間クーロン相互作用の影響」日本物理学会 2009年秋季大会 (2009年9月, 熊本大学)
2. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Finite-bias effect in quantum transport through capacitively coupled double quantum dots”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2009) (December, 2009 in Hawaii).
3. 谷口伸彦, 磯崎健太「ABリング・ドット系におけるクーロン電子相関と近藤温度の磁束依存性」日本物理学会第65回年次大会 (2010年3月, 岡山大学).
4. 磯崎健太, 谷口伸彦「量子ドット系のファノ近藤効果とスピン操作」日本物理学会第65回年次大会 (2010年3月, 岡山大学).

VII-4. ソフトマター理論

准教授：宮崎州正

受託研究員：藤谷洋平(平成 21 年 9 月 1 日～12 月 31 日)

博士研究員：池田昌司

大学院生：2 名

【1】ガラス転移の平均場描像

(1) 4次元剛体球系のガラス転移(池田, 宮崎) 講演 [1-4, 9]

ガラス転移とは、液体を急冷した際に動力学が劇的に遅くなる現象であるが、現在のところそれが純粋に動的な転移なのか、それとも背後に静的な相転移が存在するのかという最も基本的描像すら確立されていない。現時点で明らかになっていることの一つは、「モード結合理論(MCT)」がガラス転移における広汎な現象を予測しているということである。したがって、このMCTの位置づけを明確にすることは、ガラス転移を理解するために非常に重要な課題だと言える。

MCTはガラス転移の平均場理論と呼ばれているが、そもそもMCTは完全な平均場理論として導出されているわけでもなく、その記述が高次元で良くなることを明確に示した研究すら存在しない。そこでわれわれは、(単成分の)4次元剛体球系のガラス転移をMCTとシミュレーションを用いて詳細に解析した。その結果、4次元系は3次元系に比べよりMCT的であることを明らかにした。ここでは結果の一つとして、シミュレーションとMCTによる密度相関関数の自己部分 $F_s(k, t)$ を図に示す。各々の換算密度 ϵ において、シミュレーションの結果とMCTの結果がほぼ完全に整合していることがわかる。MCTとシミュレーションの比較はこれまででも3次元2成分系などでおこなわれてきたが、ここまでの一致がみられたのは本研究が初めてである。また、動力学の不均一性についても、3次元系と4次元系では顕著な違いがみられた。

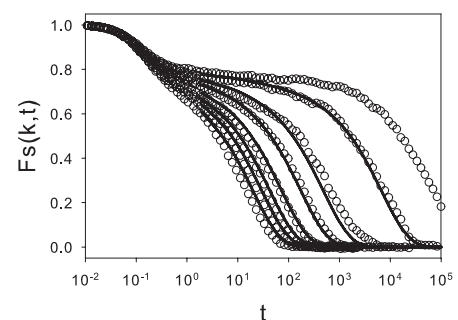


図 1: 各換算密度 $\epsilon = 1 - \varphi/\varphi_c$ での密度相関関数の自己部分 $F_s(k = 8.2, t)$ 。点はシミュレーションの結果であり、実線はMCTの結果。ここで φ は充填率、 φ_c はシミュレーションもしくはMCTにより求められた臨界充填率。

(2) ガラス転移の次元依存性(池田, 宮崎) 講演 [5, 7, 13]

現在まで、ガラス転移の理解のためにたくさんの理論が提案されてきた。それらは、ガラス転移の背後には「理想ガラス転移」なる静的な相転移が存在すると考えるものと、ガラス転移は純粋に動的な転移だととらえるものに大別される。現状では、それらの理論の関係も含めてガラス転移の基本的なシナリオはいまだ明らかではなく、万人が認める平均場描像すら出来上がっていないと言える。

ガラス転移の平均場描像を模索するための有効なアプローチとして、高次元系を調べるのが考えられる。実際ごく最近、ガラス転移の静的な理論である「液体のレプリカ理論」に基づいて高次元剛体球系のガラス転移が調べられている。具

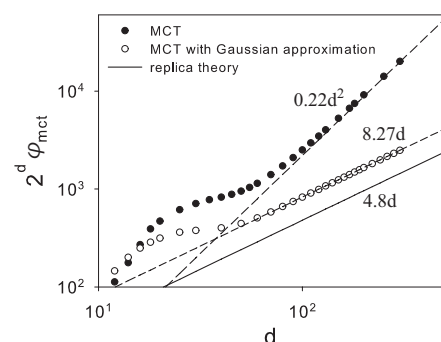


図 2: MCT 臨界密度 φ_{MCT} の次元依存性。直線は d^2 の振る舞いを表す。

体的には $d \rightarrow \infty$ において、理想ガラス転移密度 φ_K が $2^d \varphi_K \propto d \log d$ と振る舞うことや、動的な転移密度 φ_d が $2^d \varphi_d \propto 4.8d$ と振る舞うことなどが予測されている。これらの結果と MCT の予測を比較することは興味深い、高次元での MCT の振る舞いについては、Kirkpatrick らによる先駆的な考察があるものの十分な知見はまだまだ得られていない。

そこで、われわれは d 次元の MCT 方程式を導出し、その振る舞いを系統的に調べた。図は MCT 臨界密度 φ_{MCT} の次元依存性であるが、300 次元程度までは $2^d \varphi_{MCT} \propto d^2$ と振る舞うことがわかる。つまり、レプリカ理論の結果と一致しないのである。このことは、2 つの平均場理論描像の間に整合性が無いことを、初めて示したものである。もともと、レプリカ理論と MCT が相補的な関係にあることが厳密に示されているのは、スピングラス系である。我々は、この相補関係がガラス転移で破綻していることを示すことにより、ガラス転移研究に、新たな課題を提起した。

(3) ジャミング転移とモード結合理論 (宮崎) 講演 [6]

ジャミング転移とは、粉体のような温度がゼロである系において、高密度のために構成粒子の運動が凍結する現象である。ジャミング転移点では、臨界現象を示唆する様々な物理量の特異的な発散が観測されている。ジャミング転移は、ガラス転移の温度ゼロ極限とみなせるだろうか。もしそうならば、なぜガラス転移で見られない臨界的な振る舞いが、ジャミング転移で見られるのだろうか。その疑問に答えることを目的に、我々は、ガラス転移における平均場理論と呼ばれているモード結合理論を、ジャミング系に応用した。この際に、決定的な要素は、理論にインプットとして取り込むべき静的因子である。具体的には、系の配置の情報が埋め込まれている動径分布関数である。我々は、この情報を、同じくガラス転移の平均場理論であり、モード結合理論と相補的な関係にあると言われる熱力学的理論である、レプリカ法から得られた関数を用いた。スケーリング解析と、直接数値解析の結果、ジャミング転移点近傍において、局在長が臨界的に消失すること、そしてその際の臨界指数を求めた。報告されている臨界指数とのズレがあるものの、平均場理論レベルでジャミング転移の臨界指数を計算されたのは初めてのことである。

【2】コロイドガラスとコロイドゲル

(1) コロイド分散系のガラス転移にみられるフラジリティーの変化 (宮崎) 論文 [2]

分子性液体のガラス転移に普遍的に現れる現象の一つに、粘性係数や緩和時間の非アレニウスの温度依存性がある。アレニウス則よりも敏感な温度依存性は、熱力学的な特異点の存在を示唆することから、この非アレニウスの温度依存性の起源の解明は、ガラス転移の本質に関わる最も重要な問題である。非アレニウス性の尺度をフラジリティと呼ぶ。フラジリティが大きい系ほど、隠された特異点に近い振る舞いが観測されると解釈してよい。一方、コロイド分散系は、密度や相互作用を調節することが容易であることから、ガラス転移研究の格好のモデルシステムである。しかし、今までコロイド系でフラジリティの研究がおこなわれることはほとんど無かった。我々は、コロイドガラスの相互作用を調整することにより、フラジリティが変化することを実験により発見した。まず、コロイド粒子の硬さを容易に調節できるハイドロゲルを用いて、緩和時間の密度依存性を系統的に測定した。その結果、コロイドが柔らかいほどアレニウスのになり、逆に剛体球的になるほど、非アレニウスのな密度依存性が見られることがわかった。同時に、コロイドの密度相関関数の緩和を直接、散乱実験により観測した。その結果、非アレニウス性が強いほど、緩和が非指数的になることが明らかになった。一般に、非アレニウス性が強いほど、動的な不均一性が強く、臨界的な共同性が見られ、その結果、緩和のスペクトルが広がると考えられている。従って、二つの実験結果は、同じ物理の起源を持つと考えられる。以上の結果は、フラジリティの起源の理解に一石を投じるものである。

(2) モード結合理論による、ガラス転移の相互作用依存性の解析 (白岩, 池田, 宮崎) 講演 [12]

ガラス転移の特徴は、低温におけるダイナミクスの劇的な凍結である。発散的な緩和時間の増加は、何らかの相転移の存在を示唆している。しかし、分子液体のガラス転移でこの温度依存性の微視的詳細を観測することは極めて難しい。そこで最近注目されているのが、コロイド分散系である。コロイドはサイズが大きく、相互作用の制御が容易であるためである。本研究では、最近の実験報告にヒントを得て、コロイドガラスに見られる遅いダイナミクスの相互作用依存性を理論的に扱うことを目的とする。本研究では、液体積分方程式理論とモード結合理論 (MCT) を用いて、冪的な距離依存性を持つソフトポテンシャル系のダイナミクスを系統的に調べた。MCT は、緩和時間の冪的な発散を定量的に予測することができる。ソフトポテンシャルの形状を系統的に変化させながらこの緩和時間の発散の指数を詳細に調べたところ、ポテンシャルが長距離的になる (つまり柔らかくなる) ほどこの指数が大きくなることを見出した。その指数は、現在まで調べられてきた典型的な液体のそれに比べて二倍程度で、非常に大きい。また、大きな指数は、相関関数の定性的な変化を示唆する。実際、柔らかいポテンシャルに対して相関関数を解析した結果、明確なガラス的な特徴を示さない緩やかな緩和が示された。

(3) コロイド分散系のゲル化におけるスローダイナミクス (宮崎) 論文 [3]

コロイド粒子が、短距離相互作用により凝集し、ネットワーク構造を形成しアモルファス状に凍結した状態を、コロイドゲルと呼ぶ。コロイドゲルの形成過程は、未だ未解決問題が多い。一つの形成過程のシナリオとして、コロイド分散系のスピノーダル分解途中でガラス転移による、高密度成分の凍結がある。このシナリオを検証するために、コロイドと、引力を誘起させるための高分子分散媒の混合系に対する実験と理論的考察を行った。光散乱実験と、共焦点顕微鏡観察、そしてレオロジー実験を用いて、微視的巨視的にコロイド粒子の運動凍結過程を観測し、相分離過程でのガラス転移の検証を行った。さらに、高密度領域の微視的構造とレオロジー実験結果を理論的に解釈することにより、巨視的な弾性の出現が、ガラス転移に起因することを解明した。

(4) 不純物がある系におけるガラス転移と局在転移 (宮崎) 論文 [1]、講演 [8,11]

ランダムに運動が凍結された粒子 (多孔質媒体) 中にあるガラス転移ダイナミクスについて、MD シミュレーションによる解析を行った。固定粒子がないバルク状態で液体相であっても多孔質粒子が増加するとともに構造緩和特性が劇的に緩慢となりガラス相に変化するを示し、また多孔質密度の大小によって中間散乱関数に見られるスローダイナミクスに質的な変化が起こり 2 種類のガラス転移 (A 型と B 型転移) が存在することを示した。2 つのガラス転移の違いは多孔質中での粒子ダイナミクスの変化を反映するものであり、つまりバルクに近い多孔質密度が低いところでは通常のガラス転移で見られる cage 効果が依然として重要であり β 緩和から α 緩和への 2 段階緩和 (B 型転移) を見ることができるが、その一方で多孔質密度が高くなると流動粒子が狭い空間に局在することによって長時間 tail を持つ 1 段階緩和 (A 型転移) が出現することを明らかにしている。さらに非常に高い多孔質密度において可動粒子密度を大きくすると次第に流動性を回復しガラス相から液体相に逆転するリエントラント転移なる新奇現象があることを初めて示した。

<論文>

1. K. Kim, K. Miyazaki, and S. Saito, "Slow dynamics in random media: Crossover from glass to localization transition" *Europhys. Lett.* 88, 36002 (2009).

2. Johan Mattsson, Hans M. Wyss, Alberto Fernandez-Nieves, Kunimasa Miyazaki, Zhibing Hu, David R. Reichman, and David A. Weitz, "Soft colloids make strong glasses" *Nature* 462, 83-86 (2009).
3. J. C. Conrad, H. M. Wyss, V. Trappe, S. Manley, K. Miyazaki, L. J. Kaufman, A. B. Schofield, D. R. Reichman, and D. A. Weitz, "Arrested fluid-fluid phase separation in depletion systems: Implications of the characteristic length on gel formation and rheology" *J. Rheol.* 54, 421-438 (2010).

<講演>

1. 池田昌司, P. Charbonneau, J. A. van Meel, 宮崎州正, 「四次元剛体球系のガラス転移」特定領域「ソフトマター物理」第4回領域研究会, 2009年7月1日-3日, 札幌市, ポスター.
2. Atsushi Ikeda, P. Charbonneau, J. A. van Meel, Kunimasa Miyazaki, "Simulation and Theoretical Study of Glass Transition of 4d Hard Spheres", YKIS 2009 "Frontiers in Nonequilibrium Physics: Fundamental Theory, Glassy & Granular Materials, and Computational Physics", 2009年7月27日-30日, 京都, ポスター.
3. Atsushi Ikeda, P. Charbonneau, J. A. van Meel, Kunimasa Miyazaki, "Simulation and Theoretical Study of Glass Transition of 4d Hard Spheres", Gordon Conference on CHEMISTRY & PHYSICS OF LIQUIDS, 2009年8月2日-7日, アメリカ, ポスター.
4. 池田昌司, P. Charbonneau, J. A. van Meel, 宮崎州正, 「四次元剛体球系のガラス転移」日本物理学会, 28aQL-4, 2009年9月25-28日, 熊本市.
5. 池田昌司, 宮崎州正, 「ガラス転移における次元性」日本物理学会, 28aQL-5, 2009年9月25-28日, 熊本市.
6. 宮崎州正, A. Lefebvre, G. Biroli, D. R. Reichman, 「ジャミング転移点近傍における Debye-Waller 因子」日本物理学会, 28pQL-4, 2009年9月25-28日, 熊本市.
7. 池田昌司, 宮崎州正, 「ガラス転移と次元性」特定領域研究・第3回公開シンポジウム, 2009年11月20-21日, 京都市, ポスター.
8. 金鋼, 齊藤真司, 宮崎州正, 「ランダム媒体拘束系のガラス転移」特定領域研究・第3回公開シンポジウム, 2009年11月20-21日, 京都市, ポスター.
9. A. Ikeda, P. Charbonneau, J. van Meel, and K. Miyazaki, "Glass transition and dimensionality", SCHOOL ON GLASS FORMERS AND GLASSES, 2010年1月4日-1月20日, Bangalore, India, ポスター.
10. K. Miyazaki, "Inhomogeneous mode coupling theory and Dynamical heterogeneities", SCHOOL ON GLASS FORMERS AND GLASSES, 2010年1月4日-1月20日, Bangalore, India, 招待講演.
11. K Kim, S. Saito, and K. Miyazaki, "Slow dynamics in random media: Crossover from glass to localization transition" The 4th international workshop on "Dynamics in Confinement", Institut Laue Langevin, Grenoble, France, 3-5 March, 2010, ポスター.
12. 白岩智, 池田昌司, 宮崎州正, 「コロイド系の遅いダイナミクスの相互作用依存性」日本物理学会 2010年春季大会, 2010年3月20-23日, 岡山
13. 池田昌司, 宮崎州正, 「高次元空間におけるガラス転移」日本物理学会 2010年春季大会, 2010年3月20-23日, 岡山

<社会還元等>

1. 宮崎州正, 日本物理学会・学会誌編集委員

<学位論文(修士)>

1. 白岩智, 「コロイド分散系のガラス転移」

<外部資金>

1. 科学研究費 特定領域研究「非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコピック系の構造とダイナミクス」(公募研究)(平成21年度~平成22年度、研究代表者:宮崎州正) 課題番号: 21015001 「コロイド系のガラス転移と非線形レオロジー」(研究代表者:宮崎州正)(平成21年度 1,900千円)
2. 科学研究費 基盤研究(C)(平成21年度~平成23年度、研究代表者:宮崎州正) 課題番号: 21540416 「過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性」(研究代表者:宮崎州正)(平成21年度 1820千円)

<集中講義>

1. 宮崎州正, 関西学院大学大学院, 「ガラス転移の物理学」2009年8月27日-28日
2. 宮崎州正, 東京大学教養学部基礎科学科; 大学院総合文化研究科関連基礎科学系, 「ガラスの物理」2009年12月18日,21日,25日

<その他>

1. 宮崎州正, YKIS 2009 “Frontiers in Nonequilibrium Physics: Fundamental Theory, Glassy & Granular Materials, and Computational Physics” at Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (2009年7月21日-8月21日, 京都) 組織委員.
2. 宮崎州正, 物性若手夏の学校, サブゼミ講師「分子の世界の渋滞学-ガラス転移の物理学」2009年8月22日-8月23日, 志賀高原.
3. 宮崎州正, 第3回ソフトマター物理若手勉強会講師「ガラスの物理」2009年9月2日-9月4日, つくば.
4. 宮崎州正, 第3回ソフトマター物理若手勉強会 (2009年9月2日-9月4日, つくば) 組織委員.

VII-5 半導体ナノ物性グループ

教授 白石賢二
客員教授 押山淳
助教 岩田潤一
大学院生 6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21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

[論文[1-5]、講演[1,2,4,5]]

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) の開発を行った。コード開発と平行して、実際に10000原子を越えるSiナノワイヤー系に対する電子構造計算、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。

[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) 書き込み／消去耐性が強いMONOS型メモリの設計指針の提案 [論文[9]、講演[7, 20, 24, 33, 34]]

MONOS型メモリでは、原子レベルの空間である窒化シリコン膜中の欠陥に電荷を注入することによってメモリ機能を発現させているため、その小型化・高速化が可能となることから、次世代メモリの候補として期待されている。しかし、原子レベルの欠陥に電荷(データ)を充電(放電)してデータの書込(消去)を行う際に窒化シリコン膜中の欠陥がどのような振る舞いをするかは全く不明であった。上述の問題

を解決するために、第一原理計算を用いて原子レベルでMONOS型メモリにおける窒化シリコン中の欠陥がデータの書込・消去（電荷の充電と放電）に対してどのように振る舞うかを原子レベルで詳細に明らかにした(K. Yamaguchi 他 IEDM 2009)。得られた結果は以下の通りである。①窒化シリコン中に酸素が混入することによって生じた欠陥はデータの書込・消去によって構造が元に戻らなくなる傾向があること(不可逆的構造変化を起こす傾向があること)を示す(図1)。②一方、窒化シリコン中の窒素空孔を起因とする欠陥はデータの書込・消去を行っても構造が元に戻る。これは、①酸素混入欠陥はメモリ機能の劣化を引き起こすのに対し、②窒素空孔欠陥はメモリ機能の劣化を引き起こさないことを意味する。さらに、窒素空孔欠陥がデータの書込・消去によって引き起こす構造変化はヤン・テラー効果に伴う自発的対称性の破れであるため、原理的に可逆的であることも示した。

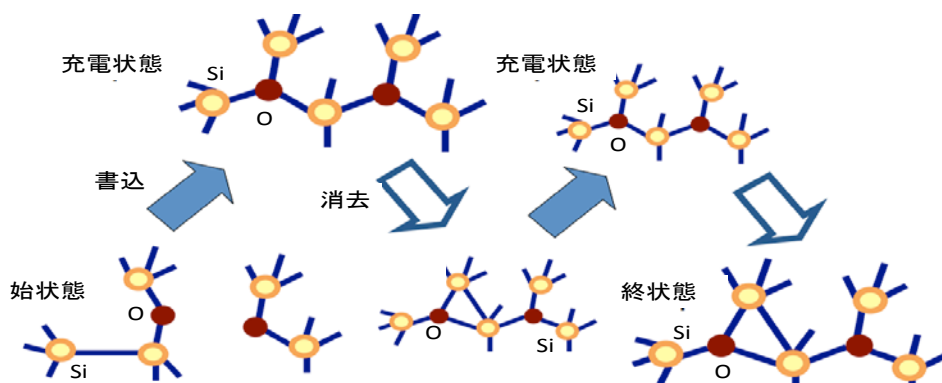


図 1: SiN 中欠陥の書込/消去による大きな構造変化。

2) 窒化物半導体における擬立方晶近似の妥当性の理論的研究[講演[38]]

窒化物半導体をベースにした光デバイスは擬立方晶近似を用いて設計されることが多い。本研究では第一原理量子論によって擬立方晶近似の妥当性について議論した。その結果、ウルツ鉱構造の窒化物半導体においては擬立方晶近似が大きく破綻することが示された。

3) 次元の異なるナノ構造間のトンネル現象の新しい物理描像の開拓[論文[4, 5]、講演[3, 9, 11, 13, 31, 39]]

デバイスサイズ縮小は、デバイスを駆動するための電子数の減少も同時にもたらす。これらの事柄は、集積回路を構成するデバイスの性能・安定性を少数個の電子による駆動によって保つという、大きな課題が生じつつあることを意味している。言いかえると、数個の電子で駆動される将来のナノスケールデバイスにおいては個々の電子の動力学を踏まえた少数個の電子の精密制御技術が要求される。この課題はポストスケールリング時代の最大の課題の一つとなると考えられる。本研究では当該課題を考える上で重要となる「ナノ領域における動的電子物性の特徴」を理論実験両面から検討した。具体的には、将来のデバイスにあらわれる諸問題を内包した系として、Siナノドットフローティングゲート構造への電子注入過程を実験、理論両面から検討した。この系においては電子がMOS構造の反転層から、絶縁膜を介したトンネルによりナノサイズのSiナノドットへ注入され、2次元電子ガス-量子ドット結合系と考えられるが、この系におけるトンネルを考えてみる。2次元電子ガスの波動関数が広がっているときには、0次元系の

量子ドットへのトンネルは起こりにくいですが、2次元電子ガスが量子ドット直下で局在したときにはじめて、トンネルが可能となる(図2)。我々は2次元電子ガスからSiナノドットへの電子注入が、従来はないとされてきた直接トンネル領域で温度依存を示すことを見出した(図3、Y. Sakurai 他 JJAP 2010 等)。この特異な温度依存性を理解するには現時点では以下のような「大胆な仮定」が必要となっている。我々が現在用いている大胆な仮定とは以下の通りである。「十分量子ドットの真下で局在し、あるしきい値以上のトンネル確率をもつ波動関数だけが直接トンネルに寄与する」。上記のようなトンネル確率の下限が存在するという仮定がなぜ必要となるかは今後の課題であるが、トンネル確率の下限は実験における電圧の掃引レートに依存することが実験的に示されている。今後は、上記「トンネル確率の下限」の物理的起

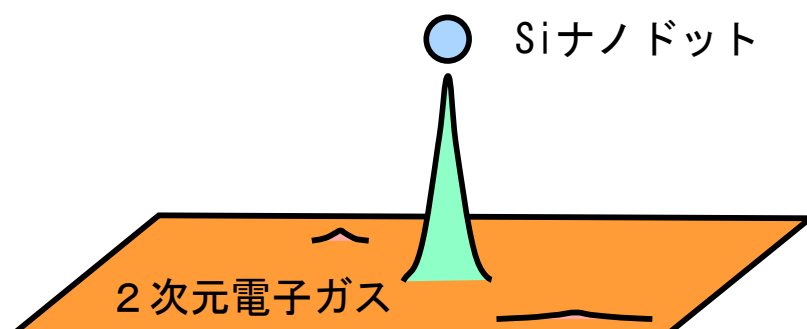


図2: 電子ガスから量子ドットへの電荷注入の模式図。ドットの真下に局在するとトンネルできる。

源を電子ダイナミクスによって明らかにすると同時に、当該物理的起源がポストスケール時代に使われる電子デバイスにどのような要求をするか考察する予定である。

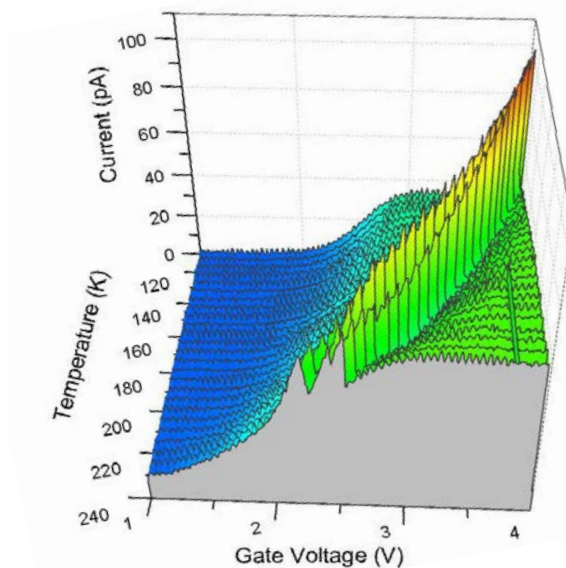


図3: 2次元電子ガス-量子ドット結合系における変位電流の温度依存性。

4) オーミック接触の新しい物理モデルの提案 [講演[32, 36]]

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ング現象が起こるため、ショットキー障壁高さの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 4)を提案した。このモデルでは、ショットキー障壁の広い範囲のエネルギー領域に多数の欠陥レベルが存在しており、電子はこの欠陥レベルを介した共鳴トンネルによる伝導によってオーミック接触が達成されていると考えている。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。

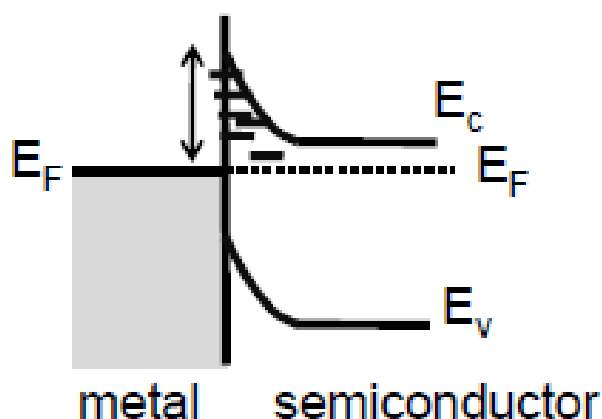


図 4 : 本研究で提案した新たなオーミック接触のモデル

5) ナノスタック構造界面制御手法の提案 [論文[7, 8], 講演[4-6, 19, 21]]

MOS 半導体デバイスのように、金属/絶縁体/半導体のような 3 種類の物質が積層構造を作っており、中間に存在する絶縁体の膜厚がナノスケールになってくると、二つの界面を別個に考えるわけにはいかないことを我々が提案していたが、当該積層構造を制御する方法を理論的に提案した。第一が Ce 酸化物に代表される Multivalent 酸化物の利用、第二が炭素等のヘテロ元素の次世代絶縁膜への導入による界面熱力学の設計である。2つの手法とも実験的にその有効性が確認された。

<論文>

1. J.-I. Iwata, D. Takahashi, A. Oshiyama, T. Boku, K. Shiraishi, S. Okada, K. Yabana, “A Massively-parallel electronic-structure calculations based on real-space density-functional theory”, J. Comp. Phys. 229, 2339 (2010).
2. J.-I. Iwata, “First-Principles Calculation for Extremely Large Systems by Parallel Computations Based on the Order- N^3 Real-Space Density-Functional Theory”, Journal of Computational Theoretical Nanoscience 6, 2514 (2009).
3. J.-I. Iwata, A. Oshiyama, K. Shiraishi, “Large-Scale First-Principles Electronic Structure Calculations for Nano-Meter Size Si Quantum Dots”, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 8, 48 (2010)
4. Y. Sakurai, J. Iwata, M. Muraguchi, Y. Shigeta, Y. Takada, S. Nomura, T. Endoh, S.-I. Saito, K. Shiraishi, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, “Temperature Dependence of Electron Tunneling between Two Dimensional Electron Gas and Si Quantum Dots”, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 014001 (2010).
5. Y. Sakurai, S. Nomura, Y. Takada, J. Iwata, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, T. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, “Anomalous temperature dependence of electron tunneling between a two-dimensional electron gas and Si dots”, Physica E, 42, 918 (2010)
6. K. Yamaguchi, A. Otake, K. Kobayashi, and K. Shiraishi, “Atomistic origin of high-quality "novel SiON gate dielectrics"”, MICROELECTRONIC ENGINEERING, 86: 1680-1682 (2009)
7. K. Shiraishi, “Theoretical models for work function control”, MICROELECTRONIC ENGINEERING, 86: 1733-1736 (2009) (Invited Paper).
8. N. Umezawa, K. Shiraishi, and T. Chikyow, “Stability of Si impurity in high-kappa oxides”, MICROELECTRONIC ENGINEERING, 86: 1780-1781 (2009)
9. A. Otake, A. K. Yamaguchi, K. Kobayashi, and K. 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)
10. T. Obata, J.-I. Iwata, K. Shiraishi, and A. Oshiyama, “First principles studies on In-related nitride semiconductors”, JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, 311: 2772-2775 (2009)
11. Y. Kangawa, T. Akiyama, T. Ito, K. Shiraishi, K. Kakimoto, “Theoretical approach to structural stability of c-GaN: How to grow cubic GaN”, JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, 311: 3106-3109 (2009)

<講演>

1. 招待講演 国際会議

1. K. Shiraishi, “Physics for Si nanowire FET and its fabrication”, PICE International Symposium on

- Silicon Nano Devices in 2030: Prospects by World's Leading Scientists, October 13-14, 2009, Tokyo, Japan.
2. K. Shiraishi, "Physics of Nano-Interfaces and Nano-Structures for Future Si Nano-Devices", 216th Meeting of Electrochemical Society, October 4-9, 2009, Vienna, Austria.
 3. S. Nomura, Y. Sakurai, Y. Takada, K. Shiraishi, M. Muraguchi, T. Endoh, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, "Physics of Nano-contact between Si Quantum Dots and Inversion Layer", 216th Meeting of Electrochemical Society, October 4-9, 2009, Vienna, Austria.
 4. K. Shiraishi, "Physics of Nano-Interfaces and Nano-Structures for Future Si Nano-Devices", 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, September 21-25, 2009, Granada, Spain.
 5. K. Shiraishi, "Guiding Principles toward Future Gate Stacks Given by the Construction of New Physical Concepts", 2009 Symposium on VLSI Technologies, June 15-17, 2009, Kyoto, Japan.
 6. K. Shiraishi, "Theoretical models for work function control", 16th biannual conference of Insulating Films on Semiconductors, June 29- July 1, 2009, Cambridge, UK
 7. K. Shiraishi, K. Yamaguchi, A. Otake, and K. Kobayashi, "Atomistic Studies for MONOS-Type Charge Trap Memories. -A Theoretical Guiding Principles for High Program/Erase Endurance", The 15th International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices, Dec.15-19, New Delhi, India
 8. K. Shiraishi, "Nano Device Design by Theoretical Approach", 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials, Short Course, "From Basic Theory to Newest Application in MOS Devices", Oct. 6, 2009, Sendai, Japan.

国内学会

9. 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?」、2009年春季第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、つくば市 2009年3月30日-4月2日
10. 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」、2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会シンポジウム、「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」、筑波大学、つくば市 2009年3月30日-4月2日
11. 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-」、2009年春季第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、つくば市、2009年3月30日-4月2日
12. 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」2009年春季第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、つくば市、2009年3月30日-4月2日

13. 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」、2009年春季第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、つくば市、2009年3月30日 -4月2日
14. 白石賢二「Si ナノワイヤのバンド構造解析」、2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会シンポジウム、「2020-30年代のナノエレクトロニクスデバイスの本命を考える」東海大学、秦野、2010年3月17日-20日
15. 白石賢二「イオン性と共有結合性が織りなす新しい材料科学の世界-High-k ゲートスタックを振り返って」、2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会シンポジウム、「High-k ゲートスタック研究を振り返り次のステップへ」、富山大学、富山、2009年9月8日-11日
16. K. Shiraishi, K. Kamiya, M. Tateno, M. Boero, A. Oshiyama, "First principles studies on the proton transfer mechanism in cytochrome *c*/ oxidase", 第47回日本生物物理学会年会シンポジウム "Elucidation of Protein Functions at the Atomic Level with X-ray structural, Vibrational spectroscopic, Molecular biological and Theoretical analyses", Oct.31-Nov.1, 2009, Tokushima, Japan.

2. 一般講演

17. Jun-ichi Iwata, Atsushi Oshiyama, Kenji Shiraishi, "Large-scale first-principles electronic structure calculations for nano-meter size Si quantum dots", 10th International Conference on Atomically Controlled Surface, Interfaces, and Nanostructures, Sep.21-25, 2009, Granada, Spain
18. K.Yamaguchi, A Otake, K Kobayashi and K Shiraishi, "Atomistic Origin of High-Quality, "Novel SiON Gate Dielectrics", 16th biannual conference of Insulating Films on Semiconductors, June 29- July 1, 2009, Cambridge, UK
19. N. Umezawa, K. Shiraishi, T. Chikyow, "Stability of silicon impurity in high-k oxides", 16th biannual conference of Insulating Films on Semiconductors, June 29- July 1, 2009, Cambridge, UK
20. A. Otake, K. Yamaguchi, K. Kobayashi and K/ Shiraishi, "Theoretical Studies on the Charge Trap Mechanism of MONOS-Type Memories -Relationship between Atomistic Information and Program/Erase Actions", 16th biannual conference of Insulating Films on Semiconductors, June 29- July 1, 2009, Cambridge, UK
21. M. Kouda, N. Umezawa, K. Kakushima, P. Ahmet, K. Shiraishi, T. Chikyow, K. Yamada and H. Iwai "Charged defects reduction in gate insulator with multivalent materials", 2009 Symposium on VLSI Technologies, June 15-17, 2009, Kyoto, Japan.
22. R. Hasunuma, C. Tamura, T. Nomura, Y. Kikuchi, K. Ohmori, M. Sato, A. Uedono, T. Chikyow, K. Shiraishi, K. Yamada, and K. Yamabe, "Reversible and Irreversible Degradation Attributing to Oxygen Vacancy in HfSiON Gate Films during Electrical Stress Application", 2009 International Electron Devices Meetings, Dec. 7-9 Baltimore, USA.
23. M.Sato, S.Kamiyama, Y.Sugita, T.Matsuki, T.Morooka, T. Suzuki, K.Shiraishi, K. Yamabe, K.

- Ohmori, K. Yamada, J. Yugami, K. Ikeda, and Y. Ohji, "Negatively Charged Deep Level Defects Generated by Yttrium and Lanthanum Incorporation into HfO₂ for V_{th} adjustment, and the Impact on TDDB, PBTI and 1/f noise", 2009 International Electron Devices Meetings, Dec. 7-9 Baltimore, USA.
24. K. Yamaguchi, A. Otake, K. Kobayashi, and K. Shiraishi, "Atomistic Guiding Principles for MONOS-Type Memories with High Program/Erase Cycle Endurance", 2009 International Electron Devices Meetings, Dec. 7-9 Baltimore, USA.
25. J.-I. Iwata, K. Shiraishi, A. Oshiyama, "First-principles calculations for Si nanowires in nanometer diameters", International Symposium Silicon Nano Device 2030, 2009.10.13-14 Tokyo
26. J.-I. Iwata, "Density-Functional Simulation", Edinburgh-Tsukuba Computational Science Workshop, 2010.2.22-23 Edinburgh University
27. Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, "TDDFT Simulation for Electron-Phonon Dynamics in Dielectrics under Ultra short Laser Pulse", The 3rd Theory Meets Industry International Workshop, 2009.11.11-13 名古屋国際センター
28. Y. Futamura, H. Tadano, T. Sakurai, J.-I. Iwata, "Scalable Parallel Algorithm for Electronic Structure Calculations by Band Localization", International Symposium of Electronic Structure Calculations, 2009.12.7-9 東大弥生講堂一条ホール
29. Y. Futamura, H. Tadano, T. Sakurai, J.-I. Iwata, "Scalable Eigensolver for Electronic Structure Calculations on Hierarchical Parallel Computers", SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, 2010.2.24-26 Grand Hyatt Seattle, Seattle, Washington
30. 李 映勳, 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 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、つくば市 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日
31. 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 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、つくば市 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日
32. 高田幸宏, 村口正和, 遠藤哲郎, 野村晋太郎, 白石賢二、「将来のナノコンタクトを目指したオーミック接触の再考」、2010 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、2009 年 9 月 8 日-11 日
33. 山口慶太, 大竹 朗, 小林賢司, 白石賢二、「MONOS 型メモリの書き込み／消去の繰り返しに対する電子・原子構造の振る舞い」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日
34. 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における水素混入効果の理論的検討」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日
35. 吉崎智浩, 白石賢二, 梅澤直人、「光励起による La 原子の Multi-Valence 化の理論的検討」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日

- 36.高田幸宏、村口正和、遠藤哲郎、野村晋太郎、白石賢二、「将来のナノスケールコンタクトを目指した新しいオーミックコンタクトモデルの考察」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日
- 37.李 映勲、角嶋邦之、白石賢二、名取研二、岩井 洋、「バリスティックSiナノワイヤトランジスタの電気特性の直径依存性」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日
- 38.海老原康裕、白石賢二、山口敦史、「窒化物半導体のバンド構造の歪み依存性の理論的研究」、2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学、秦野市 2010 年 3 月 17 日-3 月 20 日
39. 村口正和、高田幸宏、櫻井蓉子、野村晋太郎、白石賢二、牧原克典、池田弥央、宮崎誠一、重田育照、遠藤哲郎、「2次元電子ガスー量子ドット界面における電子トンネル過程に対する微視的考察」、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、岡山市、2010 年 3 月 20 日-3 月 23 日
40. 岩田潤一、白石賢二、押山淳、「数 nm 直径 Si ナノワイヤに対する大規模第一原理電子状態計算」、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、岡山市、2010 年 3 月 20 日-3 月 23 日
- 41.櫻井蓉子、高田幸宏、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、「光励起下における電子ガスー量子ドット結合系の C-V 特性と I-V 特性」、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学、神戸市、2009 年 9 月 20 日-23 日
42. 岩田潤一、「Large-Scale first-principles studies on Si nano dots」、第 5 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、2009.5.14 筑波大学
43. 篠原康、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁、「実時間・実空間法による固体ダイナミクスの第一原理シミュレーション」、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009.9.25-28 熊本大学黒髪キャンパス
44. 二村保徳、多田野寛人、櫻井鉄也、岩田潤一、「バンド局所化による電子状態計算の高性能並列アルゴリズム」、応用数理学会 2009 若手優秀講演賞、2009.9.28-30 大阪大学豊中キャンパス
45. 岩田潤一、「超並列大規模第一原理電子状態計算用コード RSDFT の開発と応用」、特異値・固有値合同ワークショップ、2009.11.21-22 筑波国際会議場
46. 岩田潤一、「実空間密度汎関数法コード RSDFT の開発と応用」、物性研短期研究会、2009.12.10-11 東京大学物性研究所
47. 篠原康、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁、「第一原理計算によるコヒーレントフォノン生成機構の解明」、第 70 回応用物理学会学術講演会、2009.9.8-11 富山大学
48. 岩田潤一、「実空間密度汎関数コード (RSDFT) の開発と応用」、次世代情報機能・材料分野公開研究会「新物質とエネルギー」、2010.3.10-11 東京国際フォーラム

＜学位論文（修士）＞

- 1) 大竹朗 「窒化シリコン膜中の電荷トラップ欠陥に異種元素が与える影響の理論的研究」
- 2) 小池美知太郎 「二酸化シリコン膜中の酸素空孔欠陥の第一原理計算による考察」

<受賞>

1. Best Poster Award、岩田潤一、“First-principles calculations for Si nanowires in nanometer diameters”, J.-I. Iwata, K. Shiraishi, A. Oshiyama, International Symposium Silicon Nano Device 2030, 2009.10.13-14 Tokyo
2. IEEE Japan Chapter Student Award, 山口慶太、“Atomistic Guiding Principles for MONOS-Type Memories with High Program/Erase Cycle Endurance”

VII—6 ナノ構造物性グループ

准教授 岡田 晋

研究員 高木祥光

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

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

研究成果

[1] グラフェンの層間相互作用による電子状態変調[文献 19,21]

グラファイトの電子状態は構成単位であるグラフェン間の相互作用により、わずかに変調されていることが知られている。すなわち、グラフェンの線形バンドがグラファイトにおいて通常の放物線的なバンド分散を有するようになる。ここでは、自然界に 10%程度存在する菱面体晶グラファイト(ABC 積層構造グラファイト)の薄膜が基底状態として、その最外層グラフェン面においてフェリ磁性状態が実現されことを明らかにした[図 1]。この磁性状態の起源はグラフェンナノリボンにおいて生じる特異な端局在状態であるエッジ状態と等価な状態が菱面体晶グラファイトの表面に於いて生じることによる物である。この結果は、これまで sp^2 炭素ネットワークへの端、欠陥の導入がグラファイトにおける磁性発現の必須条件と考えられていたが、完全な sp^2 ネットワークを有するグラファイトにおいても磁性状態が発現することを初めて理論的に予言した。今後は外場による磁性状態の制御も含めて、スピンドバイスへの応用研究へと繋がる事が期待される。

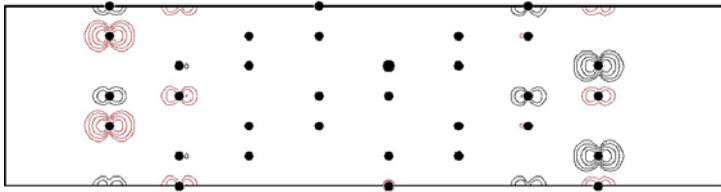


図 1: 菱面体晶グラファイト薄膜表面におけるフェリ磁性状態の分極スピン分布

一方、グラフェンから誘起される新たな構造として折り畳まれたグラフェンは自身との複合構造体として、新たなカテゴリーのグラフェン複合構造体とみなされる。この構造は、数層グラフェンの端において、各層の端間に新たな結合を形成することにより容易に実現される構造であり、グラフェンナノ構造を用いたデバイスにおいても必然的な構造である。我々は図 2 に示す折り畳まれたグラフェンに対する強結合近似計算から、この構造の有する電子物性がもはや孤立グラフェンと大きく異なる新奇 π 電子系となることを明らかにした。すなわち、自身の π 電子との相互作用により、その面間の相対配向に応じて金属—半導体の転移を示し、また金属的な場合、そのフェルミレベル近傍の電子系は通常の金属と同様の性質を有することが明らかになった。

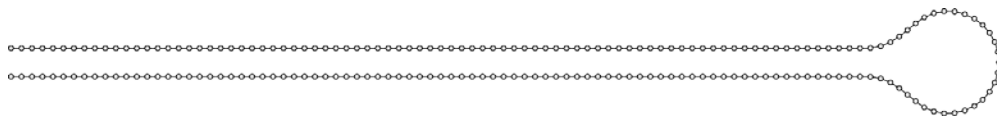


図 2: 折り畳まれたグラフェンの構造

[2] 絶縁体基板によるグラフェン電子構造変調[文献 15]

グラフェン・グラファイトデバイスにおいて、基板、とりわけ絶縁体基板との複合構造は本質である。しかしながら、これまで絶縁体基板のグラフェンの電子上に及ぼす影響は注目されていなかった。そこで、我々は、平滑な 2 次元構造を有する六方晶窒化ホウ素 (h-BN) シートを用いて絶縁体基板をモデル化し、その上にグラフェンを吸着させることによりグラフェンのフェルミレベル近傍の電子状態がどのように変調されるかを調べた。その結果、グラフェンの線形バンドは、グラフェンと基板の間の相互作用が 10meV 程度のオーダーであっても、もはや安定ではなく、ギャップを形成することを示した。形成されるギャップの大きさは、基板の h-BN に対するグラフェンの相対配向に強く依存し、20meV~100meV のオーダーとなる[図 3]。これは、基板が異種原子からなるイオン性を有することにより、基板内での電荷分布の偏りが生じ、この偏りによって、グラフェン上の原子の局所ポテンシャル変調が誘起されるためである。ここでは、基板の原子配列とグラフェンの原子配列の間に結晶整合性を課しているが、現実のアモルファス酸化物絶縁体基板の場合は、グラフェンのポテンシャル変調が空間的にランダムに誘起され、結果として基板上のグラフェンは、有限のフェルミレベル状態密度を有する通常の金属的性質が予想される。

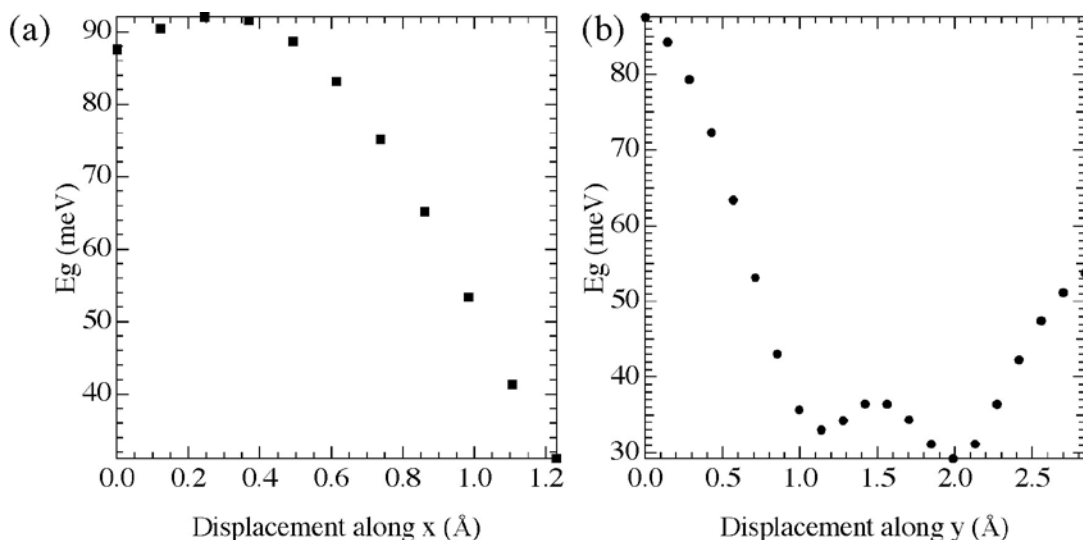


図3: h-BN 上のグラフェンのバンドギャップの(a)x 軸方向の相対配向、(b) y 軸方向の距離依存性

[3] 吸着原子がグラファイト電子状態に及ぼす影響[文献 13]

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

まとめ

我々は量子論に立脚した計算科学の手法を基に、種々のグラフェン・グラファイトの複合構造体の物性の解明を行った。その結果、グラフェンの最大の特徴であるフェルミレベルにおける線形バンドは複合構造形成時に生じる異種物質ならびに自身との相互作用に対して脆弱であることを示した。この結果は、この線形バンドが生み出す、非常に高速な電子系を用いたグラフェンデバイス実現が非常に困難であることを示唆しており、界面構造、複合構造のもう一段踏み込んだチューニングがデバイス応用には必須であることが予想される。他方、複合構造形成/制御により、グラフェン・グラファイトは、孤立系からは想像できない新たな電子物性を示す可能性があることも同時に明らかになった。

発表論文

1. Shingo Okubo, Toshiya Okazaki, Naoki Kishi, Takeshi Nakanishi, Susumu Okada and Sumio Iijima, "Diameter-Dependent Band Gap Modification of Single-Walled Carbon Nanotubes by Encapsulated Fullerenes" *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 113, 571 - 575 (2009).
2. Keisuke Sawada, Fumiyuki Ishii, Mineo Saito, Takazumi Kawai, and Susumu Okada, "Phase Control of Graphene Nanoribbon by Means of Carrier Doping: Antiferromagnetic, Noncollinear-Magnetic, and Ferromagnetic Phases", *Nano Letters*, Vol. 9 (1), pp 269--272 (2009).
3. Kazuyuki Uchida and Susumu Okada, "Electronic Structure of Carbon Nanotubes in Field-Effect Transistor: A First-Principle Study", *Physical Review B* Vol. 79, art. no. 085402 (2009).
4. Dam Hieu Chi, Nguyen Thanh Cuong, Ayumu Sugiyama, Taisuke Ozaki, Akihiko Fujiwara, Tadaoki Mitani, and Susumu Okada, "Adsorption and diffusion of Pt atoms on single-walled carbon nanotubes", *Physical Review B* Vol. 79, art. no. 115426 (2009).
5. Susumu Okada and Toshio Kobayashi, "Electronic Properties of Graphite with Rotational Stacking Arrangement", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, art. no. 050207 (2009).
6. Susumu Okada, "Electronic Structures and Energetics of Semiconducting Carbon Nanotubes Absorbed on SiO₂ Surfaces", *Chemical Physics Letters*, Vol. 474, pp. 302 - 306 (2009).
7. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Theoretical calculation for the ultraviolet optical properties of single-walled carbon nanotubes", *Physical Review B* Vol. 79, art. no. 233406 (2009).
8. Takazumi Kawai, Susumu Okada, Yoshiyuki Miyamoto, and Hidefumi Hiura, "Self-redirection of tearing edges in graphene: Tight-binding molecular dynamics simulations", *Physical Review B* Vol. 80, art. no. 033401 (2009).
9. Soon-Kil Jung, Toshiya Okazaki, Naoki Kishi, Susumu Okada, Shunji Bandow, and Sumio Iijima, "Effect of Fullerene Encapsulation on Radial Breathing Mode Frequencies of Single-Wall Carbon Nanotubes", *Physical Review Letters*, Vol. 103, art. no. 027403 (2009).
10. Susumu Okada, "Atomic configurations and energetics of vacancies in hexagonal boron nitride: First-principles total-energy calculations", *Physical Review B* Vol. 80, art. no.

- 161404(R) (2009).
11. Minoru Otani, Susumu Okada, and Yasuharu Okamoto, "Intrinsic Dipole Moment on the Capped Carbon Nanotubes", *Physical Review B* Vol. 80, art. no. 153413 (2009).
 12. Susumu Okada, "Formation of Graphene Nanostructures on Diamond Nanowire Surfaces", *Chemical Physics Letters*, Vol. 483, pp. 128--132 (2009).
 13. Takahiro Kondo, Yosuke Iwasaki, Yujiro Honma, Yoshiteru Takagi, Susumu Okada, and Junji Nakamura, "Formation of non-bonding π electronic states of graphite due to Pt-C hybridization", *Physical Review B* Vol. 80, art. no. 233408 (2009).
 14. Jun-Ichi Iwata, Daisuke Takahashi, Atsushi Oshiyama, Taisuke Boku, Kenji Shiraishi, Susumu Okada, and Kazuhiro Yabana, "Massively-parallel electronic-structure calculations based on the real-space density-functional theory", *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, pp. 2339-2363 (2010).
 15. Susumu Okada, "Semiconducting Electronic Structure of Graphene Adsorbed on Insulating Substrate: Fragility of the Graphene Linear Dispersion Band", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, art. no. 020204 (2010).
 16. Kazuhiro Yanagi, Yasumitsu Miyata, Zheng Liu, Kazu Suenaga, Susumu Okada, and Hiromichi Kataura, "Influence of metallic or semiconducting nanotube walls on encapsulated π -conjugated molecules", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, pp. 2524-2530 (2010).
 17. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Optical Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes in Ultra-Violet Region", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, art. no. 02BB01 (2010).
 18. Susumu Okada, Yoshiteru Takagi, and Takazumi Kawai, "Formation of Multi-Walled Nanotubes from Diamond Nanowires", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, art. no. 02BB02 (2010).
 19. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Electronic Structure Modulation of Folded Graphene", *Journal of Physical Society of Japan*, Vol. 79, art. no. 033702 (2010).
 20. Katsunori Wakabayash, Ryutaro Tomita, Yuhei Natsume, and Susumu Okada, "Edge states and flat bands of graphene nanoribbons with edge modification", *Journal of Physical Society of Japan*, Vol. 79, art. no. 034706 (2010).
 21. Minoru Otani, Mikito Koshino, Yoshiteru Takagi, and Susumu Okada, "Intrinsic Magnetic Moment on (0001) Surfaces of Rhombohedral Graphite", *Physical Review B*, Vol. 81, art. no. 161403(R) (2010).

国際会議発表

1. Susumu Okada, "Formation of Multi-walled Nanotubes from Diamond Nanowires", International Symposium on Carbon Nanotube Nanoelectronics (CNTNE2009), June 9 -- 12, 2009, Taikanso, Matsushima.
2. Yoshiteru Takagi and Susumu Okada, "Optical Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes in Ultra-Violet Region", International Symposium on Carbon Nanotube Nanoelectronics (CNTNE2009), June 9 -- 12, 2009, Taikanso, Matsushima.
3. Minoru Otani, Susumu Okada, Yasuharu Okamoto, "A novel mechanism for the electron polarization on capped carbon nanotube", International Symposium on Carbon Nanotube Nanoelectronics (CNTNE2009), June 9 -- 12, 2009, Taikanso, Matsushima.
4. Michiko Tanaka, Takazumi Kawai and Susumu Okada, "Electronic Structure of Oxygen Molecules Encapsulated in Carbon Nanotubes", International Symposium on Carbon Nanotube Nanoelectronics (CNTNE2009), June 9 -- 12, 2009, Taikanso, Matsushima.

国内会議発表

1. 岡田晋, "コロネン内包ナノチューブのエネルギ論と電子構造", フラーレン・ナノチューブ学会, 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(つくば市, エポカルつくば), 2009 年 9 月 1 日--3 日
2. S.-K. Jeong, 岡崎俊也, 岡田晋, 飯島澄男, "共鳴ラマン分光による単層カーボンナノチューブと内包ナノチューブ間のホスト-ゲスト相互作用の直径依存性", フラーレン・ナノチューブ学会, 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(つくば市, エポカルつくば), 2009 年 9 月 1 日--3 日
3. 高木祥光, 岡田晋, "折り畳まれたグラフェンの電子状態", フラーレン・ナノチューブ学会, 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(つくば市, エポカルつくば), 2009 年 9 月 1 日--3 日
4. 岡田晋, "h-BN 中の多原子空孔の安定性と構造", フラーレン・ナノチューブ学会, 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(つくば市, エポカルつくば), 2009 年 9 月 1 日--3 日
5. 高木祥光, 岡田晋, "金属表面上の単層カーボンナノチューブの第一原理計算", フ

- ラーレン・ナノチューブ学会, 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(つくば市,エポカルつくば),2009 年 9 月 1 日--3 日
6. 岡田晋, ``コロネン内包ナノチューブの電子構造", 日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本,熊本大学),2009 年 9 月 25 日--28 日
 7. 高木祥光, 岡田晋, ``Pt 吸着によるグラフェン上のエッジ状態", 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本,熊本大学),2009 年 9 月 25 日--28 日
 8. 高木祥光, 岡田晋, ``折り畳まれたグラフェンの電子構造", 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本,熊本大学),2009 年 9 月 25 日--28 日
 9. 大谷実, 岡田晋, ``ゲートによるグラファイトへの等方的キャリア注入", 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本,熊本大学),2009 年 9 月 25 日--28 日
 10. 大谷 実, 越野 幹人, 高木祥光, 岡田 晋, ``電場によるグラファイト薄膜の磁性制御", 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(名城大学, 名古屋市)2010 年 3 月
 11. 高木祥光、岡田晋, ``アルミニウムクラスター吸着による単層カーボンナノチューブの E11、E22 バンドギャップ変調",第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム (名城大学, 名古屋市)2010 年 3 月
 12. 岡田晋、大谷実, ``ポタシウムドープ六方晶窒化ホウ素", 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム (名城大学, 名古屋市)2010 年 3 月
 13. 千葉奨、岡田晋, ``金属ドープフラーレンポリマーの電子状態", 第 37 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム (名城大学, 名古屋市)2010 年 3 月
 14. 若林克法, 岡田晋, ``クライン端構造によるグラフェンナノリボンのエッジ状態と平坦バンド", 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山市、岡山大学)2010 年 3 月 20--3 月 23 日
 15. 高木祥光, 岡田晋, ``金属表面上の単層カーボンナノチューブの第一原理計算", 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山市、岡山大学)2010 年 3 月 20--3 月 23 日
 16. 岡田晋, ``基板によるグラファイト電子構造変調", 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山市、岡山大学)2010 年 3 月 20--3 月 23 日

VII-7 生命物理グループ

准教授 舘野 賢

大学院生 (5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における分子構造および電子構造のダイナミクスの解明」を目的に、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詳細に解析して、その理論を構築する。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重要である。

こうした解析を組織的かつ緻密に推進するためには、大規模計算（計算科学）が必要となる場面も多く、計算科学研究センタなどと連携し、超高速・超並列コンピュータを駆使して、以上の課題に臨む。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情報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。これにより、ひいては複雑な生体システムに内在する法則性を解明し、生命科学におけるゲノムワイドな、現実かつ実際の諸課題へと、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する。

概要

本年度は特に、超並列コンピュータ上で昨年度に開発した「量子力学 (QM) 計算と古典理論 (MM) 計算を融合させるインターフェース・システム」を用いて、「ハイブリッド QM/MM 分子動力学 (MD) 計算」を実現した。本システムにおいては、QM 計算部分に全電子 *ab initio* DFT 計算を採用し、電子構造のダイナミクスに基づいて生体反応を正確に解析するために、目下これは最先端の計算手法である[5]。この計算技術を、「タンパク質・RNA」複合体による生体反応（加水分解反応）に応用したところ、従来、タンパク質酵素による触媒反応であると考えられてきた反応が、実際には RNA (transfer RNA) によって駆動されたリボザイム (RNA 酵素) 反応であり、まったく新しい反応機構を有することが明らかになった。

さらにこの反応は、RNA のみならずタンパク質部分も同時に触媒作用に直接関与し、リボザイム/タンパク質からなるハイブリッド触媒であることが、QM/MM MD シミュレーションにより初めて明らかになった。そこで我々はこれを「ハイブリッド・リボザイム/タンパク質触媒」と名付けた。この反応機構は、ほぼ同時に、かつ独立に、ロシアの研究グル

ープ (Tukalo ら) によって実験的な検証がなされ証明された。さらにこの研究成果は、生命の起源・生命進化の理論にも大きな影響を与えるものであり、今後はその側面からの研究も推進する予定にある。

このように実験に先駆けて、生物物理学・生命科学における新しい重要な「事実」を理論計算が導いた例は、これまでにわずかしかない。特に日本の生物物理学においては一層、そうした傾向が強い。本年度のこれらの研究成果は、量子計算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。Structural Informatics 解析技術の開発、構造生物学(理論)の応用、さらには計算物理科学などに渡る関連領域を、生体高分子の反応と構造の構築原理の解明に、統合・融合することによって初めて得られたものである。今後の精密な生物物理学の創出に向けた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】新しい酵素「ハイブリッド・リボザイム/タンパク質触媒」の発見とその反応機構 [文献 1, 5]

タンパク質などの生体機能高分子の場合には、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)を正確に解析するには、大規模な計算が必要となる。そのため、生体分子を以下のような領域に分けて計算する方法(図1)が、現在、国際的にも非常に注目されている。すなわち、

1) 電子構造を含めて化学反応を取り扱う量子力学(QM)計算部分:

非常に大きな計算量のため、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理論(MM)計算部分:

比較的小さな計算量のため、広い領域をカバー

本年度は、このシステムをさらに分子動力学(MD)計算と組み合わせて用いることにより、分子構造と電子構造のダイナミクスを同時に解析する研究を推進した。これまでは、QM部分にCPMDが用いられるケースが多かったが、今後は全電子 *ab initio* DFT 計算を用いた解析システムが、(目的に応じて使い分けられながらも)その主流を形成していくであろう。これは、計算パフォーマンスの不利を超えて、その計算精度を追及する理由によるものである。

したがって、後者の「全電子 *ab initio* DFT 計算」と組み合わせたハイブリッドQM/MM MDシミュレーションは、生体反応機構の詳細を高精度に解析する目的において、現在最先端

の計算技術といえるものであり、この解析手法の応用が、今後の生物物理学理論の発展のひとつの鍵を握っているといえる。そのためには、前述のように、Structural Informatics における技術開発もまた同時に不可欠であることを意味する。

Gamess ... QM calculation (all electron based HF/DFT hybrid method)

Amber ... MM & MD calculation

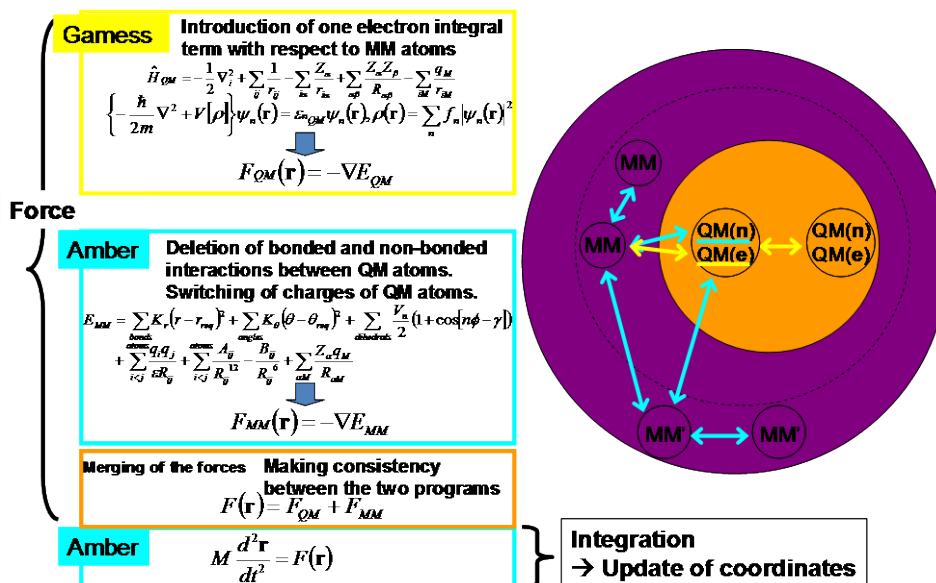


図1 QM/MM ハイブリッド・インターフェースプログラムの役割

こうした全電子 *ab initio* DFT 計算と組み合わせて、ハイブリッド QM/MM MD 計算を生物物理学へ応用した研究は、国際的にみても最先端の成果である。中でも以下のケースは特に重要であり、RNA 分子とタンパク質酵素の巨大な複合体が行う酵素反応機構の解析である。しかしこれを実現するためには、上記のハイブリッド QM/MM MD 計算システムだけでは、十分ではなかった。なぜなら、量子シミュレーションなど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一方で、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からである。そのため、前述のコンピュータ・シミュレーションを高精度に実行するためには、これらの技術的な問題点も克服することが必須である場合が甚だ多い。

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、その配置情報を理論的に予測することが必須となる。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的に得ることは原則的にできない。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、基質分子を結晶にしみこませるなど。Soaking と呼ばれる）、結晶内部での酵素反応等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、多くの場合に困難となる（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非常に多い）。

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。そこで本研究では、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。そのために昨年度において、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、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（図2；後述）。

従来の分子ドッキングシミュレーション計算アルゴリズムは、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（昨年度の年報参照）。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。

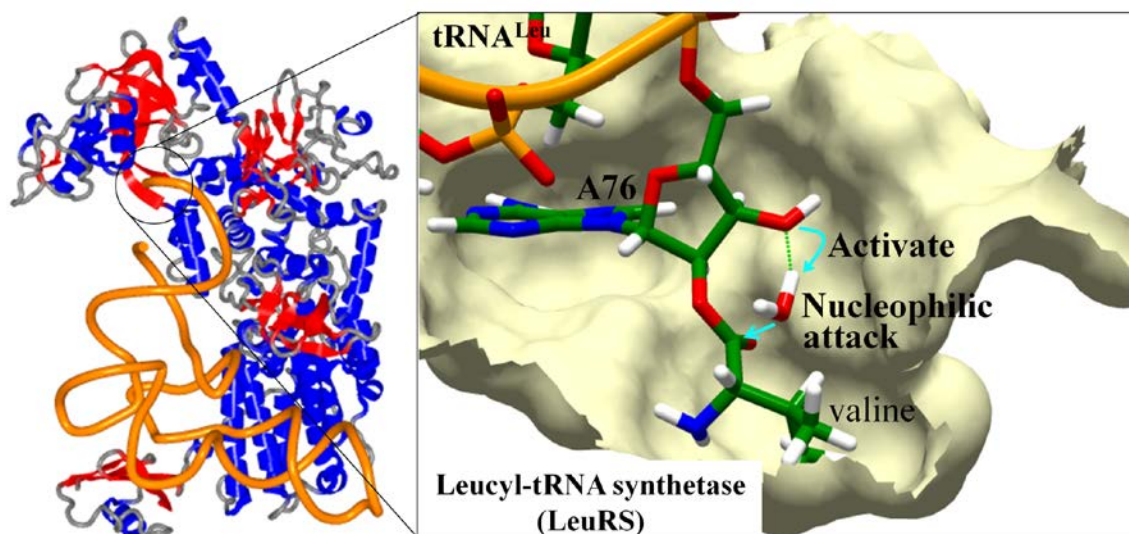


図2 ハイブリッドQM/MM MD 計算の対象となったRNA・タンパク質複合体の立体構造

(左図) ロイシル tRNA 合成酵素(LeuRS)と、その基質として作用する tRNA^{Leu}, および tRNA^{Leu}に結合したアミノ酸(バリン)の立体構造。溶媒水分子等を含め、全体として約 165,000 個の原子よりなる系である。

(右図) 活性部位の拡大図。さらにこれらの周囲には、溶媒水分子等も存在する。

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) と、その基質として作用する tRNA^{Leu}, およびその tRNA^{Leu}に結合したアミノ酸とからなる (図 2 参照)。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、極めて重要な反応である。

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、前ページの計算モデル (原子数~165,000 個) に対して、ハイブリッドQM/MM MD 計算を実行した。本研究では、考え得る 4 つの反応スキームすべてについて、QM/MM MD 計算を実行し、LeuRS によるエディティング反応における反応経路を解析した。酵素反応機構の解析では、用いる初期構造の十分な検討と適切な反応座標の設定とが、非常に重要である。以上の解析の結果、エネルギー障壁が最も低い最適な反応スキームを見出した。この反応経

路 (図3) の特徴は、基質部位 (tRNA^{Leu} における76位のアデノシンA76およびバリン) が有するリボースのヒドロキシル基 ($3'\text{-OH}$) が、求核剤を活性化する点にある (図2)。これはすなわち、 tRNA 自身が反応を駆動することを意味する。したがってこの反応は、誤ったアミノ酸が結合した tRNA^{Leu} (バリル- tRNA^{Leu}) が、触媒機能を有するRNAすなわち“リボザイム”であることを意味する。

しかしながら、 tRNA^{Leu} がまったく単独で酵素反応を行うわけではない。反応の開始、つまり求核剤がカルボニル炭素に接近するためには、保存されたアミノ酸であるスレオニンが、求核剤の“通り道”を開く役割をしていることも明らかになった。すなわち、バリル- tRNA^{Leu} によるリボザイム反応は、タンパク質の助けを借りてその活性を向上させているといえる。さらにこのリボザイム反応では、遷移状態のエネルギーを低下させるのに、 LeuRS のアミノ酸が関与していることもわかった。このように、 $\text{LeuRS} \cdot \text{バリル-}\text{tRNA}^{\text{Leu}}$ 複合体によるエディティング反応は、リボザイムとタンパク質が共同で作用する“ハイブリッド触媒”による反応であることが明らかになった。

これまで様々なリボザイムが発見され、その反応メカニズムによって幾つかのクラスに分類されている。本研究において見出したバリル- tRNA^{Leu} は、(1) 水分子が求核剤として作用する点、および(2) タンパク質が反応を直接に手助けする点において、従来のリボザイムとは異なることが示唆される。さらに、これまでの実験結果を統合すると、本研究において見出された新たなリボザイムのクラスは、 LeuRS のみに留まらず、他のアミノシル tRNA 合成酵素である ValRS , IleRS , さらに、 ThrRS , PheRS など、複数の酵素を含むことが明らかになった。

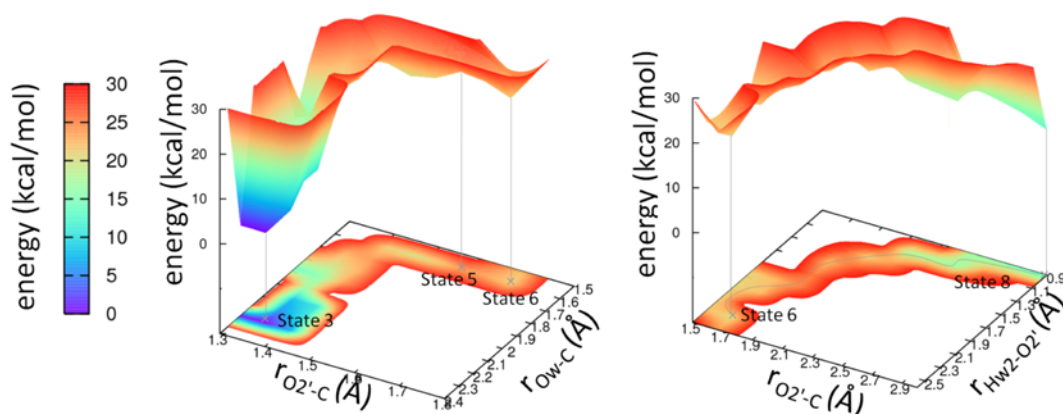


図3 エディティング反応におけるポテンシャルエネルギー面(PES)

こうしたハイブリッド触媒の存在は、「生命の起源」や「遺伝暗号の起源」にも新たな考え方をもたらすものである。すなわち、「生命の起源」と考えられている RNA ワールド（リボザイムが生体触媒としての機能を担う）から、現在の RNP ワールド（主としてタンパク質が生体触媒としての機能を担う）への変遷を考えた場合、それら原始の生体分子の機能構造や反応機構の間に、大きなギャップのあることが、従来からの大きな問題であった。ハイブリッド触媒は、これらの溝を埋め、より連続的かつ統合的な生命進化の理論モデルを構築するために、不可欠の役割を果たすものと考えられる。

【2】生体 π 電子系に対する精密な有効ポテンシャル場の創出とその応用 [文献 4]

生体システムにおいて π 電子は、芳香環を有するアミノ酸やヘム・ビタミンなどの補因子等に広く見られ、生物機能に極めて重要な役割を果たしている。タンパク質の立体構造においては、アルギニン (Arg) やリジン (Lys) などの正に荷電したアミノ酸と、トリプトファン (Trp) やチロシン (Tyr) など、芳香環を有するアミノ酸との相互作用が頻繁にみられる。これらはカチオン- π 相互作用と呼ばれ、他の非共有結合性相互作用(ファンデルワールス相互作用や水素結合、疎水性相互作用など)と比べ極めて強く、分子認識や立体構造の安定化に大きく寄与していることがよく知られている。

生体内に多量に存在する金属カチオンである Na^+ や K^+ なども、芳香環を有するアミノ酸とカチオン- π 相互作用を形成し、その安定化エネルギーはアミノ酸同士のそれと比べて非常に大きい。しかしこれらは、低分子量の化合物において見出されてきた結合様式であり、実際の生体高分子立体構造の中で、金属カチオン- π 複合体の存在が明らかになった例は、従来、極めて少なかった。このため、その生物機能における役割については、これまでほとんど不明であった。

最近、松村 (大阪大学) らが行った T1 リパーゼ (脂質分解作用を有する) に対する X 線結晶構造解析の結果、活性部位を構成するアミノ酸のひとつであるフェニルアラニン(Phe) の近傍に、球状の電子密度の存在することが明らかになった。松村らは、その電子密度が Na^+ イオンに相当すると考え、T1 リパーゼの活性部位に Phe 側鎖と Na^+ とのカチオン- π 相互作用が存在することを提案した (図 4)。しかし実験手法の限界から、その電子密度が水分子である可能性も否定しきれないのが実情であった。そこで本研究では、分子動力学 (MD) 計算により、その電子密度の実体が何であるかについて解析した。

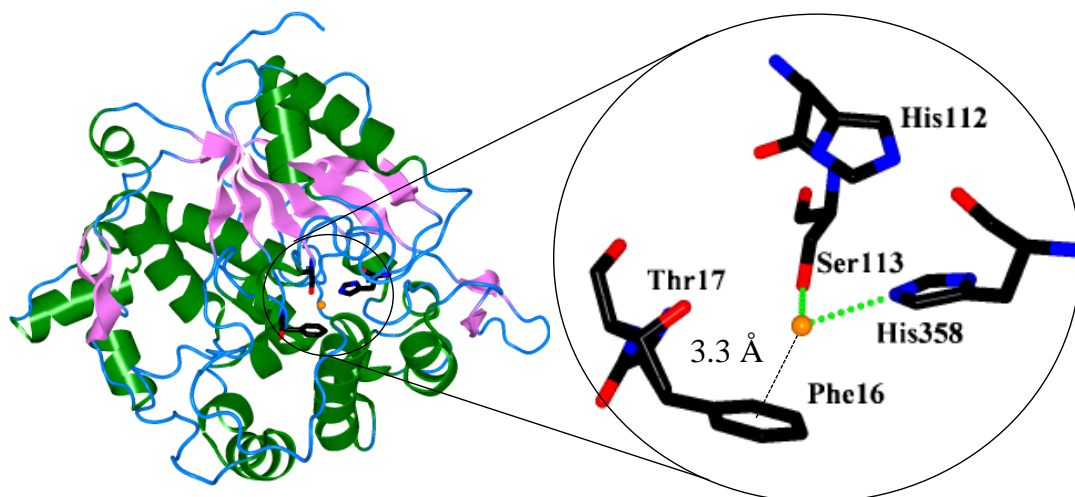


図4 T1 リパーゼの活性部位に存在する Na^+ -Phe 複合体

この立体構造は、大阪大学の松村らにより、X 線結晶構造解析によって解析され、その結果に基づき提案されたものであるが(2008 年)、 Na^+ イオンの代わりに、水分子である可能性も完全には否定できなかった。

そのためにまず、MD 計算に一般に用いられているエネルギー関数 (ff99 および ff02) の評価を行った。ここでポテンシャルの比較参照値としては、極めて高精度な量子力学計算法である CCSD(T) 法に対して、さらに基底関数のサイズに因る誤差を補正することにより、「完備な基底関数を構成して計算した場合のエネルギー値」を見積もることによって得られる値を採用した。その結果、ff99 および ff02 とともに、 Na^+ - π 結合に対しては先の比較参照値を全く再現し得ないことがわかった。特に ff99 における安定化エネルギーは、CCSD(T) による値の半分程度しか無かった (図 5 を参照)。実際、こうしたエネルギー関数を用いて MD 計算を実行すると、 Na^+ -Phe 複合体の立体構造が不安定になり、ひいては立体構造自体が壊れる結果となった。このように、これらのポテンシャル場においては、実験構造を全く再現しなかった。

そこで、この問題を真に解決するために有効な計算スキームの開発を試みた。そのために本研究では、芳香環近傍の空間をグリッドに分割し、原子核位置にその中心に有するガウス関数を用いて、各原子に与える電子の「密度関数」を定義し、これにより静電ポテンシャルを求めることによって、全エネルギーを CCSD(T) 法によるポテンシャル曲線に適合させるスキームを開発した。このスキームを用いてエネルギー関数を構成することにより、先の CCSD(T) 法と同等の計算精度で、しかし必要な計算時間は ff99 および ff02 とほぼ同じレベルにおいて、エネルギーを求められることがわかった (図 6)。この計算法を Grid-based

Energy Representation (GER) 法と名付けた。

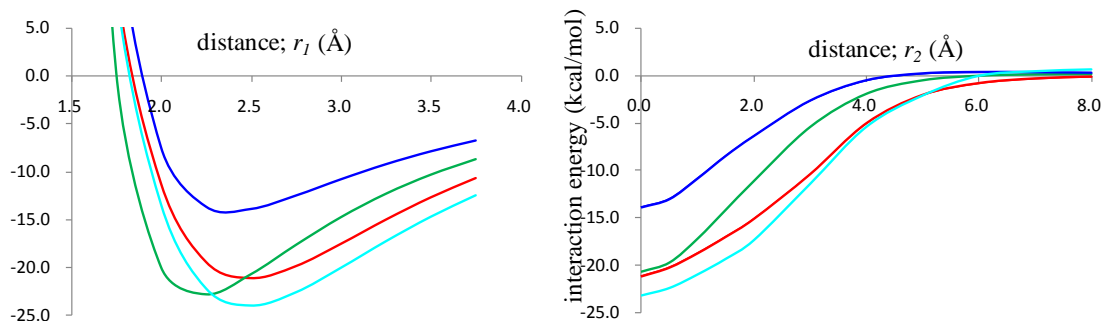


図5 様々な計算手法による, Na⁺-Phe 複合体のポテンシャル場

赤が CCSD(T)によって得られたポテンシャル・カーヴ。これは「完備な基底関数を構成して計算した場合のエネルギー値」を見積もることによって得られたものである(いわば正解)。他の曲線は, ff99(青), ff02(緑), DFT(シアン)によって計算されたものであり, いずれも CCSD(T)の計算結果と十分に一致するものはない。

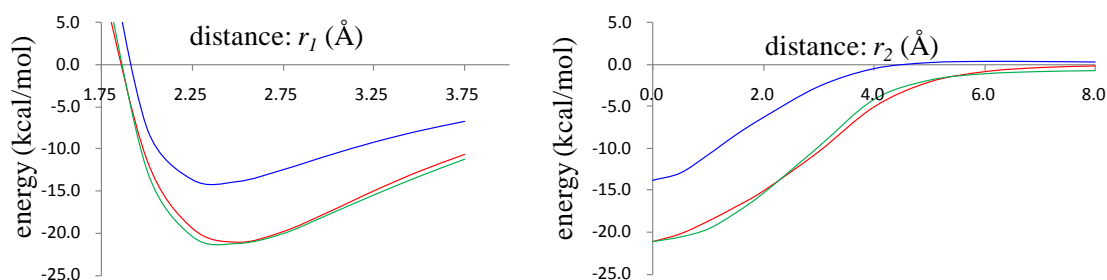


図6 Grid-based Energy Representation(GER)法によって得られたポテンシャル・カーヴ(緑)。

青は ff99 による計算結果。

この GER 法を用いた MD 計算 (5 ns) では, Na⁺-Phe 相互作用様式は安定に保持され, その活性部位の立体構造は, 実験構造を安定に再現した。これより, T1 リパーゼにおける Na⁺-Phe 複合体の役割は, その非常に大きいエンタルピ利得によって, 活性部位の立体構造の安定化に寄与することが明らかになった。また, Phe に結合している Na⁺ は, 同時にセリン (Ser) やヒスチジン (His) とも結合している。ここで Phe は疎水性のアミノ酸であるのに対し, Ser および His は親水性のアミノ酸である。一般に, こうした性質の全く異

なるアミノ酸同士が安定な相互作用を形成することはできない。ところが、Na⁺ がこれら性質の異なるアミノ酸どうしを仲立ちすることにより、通常は実現不可能な、疎水的なアミノ酸と親水的なアミノ酸とからなる、極めて安定なタンパク質コア構造の形成を可能にしていることが明らかになった。これを本研究では、ナトリウム・ブリッジと名付けた。

また、ff99 を用いた MD 計算から明らかのように、Na⁺-Phe 間の安定化エネルギーが小さいと、Na⁺-Phe 結合は保持されない。これは、Na⁺-Phe 結合よりもさらに弱い 水-Phe 結合が安定に保持されないことを示唆している。実際、水-Phe 結合を仮定した MD 計算においては、実験構造を正確に再現しないことが明らかになった。したがって、X 線結晶構造解析で得られた、Phe 近傍の球状の電子密度は、水分子ではあり得ない。このようにして、T1 リパーゼの活性部位における電子密度の実体が Na⁺ イオンであり、Na⁺-Phe 結合によるタンパク質コア構造形成における役割が明らかになった。

以上、本年度の成果は、量子場および古典場の双方における原理・解析を適確に組み合わせることで、巨大な生体情報高分子による生物機能のしくみを、非常に重要な複数の系において解明することに成功した。今後はさらに、こうした方向性を飛躍的に発展させることが、新しい生物物理学分野を切り開くためにも重要である。

【3】研究業績

(1) 研究論文

- 1) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno: Identification of the nucleophilic factors and the productive complex for the editing reaction by leucyl-tRNA synthetase: *FEBS Letters*, **583** (2009), 1901-08. (Cover)
- 2) Mauro Boero, Jiyoung Kang, Shin Tokumoto, and Masaru Tateno: A First-Principle Exploration of Heme *a* and Heme *a*₃ of the Bovine Cytochrome *c* Oxidase in Reduced and Oxidized Charge States: *J. Comp. Theor. Nanosci.*, **6** (2009), 2640-47.
- 3) Takehiro Ohta, Yohsuke Hagiwara, Jiyoung Kang, Keigo Nishikawa, Tetsunori Yamamoto, Hidemi Nagao, and Masaru Tateno: 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.*, **6** (2009), 2648-55. (Cover Image)

- 4) Yohsuke Hagiwara, Hiroyoshi Matsumura, and Masaru Tateno: Functional roles of a structural element involving $\text{Na}^+-\pi$ interactions in the catalytic site of T1 lipase revealed by molecular dynamics simulations: *J. Am. Chem. Soc.*, **131** (2009), 16697-705.
- 5) Yohsuke Hagiwara, Martin J. Field, Osamu Nureki, and Masaru Tateno: Editing mechanism of aminoacyl-tRNA synthetases operates by a hybrid ribozyme/protein catalyst: *J. Am. Chem. Soc.*, **132** (2010), 2751-58.
- 6) Yohsuke Hagiwara, Hiori Kino, and Masaru Tateno: Modulation of electronic structures of bases through DNA recognition of protein: *J. Phys.: Cond. Mat.*, **22** (2010), 152101. (Selected as "IOP select": Featured Article)
- 7) Yohsuke Hagiwara and Masaru Tateno: Recent advances in jointed quantum mechanics and molecular mechanics calculations of biological macromolecules: schemes and applications coupled to *ab initio* calculations: *J. Phys.: Cond. Mat.*, in press.
- 8) Mauro Boero and Masaru Tateno: Quantum-theoretical approaches to proteins and nucleic acids: in *The Oxford Handbook of Nanoscience and Technology, Volume I: Basic Aspects* (2010), pp.549-98.

(2) 学会発表 (主たるもの)

招待講演等

- 1) Masaru Tateno. Exploration of Mechanisms of Proton Transfer in Cytochrome c Oxidase Using First Principles Molecular Dynamics, International Workshop on Metalloprotein Functions, 2009年7月31日-8月1日, 兵庫.
- 2) Masaru Tateno. Computational investigations of mechanisms of enzymatic reactions of RNA-binding proteins, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009年10月30日-11月1日, 徳島.
- 3) Masaru Tateno. 生体超分子における生物機能発現機構の理論的解析, 特定領域研究「生体超分子構造」第6回公開シンポジウム, 2009年12月1日-12月2日, 大阪府.

国際会議等

- 4) Yohsuke Hagiwara, Hiroyoshi Matsumura, Masaru Tateno. Functional roles of a novel

structural element involving the Na^+ - π interaction present in the catalytic site of T1 lipase revealed by molecular dynamics simulations, Biophysical Society 54-th annual meeting, 2010年2月20日-24日, San Francisco, California

5) Yohsuke Hagiwara, Hiroyoshi Matsumura, Masaru Tateno. Development and applications of a novel QM/MM hybrid molecular dynamics calculation system on highly parallel supercomputer systems, Biophysical Society 54-th annual meeting, 2010年2月20日-24日, San Francisco, California

6) Mauro Boero, Jiyoung Kang, and Masaru Tateno. Electronic and geometrical structures of hemes a/a_3 of the bovine cytochrome c oxidase in the fully-reduced and oxidized states revealed by ab initio calculations, Biophysical Society 54-th annual meeting, 2010年2月20日-24日, San Francisco, California

7) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Takao Ohno, and Masaru Tateno. Theoretical identification of structural elements for stabilizing a cavity present in the entrails of the human aryl hydrocarbon receptor dioxin binding domain, Biophysical Society 54-th annual meeting, 2010年2月20日-24日, San Francisco, California

8) Mauro Boero, Jiyoung Kang, and Masaru Tateno. Computational analysis of electronic structures of heme a/a_3 of the bovine cytochrome c oxidase in the reduced and oxidized states, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009年10月30日-11月1日, 徳島.

9) Keisuke Matsumoto, Riki Nakamura, Taku Mizukami, Hiroaki Saitou, Masaru Tateno, Kiyoshi Nishikawa, and Hidemi Nagao. Molecular dynamics study on thermodynamical stability of Oxidized Azurin – Reduced Cytochrome c_{551} complex, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009年10月30日-11月1日, 徳島.

10) Riki Nakamura, Keisuke Matsumoto, Hiroaki Saitou, Taku Mizukami, Masaru Tateno, Kiyoshi Nishikawa, and Hidemi Nagao. Stability of Azurin(II) – Cytochrome(II) Complex: An effect of Change of Hydration Structure, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009年10月30日-11月1日, 徳島.

11) Mauro Boero, Jiyoung Kang, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Computational analysis of interactions between the heme systems and the bovine cytochrome c oxidase in the

reduced and oxidized states, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009 年 10 月 21 日-24 日, 徳島.

12) Shigehide Kuroyanagi, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Novel channel of glutamine amidotransferase CAB for ammonia transport revealed by molecular dynamics simulations, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009 年 10 月 30 日-11 月 1 日, 徳島.

13) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Takao Ohno, and Masaru Tateno. Structural modeling and dynamical properties of human aryl-hydrocarbon receptor dioxin binding domain, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009 年 10 月 30 日-11 月 1 日, 徳島.

14) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Computational analyses of expression mechanisms of enzymatic functions in leucyl-tRNA synthetase, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009 年 10 月 30 日-11 月 1 日, 徳島.

15) Tatsunori Nishimura, and Masaru Tateno. A novel theoretical scheme to describe stimulus/response relationships of biochemical reaction networks, 47th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan, 2009 年 10 月 30 日-11 月 1 日, 徳島.

国内学会等

16) Shigehide Kuroyanagi, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Computational analyses of ammonia transport mechanisms in GatCAB, 第 82 回日本生化学会大会, 2009 年 10 月 21 日-24 日, 神戸.

17) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Computational analyses of enzymatic reaction mechanisms in leucyl-tRNA synthetase, 第 82 回日本生化学会大会, 2009 年 10 月 21 日-24 日, 神戸.

18) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Takao Ohno, and Masaru Tateno. Structural modeling and dynamical properties of human aryl-hydrocarbon receptor dioxin binding domain, 第 82 回日本生化学会大会, 2009 年 10 月 21 日-24 日, 神戸.

19) Tatsunori Nishimura, and Masaru Tateno. Computational analyses of the MAPK signaling cascade exploiting a novel scheme to describe the steady state of biochemical reaction

networks, 第 82 回日本生化学会大会, 2009 年 10 月 21 日-24 日, 神戸.

20) Yohsuke Hagiwara, Osamu Nureki, and Masaru Tateno. Theoretical analyses of enzymatic reaction mechanisms in leucyl-tRNA synthetase, 第 32 回日本分子生物学会年会, 2009 年 12 月 9 日-12 日, 横浜

21) Shigehide Kuroyanagi, Yohsuke Hagiwara, and Masaru Tateno. Unidirectional valved mechanism of ammonia transport in GatCAB, 第 32 回日本分子生物学会年会, 2009 年 12 月 9 日-12 日, 横浜

22) Sundaram Arulmozhiraja, Yohsuke Hagiwara, Takao Ohno, and Masaru Tateno. Structural modeling and structural characterization of human aryl-hydrocarbon receptor dioxin binding domain, 第 32 回日本分子生物学会年会, 2009 年 12 月 9 日-12 日, 横浜

23) Mauro Boero, Jiyoung Kang, and Masaru Tateno. Theoretical analysis of electronic and geometrical structures of hemes a/a₃ modulated by the bovine cytochrome c oxidase in the reduced and oxidized states, 第 32 回日本分子生物学会年会, 2009 年 12 月 9 日-12 日, 横浜

24) Tatsunori Nishimura, and Masaru Tateno. A novel computational scheme to optimize kinetic parameters based on experimental stimulus/response data of biochemical reaction networks, 第32回日本分子生物学会年会, 2009年12月9日-12日, 横浜

(3) その他の発表

プレスリリース

2010 年 2 月

「第 3 の酵素」を発見!

-- RNA とタンパク質による「ハイブリッド触媒」 ---

毎日新聞 (全国版), 読売新聞 (全国版), 朝日新聞 (全国版) 等, 多数のメディアにおいて広く紹介された。

学内サイト <http://www.tsukuba.ac.jp/public/press/100210press.pdf>

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基づいた, 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」, 「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

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

a) スピネル格子 MV_2O_4

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

$Cd_xZn_{1-x}V_2O_4$ — 断熱比熱測定に基づく, 交換歪型 Jahn-Teller 秩序相, 反強磁性秩序相(軌道秩序効果との競合)およびスピングラス相の組成依存性の検討(継続).

b) 三角格子 M_xVO_2

Li_xVO_2 — NMR および高分解能 NMR による物性の微視的解析(論文 3, 学位論文 1). 常磁性相における擬 3 量体模型の構築およびスピン 1 重項 3 量体転移に関する構造解析(継続).

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

c) 他の物質群

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

$MV_{10}O_{15}$ — 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; 継続).

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).

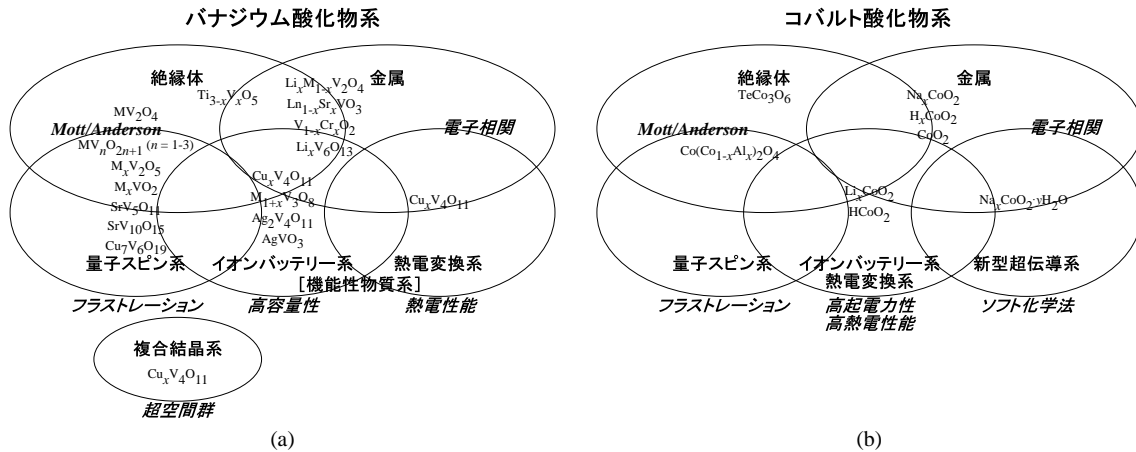


図 1: 近年, 本グループが研究対象とした (a) バナジウムおよび (b) コバルト酸化物系の物質群. 上図に加えて, チタン酸化物系, 鉄ニクタイト系等の研究がある.

(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. これらの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, 量子スピンス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.

$(\text{Cu}_{1-z}\text{M}_z)_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ — $x = 2.2$, $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Ag}$ 単結晶および多結晶に関する物性解析 (学位論文 2).

$\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ — $x > 1$ の合成と物性評価 (新規).

(4) 新物質系

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

【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。 $0 \leq x \leq 1$ の基底状態の考察（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 の積層不整および弱相関金属性に関する微視的モデルの確立（論文 2）。

(3) イオンバッテリー系

Li_xCoO_2 — 代表的イオンバッテリー正極活物質であり、 LiCoO_2 の Li 脱ドーブ過程における結晶構造および電子構造の変化が、実験と理論両面から広範囲に研究されている。母物質および Li 脱ドーブ試料の構造と物性評価（学位論文 3, 継続）。

(4) 新規超伝導系

$\text{Na}_{0.3}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$ — 良質の磁場配向粉末の NMR および NQR に基づく超伝導機構の確立および反強磁性的スピン相関の検討（学位論文 1）。

(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 の精密結晶構造決定と物性評価（継続）。

【3】他の 3d 遷移金属化合物系

(1) ペロブスカイト格子 SrTiO_3 , 六方晶 BaTiO_3

SrTiO_3 に酸素欠損あるいは Sr-希土類元素置換を導入することにより生じるバンド絶縁体-金属境界近傍の物性に関して、主として熱電素材の観点から研究を行った（論文 1, 学位論文 4）。さらに六方晶 BaTiO_3 についても同様の研究を開始した（新規）。

(2) ペロブスカイト関連格子 Sr_2TiO_4

Sr_2TiO_4 の酸素欠損系に関して、熱電素材の観点から研究を行っている（新規）。

(3) 三角格子 Li_xNiO_2

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

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

2008 年に発見された鉄ニクタイト系超伝導体の転移温度は銅酸化物高温超伝導体のそれに次ぐもので大変注目されている．本系の結晶構造，超伝導および常伝導機構を解明するために，多角的研究を進めている（継続）．

〈 論 文 〉

1. Masashige Onoda and Ikuo Goto, Correlation and phonon effects for the electronic transport and thermoelectric power factors in the metal - band-insulator crossover of perovskite-type titanates
Journal of Physics: Condensed Matter **21**, 435603 (9pp) (2009)
2. Masashige Onoda and Asami Sugawara, Microscopic evidence for the stacking faults and metallic properties of a triangular lattice CoO_2 with a three-layer structure
Journal of Physics: Condensed Matter **22**, 035602 (6pp) (2010)
3. Kenjiro Takao and Masashige Onoda, Li local configurations for the trimerized state of the geometrically frustrated triangular lattice system $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ with $0 < x < 0.14$
Journal of Physics: Condensed Matter **22**, 116003 (6pp) (2010)

〈 学位論文 〉

1. 高尾健二郎, Nuclear Magnetic Resonance Studies for the Triangular Lattice Systems $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ and $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (三角格子系 $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ および $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の核磁気共鳴研究)
数理解物科学研究所博士(物理学)論文, 2010年3月

三角格子系酸化物 $\text{M}_{1-x}\text{TO}_2$ (M, T はそれぞれアルカリ原子と遷移金属原子を示す) は, 基礎科学的観点からは量子スピン・幾何学的競合系として, 応用的観点からは, リチウム二次電池正極材料あるいは熱電素材として研究されている．

LiVO_2 は V^{3+} ($S = 1$) の三角格子構造を持ち, $T_c = 440 \sim 500$ K 以下でスピン - 格子相互作用を介したスピン三重項を形成する．一方, Li 欠損系 $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ はその存在が知られているものの物性に関する報告が少なく, 系統的な研究が行われていない．母相における三重項が Li 脱離によりどのような影響を受けるのかが興味深い．

近年, $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ において三角格子系酸化物で初の超伝導が発見された．この物質における超伝導電子対の対称性を明らかにすることは超伝導機構を構築する上で重要であるが, これまでに異なる見解が提示されてきている．すなわち研究グループによってスピン三重項超伝導あるいは三重項超伝導という主張がなされてきているが, いずれの報告においても準備された試料の超伝導転移温度が, この系の超伝導転移温度の最大値 $T_c = 4.8$ K に比べて低い等の問題が挙げられる．

本研究は, $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ 系および $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ 超伝導系をソフト化学的に合成し, 核磁気

共鳴 (NMR) 等を通して、それらの電子状態とスピンドYNAMICSを微視的見地から解明することを目的として行われ、次の (a) ~ (c) の結論が得られた。

(a) $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ ($0 \leq x \leq 0.14$) の三量体状態における Li の存在形態

$\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ 系は、Li 濃度に応じて、 $0 \leq x \leq 0.14$ (R1 相) および $x \simeq 0.67$ (R2 相) という二つの異なった三角格子相を持つことが確かめられた。

R1 相の平均構造は空間群 $R\bar{3}m$ で表され、三量体形成に起因する長周期反射が全組成において存在した。 $x \neq 0$ 組成の室温以下の帯磁率はほぼキュリー則によって表され、キュリー定数の組成依存性は、Li 欠損により導入されたスピン二重項三量体の寄与として理解された。 $x \neq 0$ 組成の ^{51}V MAS-NMR スペクトルには母相のスピン一重項三量体に対応する共鳴線に加え、スピン二重項三量体の共鳴線が現れた。 ^7Li MAS-NMR で観測された複数のスペクトルの組成依存性は、スピン一重項および二重項三量体形成により生じた結晶学的に非等価な Li 席を考えることで理解され、それらの共鳴線シフトの大きさは、 V^{4+} の移行超微細場でほぼ説明された。

(b) 高濃度に Li が欠損した三角格子系 $\text{Li}_{1-x}\text{VO}_2$ ($x \simeq 0.67$; R2 相) におけるスピングラス R2 相の結晶構造は $(\text{Li}_{0.27}\text{V}_{0.24})\text{V}_{0.58}\text{O}_2$ と表され、大きな乱雑性を持つことが X 線粉末回折および種々の分析結果から示唆された。V ナイトシフトは $T_c = 20$ K 以上でキュリーワイス則に従うが、 T_c 以下で温度依存性が抑制されることがわかった。V および Li の核磁化回復曲線は拡張指数関数によって表され、それらのスピン格子緩和率 T_1^{-1} は T_c で極大現象を示した。これらは、乱雑性を含む幾何学的競合系でしばしば観測される現象に類似しており、 T_c においてスピングラス的な短距離反強磁性秩序が実現している可能性が高いことがわかった。

(c) 磁場配向された $\text{Na}_x\text{CoO}_2 - y\text{H}_2\text{O}$ におけるスピン一重項超伝導および反強磁性相関

パラフィンを溶媒として磁場配向された $\text{Na}_x\text{CoO}_2 - y\text{H}_2\text{O}$ の良質粉末試料 (#1, #2) に対して、 ^{59}Co の NMR, 核四重極共鳴 (NQR), および ^{23}Na の NMR 等を行った。試料 #1 では、磁場配向作業等の前後において、試料の僅かな経時変化や結晶構造の温度履歴効果等による T_c の減少が示された。一方、試料 #2 の測定は全て 40 K 以下で行われた。

Co の $m = \frac{5}{2} \leftrightarrow \frac{7}{2}$ 遷移での NQR から見積もられた四重極周波数 $\nu_Q(\text{NQR})$ および NMR スペクトルから見積もられた $\nu_Q(\text{NMR})$, 非対称性パラメータ η , 面内および面間ナイトシフトに関しては、試料 #1 では $\nu_Q(\text{NQR}, \text{NMR})$ 値に相違があるのに対し、試料 #2 では良い一致を示した。

試料 #2 の Co ナイトシフトは、 ab 面、 c 軸方向ともに T_c 以下で減少した。すなわち、スピン一重項超伝導が実現していることが示された。残念ながら、今回の温度依存性から s 波、 d 波どちらの超伝導が実現しているかを断定することはできなかった。今回得られたナイトシフトの大きさは、これまでの報告と異なっているが、最も信頼性の高い結果と思われる。NQR から見積もった Co のスピン格子緩和率 T_1^{-1} は T_c 直下に Hebel-Slichter ピークを示さず、 T_c 以下で T^n ($n = 2.2$) の振る舞いを示した。すなわち、本系の超伝導は従来の s 波超伝導ではないことがわかった。また T_c 以上の $(T_1 T)^{-1}$ はキュリーワイス型の温度依存性を示し、二次元反強磁性ゆらぎの存在が示唆された。

2. 石川尚志, 低次元伝導性複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ の元素置換効果

数理工学研究所 (理学) 論文, 2010 年 3 月

$\text{CuV}_4\text{O}_{11}$ (部分格子 1) と Cu 鎖 (部分格子 2) からなる複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ は、基礎科学的には、低次元伝導性、金属絶縁体転移、あるいは電荷移動型相転移等の観点から研究されており、応用的には高容量 Li イオンバッテリー正極材料あるいは新奇熱電素材として注目されている。本研究では $\text{Cu}_{2.2}\text{V}_4\text{O}_{11}$ の Cu 席を元素置換 (Cu \rightarrow Co, Ni, Zn, Ag) することにより熱電性

能因子の改善を試みた．これまでに Cu, Co, Ni 置換の報告があるが，それらについても試料の高品位化をはかった．単結晶における室温での熱電性能因子は，Co, Ag 置換で母物質値を下回ったが，Zn, Ni 置換では母物質を上回った．ただし Ni に関しては僅かしかドーブされていないため注意が必要である．以上のことから本系における熱電性能因子の向上には Cu, Zn 置換が有効であり，それは電気抵抗率の減少と関係づけられることがわかった．

3. 齊藤佑弥，三角格子系 Li_xCoO_2 ($x < 1$) の核磁気共鳴
数理解物科学研究所修士（理学）論文，2010 年 3 月

リチウム電池正極活物質として実用化されている三角格子系 LiCoO_2 に関して，約 30 K での磁気異常および僅かな Li 脱離によりドーブされる Co^{4+} の高スピン状態化が最近報告された．本研究では， Li_xCoO_2 ($x < 1$) の二つの試料（#1, #2）に対して，磁気異常の確認および微視的性質の検討が行われた．ここで試料#1 が Co 欠損を持つものに対して，試料#2 では原子の欠損や固溶は認められなかった．試料#1 の ^{59}Co , ^7Li 核の緩和曲線は伸張型指数関数で表されるのに対して，試料#2 のそれらは単一指数関数であった．いずれの試料においても，Li と Co のスピン格子緩和率が約 30 K でピークを示した．

4. 塚原修一，ペロブスカイト系 SrTiO_3 の金属 - バンド絶縁体境界近傍の熱電特性
数理解物科学研究所修士（理学）論文，2010 年 3 月

最近，ペロブスカイト型酸素欠損系 $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ および Sr - 希土類元素置換系 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{TiO}_{3-\delta_n/2}$, $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_{3-\delta_n/2}$ ($\delta_n =$ 仕込値) のバンド絶縁体 - 金属境界近傍における伝導機構と熱電性能因子 P が報告された．有効キャリア濃度 $n \geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲において， P は $n^{-2/3}$ に比例しているため，2 バンドモデルで表される酸素欠損系の熱電性能は特に興味深い．本研究では， $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ の酸素欠損量を $\delta \leq 0.06$ の範囲で詳細に制御し，伝導機構と熱電性能因子増強の可能性を検討した．少なくとも $\delta \geq 0.018$ の範囲で金属的伝導を示しており，それは，電子相関，音響フォノンおよび光学フォノンによる散乱に基づいて理解された．また $n = 2.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ において $P = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ が達成されること，および酸素中 638 K, 3 h のアニールが金属 - バンド絶縁体境界に最も近い組成を生むことがわかった．

〈 講 演 〉

1. 小野田雅重，後藤育郎，ペロブスカイト型 Ti 酸化物のバンド絶縁体 - 金属境界近傍の伝導機構と熱電性能
日本物理学会 2009 年秋季大会・熊本大学黒髪キャンパス・2009 年 9 月 25 日・25aRG5
2. 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 2009 年秋季大会・熊本大学黒髪キャンパス・2009 年 9 月 26 日・26aRA4
3. 石川尚志，小野田雅重，機能性複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ の元素置換効果 III
日本物理学会 2009 年秋季大会・熊本大学黒髪キャンパス・2009 年 9 月 26 日・26aPS61
4. 坪川雅，小野田雅重，鉄系超伝導体 FeSe_x の結晶合成と物性評価
日本物理学会 2009 年秋季大会・熊本大学黒髪キャンパス・2009 年 9 月 26 日・26aPS123
5. 小野田雅重，熱電材料候補となる遷移金属酸化物系の伝導機構と高性能化
日本熱電学会・早稲田大学 55S 号館・2010 年 1 月 18 日（招待講演）
6. 小野田雅重，塚原修一，ペロブスカイト型 Ti 酸化物のバンド絶縁体 - 金属境界近傍の伝導機構と熱電性能 II
日本物理学会第 65 回年次大会・岡山大学津島キャンパス・2010 年 3 月 21 日・21aGE2

7. 斉藤佑弥, 小野田雅重, 三角格子系 Li_xCoO_2 ($x < 1$) の NMR
日本物理学会第 65 回年次大会・岡山大学津島キャンパス・2010 年 3 月 22 日・22pGD16
8. 高尾健二郎, 小野田雅重, 三角格子系バナデート Li_xVO_2 の MAS-NMR
日本物理学会第 65 回年次大会・岡山大学津島キャンパス・2010 年 3 月 23 日・23aGC2

〈高校生・中学生対象授業と講演〉

1. 小野田雅重, スピン科学-物理学の基礎から学際領域研究まで-
附属駒場高等学校 2 年生筑波大学研究室訪問・自然系学系 E 棟, D 棟・2009 年 7 月
2. 小野田雅重, 高温超伝導体の合成および構造・物性解析
茨城県教育委員会「未来の科学者育成プロジェクト事業(高校生科学体験教室)」・自然系学系 E 棟, D 棟, 理工学群 1F 棟・2009 年 8 月
3. 小野田雅重, ミクロな視点からの科学-ポテトチップスの味と電子スピン-
附属駒場中学校 3 年生筑波大学研究室訪問・自然系学系 E 棟, D 棟・2010 年 2 月

〈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の高機能化」に対して (2008-2009)

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

大学院生 D1 柴田恭幸

D1 大村彩子(H21.6-)

M2 五十嵐一泰

M2 阿部雄太

B4 伊藤 港

【1】 高速電子ペーパー素子に向けた研究[1] (柴田、守友)

我々は、シアノ架橋金属錯体薄膜をベースとした高速電子ペーパー素子の開発を行っている。シアノ架橋金属錯体薄膜を直接接触させ、電圧を印加することにより、薄膜間でイオン移動を誘起できる。右図は、素子の応答速度の素子厚依存性である。応答速度は、素子厚に比例して早くなるのが分かる。薄膜の厚さを薄くすることにより、2秒程度の応答速度を実現した。

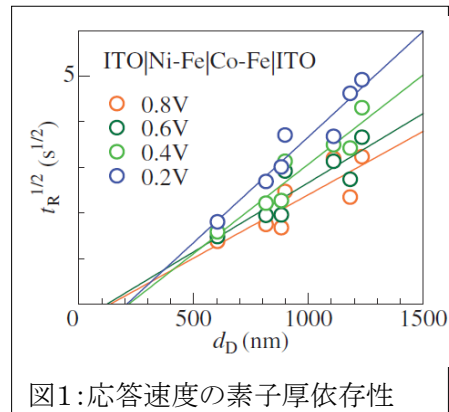


図1: 応答速度の素子厚依存性

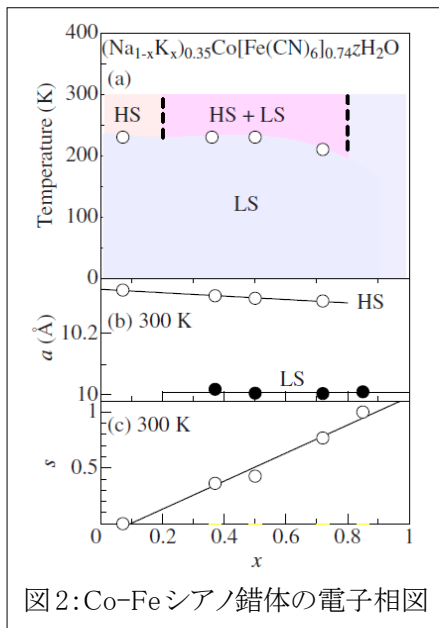


図2: Co-Feシアノ錯体の電子相図

状態を、赤外吸収、可視吸収、および、X線吸収で明らかにした。

【2】 Co-Fe シアノ錯体におけるイオン交換による相制御 [2] (阿部、松田、柴田、守友)

シアノ架橋金属錯体はナノポーラス構造をとり、ナノ空間を専有するアルカリ金属イオン(ゲスト)を強い相互作用を示す。図2は、Co-Fe シアノ錯体薄膜 $(Na_xCo[Fe(CN)_6]_y \cdot zH_2O)$ の相状態を K 濃度の関数として示したものである。K が薄い領域では高スピン状態(HS)が観測されるが、K が濃い状態では低スピン相(LS)が観測される。中間濃度では、両者が共存している。これは、K 濃度の濃淡が自発的に誘起され、低濃度領域と高濃度領域とに分かれるためであると考えられる。

さらに、シアノ錯体薄膜の電子

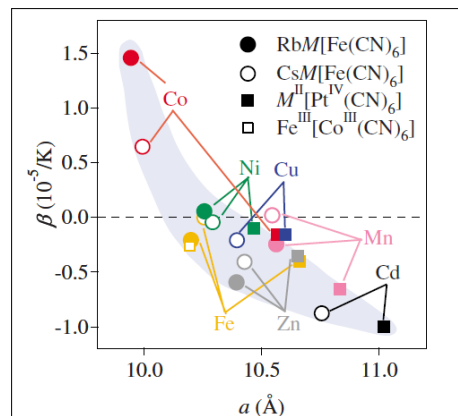


図3: シアノ錯体の格子定数と熱膨張係数との普遍的な関係

【3】 シアノ錯体における普遍的な熱応答[3] (松田、守友)

シアノ架橋錯体を系統的に合成し、放射光 X 線を用いて格子の熱応答を系統的に調べた。その結果、格子定数が大きくなるにつれて、熱膨張係数が正から負へと連

続的に変化することを発見した。(図3参照)負の熱膨張係数の起源は、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 八面体の剛体として偏角運動するためであると考えられる。温度上昇に伴い、偏角の度合いが大きくなり、有効N-M結合距離が増大する、この効果を保障するために、ユニットセル自体が小さくなると考えられる。格子定数が小さな化合物では、立体障害のため偏角運動が抑制されると考えられる。

【4】 アルカリ金属伝導経路の解明[4] (五十嵐、守友)

欠損が少なく結晶性の高い薄膜を準備することにより、イオン半径に依存したアルカリ金属の伝導パスを明らかにした。Na イオンはイオン半径が小さいので、シアノ錯体格子の窓を通過することができる。しかしながら、K イオンやRb イオンはイオン半径が大きいため、シアノ錯体格子の窓を通過できない。この実験結果は、第一原理計算で再現することができる。図4は、

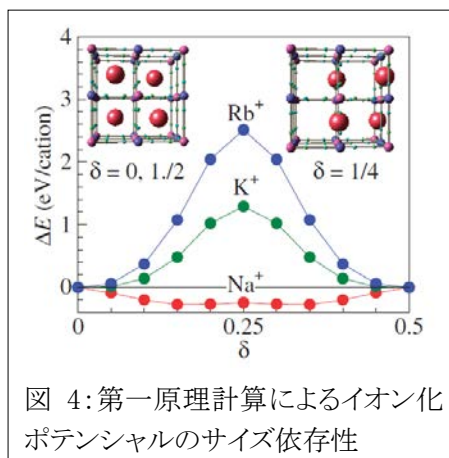


図 4: 第一原理計算によるイオン化ポテンシャルのサイズ依存性

WIN2k で計算したアルカリ金属のポテンシャルである。Na イオンはポテンシャル障壁を感じないのに対して、K イオンやRb イオンは高いポテンシャル障壁を感じている。

【5】 Co-Fe シアノ錯体におけるホールドープに誘起された構造相転移[5] (五十嵐、守友)

放射光X線を用いて、Co-Fe シアノ錯体薄膜($\text{Na}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$)の構造をホール濃度の関数として系統的に調べた。その結果、ホールドープにより菱面晶—立方晶構造相転移が優位記されることが分かった。中間濃度では、菱面晶と立方晶との二相共存が観測された。これは、Na 濃度の濃淡が自発的に誘起され、低濃度領域と高濃度領域とに分かれたためであると考えられる。

【6】 Co-Fe シアノ錯体の水位置の非経験的決定 [6] (金(JASRI)、柴田、守友)

MEM/Rietveld解析により、Co-Fe シアノ錯体の水位置を非経験的に決定した。さらに、熱処理により脱りする水サイトを特定した。

【7】 価数差分分光法による Fe-Fe シアノ錯体の電子構造の解明 [7] (栗原、上岡、中田、守友)

価数差分分光法をFe-Feシアノ錯体に応用し、その電子構造を明らかにした。これにより、本分光法が、エレクトロクロミック材料の研究に有効であることが実証された。

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

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

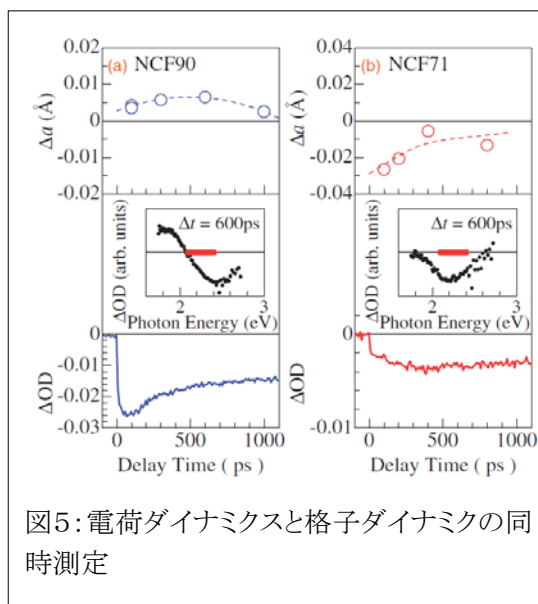


図5: 電荷ダイナミクスと格子ダイナミクスの同時測定

【9】電荷ダイナミクスと格子ダイナミクスの同時測定時間[11,15,新聞記事] (高田 CREST、上岡、柴田、守友)

SPring-8 の BL40XU ビームラインにピンポイント構造計測装置を立ち上げ、ピコ秒時間分解能で、電荷ダイナミクスと格子ダイナミクスの同時測定に成功した。これにより、Co-Fe シアノ錯体において、光励起後 100ps で格子が応答することを明らかにした。

【10】SPring-8 における CREST プロジェクト

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 - H21.12)に参加している。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

高い評価を得てプロジェクトが終了した。

【11】XFEL 利用推進に向けた委託研究

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

【12】戦略イニシャティブ(A)に関する活動

戦略イニシャティブ(A)「学際物質科学研究拠点(代表:大塚洋一)」(平成20年度-22年度)のメンバーとして、拠点形成に向けた活動を行った。

【13】KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成21年度KEK大学等連携支援事業「加速器科学と融合した物質科学教育研究拠点の構築に向けて」の代表として、筑波大-KEKの連携・協力の強化のための活動をおこなった。主な事業内容は、以下のとおりである。

(1) 研究会の開催

- ◇ 第一回連携研究会【8/27-28@筑波大学】-筑波大学数理物質科学研究科と KEK 物質構造科学研究所の連携を目指して-
- ◇ 第一回連携ミニ研究会【9/7-8@筑波大学】-量子ビームを用いた高压物性研究-、筑波大守友と KEK 中尾の共同企画
- ◇ 第二回連携研究会【11/2-3@東海村】-筑波大学数理物質科学研究科と KEK 物質構造科学研究所の連携を目指して-
- ◇ 第二回連携ミニ研究会【11/27@筑波大学】-グラフェン等、炭素関連物質-、筑波大初貝と KEK 那須の共同企画
- ◇ 第三回連携ミニ研究会【12/21-22@筑波大学】-XAFS と機能性物質-、筑波大守友と KEK 野村の共同企画
- ◇ 第三回連携研究会【1/20@筑波大学】-筑波大-KEK の連携の在り方-

(2) 放射光とパルス中性子の高度利用に向けたテーマの開拓

大学院生や若手研究者から、量子ビーム利用を目指した研究課題(KEK 大学等連携支

- 援事業研究提案課題)を公募した。
- (3) 量子ビームに対する意識調査
- (4) 国際シンポジウム PDSTM2010【2/6-8@筑波大学】の主催

<論文>

1. T. Shibata and Y. Moritomo, "Quick response of all solid electrochromic device", Appl. Phys. Ex., **2**, 105502(2009) (3 pages)
2. Y. Abe, J. E. Kim, T. Matsuda, T. Shibata, H. Tanida, T. Uruga and Y. Moritomo*, "Phase separation driven by mobile cations in $(\text{Na}_{1-x}\text{K}_x)_{0.35}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]z\text{H}_2\text{O}$ ", Phys. Rev. B, **80**, 134101(2009) (6 pages)
3. T. Matsuda, J. E. Kim, K. Ohoyama, and Y. Moritomo, "Universal thermal response of the Prussian blue lattice", Phys. Rev. B **79**, 172302 (2009).
4. Y. Moritomo, K. Igarashi, J. E. Kim and H. Tanaka, "Size dependent cation channel in Nanoporous Prussian blue lattice", Appl. Phys. Ex., **2**, 085001(3 pages) (2009) (3 pages)
5. Y. Moritomo, K. Igarashi, T. Matsuda, J. E. Kim, "Doping-induced structural transition in $\text{Na}_{1.60-8}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.90} \cdot 2.9 \text{H}_2\text{O}$ ", J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 074602(4 pages) (2009)
6. J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, T. Shibata and Y. Moritomo, "Guest-host interaction of $\text{K}_{0.34}\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.75}z\text{H}_2\text{O}$ as investigated by a charge-density analysis", Phys. Rev. B **79**, 132105 (4 pages).(2009)
7. Y. Kurihara, H. Kamioka, F. Nakada, and Y. Moritomo, "Oxidization/reduction process of Prussian blue film as investigated by valence-differential spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 092305 (4 pages) (2009).
8. T. Matsuda, X. J. Liu, T. Shibata, H. Kamioka, Y. Ohishi and Y. Moritomo, "Pressure-induced phase transition in Zn-Fe Prussian blue lattice", J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 105002 (2 pages) (2009) .
9. H. Kamioka, M. Hirano, H. Hosono, "Photo-induced charge state conversion of Eu^{2+} in $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ ", J. Appl. Phys. **106**, 053105/1-7 (2009).
10. H. Kamioka, F. Nakada, K. Igarashi, Y. Moritomo, "Transient photo-induced phenomena in vacancy-controlled Co-Fe cyanides", J. Phys. **148**, 012031(2009).
11. 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).
12. M. Takata, Y. Tanaka, K. Kato, F. Yoshida, Y. Fukuyama, N. Yasuda, S. Kohara, H. Oosawa, T. Nakagawa, J. Kim, H. Murayama, S. Kimura, H. Kamioka, Y. Moritomo, T. Matsunaga, R. Kojima, N. Yamada, K. Toriumi, T. Ohshima, H. Tanaka, "Structure and the mechanism of rapid phase-change in amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ", Eur. J. Glass Sci. Technol. B, **2009**, **50** (3), 205-211.
13. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, M. Hirano, L. Skuja, H. Hosono, "Photoluminescence study of diffusion and reactions of ^{18}O -labeled interstitial oxygen molecules in amorphous SiO_2 ", ECS Transactions, **25** (9) 277-285 (2009).

14. K. Kajihara, T. Miura, H. Kamioka, M. Hirano, Li. Skuja, H. Hosono, "Oxygen Exchange at the Internal Surface of Amorphous SiO₂ Studied by Photoluminescence of Isotopically Labeled Oxygen Molecules", Phys. Rev. Lett. 102, 175502/1-4 (2009).
15. Y. Fukuyama, N. Yasuda, H. Kamioka, J. Kim, T. Shibata, H. Osawa, T. Nakagawa, H. Murayama, K. Kato, Y. Tanaka, S Kimura, T. Ohshima, H. Tanaka, M. Takata, and Y. Moritomo, "Simultaneous Measurements of Picosecond Lattice and Charge Dynamics in Co-Fe Cyanides", Appl. Phys. Express. 3, 016601 (2010) (3 pages)

<著書>

1. 加藤健一、守友 浩「放射光を用いた電子密度解析による光誘起構造物性の研究」、日本結晶学会誌、51、205-210(2009)

<学位論文>

1. 修士論文 五十嵐一泰、「Co-Fe シアノ錯体におけるホールドーピングによる物性制御」
2. 修士論文 阿部雄太、「アルカリ金属置換/圧力印加によるシアノ錯体の相制御の研究」

<講演>

1. Y. Moritomo, "Control of material properties of Prussian blue lattice by host-guest interaction", ISIC15, Beijing, 2009/5/10-14
2. Y. Moritomo "Universal thermal response in Prussian blue lattice", ISIC15-satellite, Beijing, 2009/5/14-15
3. Y. Moritomo, 「シアノ架橋金属錯体膜の時間分解 X 線回折結果について」、CREST サイトビジット、SPring-8、2009/6/22
4. (Invited) Y. Moritomo, 「配列ナノ空間物質シアノ錯体の機能発現と構造物性」、第一回連携研究会、筑波、2009/8/27/-28
5. (Invited) Y. Moritomo, 「プルシャンブルー格子の特異な構造応答」、第一回連携ミニ研究会、筑波、2009/9/7-8
6. (Invited) Y. Moritomo, and Y. Kurihara, 「プルシャンブルー類似体薄膜の光学スペクトル」、第三回学際物質研究会、2009/8/21
7. (Invited) T. Matsuda, 「プルシャンブルー類似体の格子物性と光学ギャップの遷移金属依存性」、第三回学際物質研究会、2009/8/21
8. (Invited) Y. Moritomo "Hole-doping and functionality of Prussian blue junction", PDSTM2010, 筑波、2010/2/6-8
9. (Invited) 守友 浩 「XAFS を用いたナノポーラスシアノ錯体の研究」、第三回連携ミニ研究会、筑波、2009/12/21-22
10. (Invited) 上岡隼人、守友 浩 「Co-Fe 錯体における光誘起新規相の探索」、第三回連携ミニ研究会、筑波、2009/12/21-22
11. (Invited) 松田智行、守友 浩、「負の熱膨張現象を示すシアノ架橋型金属錯体の構造」、第二回連携研究会、東海、2009/11/2-3

12. (Invited)守友 浩「物質科学分野における連携に向けた取り組み」、第三回連携研究会、筑波、2010/1/20
13. (Invited)守友 浩、「シアノ錯体と機能化」、第三回東北大 COE 研究会、仙台、2009/12/18-20
14. 守友 浩「プルシアンブルー格子/界面におけるカチオン/電子移動」、第五回特定領域研究会、東京、2010/1/7-9
15. Y.Moritomo、「XAFS を用いたナノポーラスシアノ錯体の研究」、第12回 XAFS 討論会、弘前、2009/9/14-16
16. T. Mastuda, J. E. Kim, T. Uruga, and Y. Moritomo、「カチオンに応答する Co-Fe プルシアンブルー類似体の局所構造」、第12回 XAFS 討論会、弘前、2009/9/14-16
17. (Invited) Y. Moritomo, "Advanced Functionality of Prussian blue junction", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
18. 松田智行, 劉曉俊, 大石泰生, 柴田恭幸, 守友浩、「プルシアンブルー格子の圧力誘起構造相転移」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
19. 金廷恩, 田中宏志, 加藤健一, 高田昌樹, 守友浩、「結晶水制御したシアノ錯体の静電ポテンシャル変化」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
20. 阿部雄太, 松田智行, 柴田恭幸, 金廷恩, 宇留賀朋哉, 守友浩、「アルカリ金属置換による Co-Fe シアノ錯体の相制御」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
21. 守友浩, 五十嵐一泰, 金廷恩, 田中宏志、「Co-Fe シアノ錯体のカチオンの伝導経路」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
22. 柴田恭幸, 守友浩、「シアノ錯体界面を通じたカチオン移動」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
23. 栗原佑太郎, 上岡隼人, 守友浩、「シアノ錯体薄膜の価数差分分光」、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009/9/25-28
24. 上岡隼人, 平野正浩, 細野秀雄, 「ゲーレンナイト結晶中の Eu^{2+} の発光スペクトル」、2009 年 電気化学秋季大会, 東京農工大学 小金井キャンパス(小金井市) 9 月 10-11 日 2009 年
25. 阿部雄太, 金廷恩, 松田智行, 柴田恭幸, 守友浩, 「アルカリ金属置換された Co-Fe シアノ錯体の相分離」, 第 54 回物性若手夏の学校, 長野県 シャレードイン志賀, 2009/8/24
26. 松田智行, 金廷恩, 大沢仁志, 谷田肇, 宇留賀朋哉, 守友浩, 「プルシアンブルー類似体のカチオン応答性」, 第 59 回錯体化学討論会、長崎、2009 年 9 月.
27. 栗原佑太郎, 舩島洋紀, 石田雅也, 浜田典昭, 守友浩, 「価数制御された遷移金属シアノ錯体の電子構造」、日本物理学会 2010 年年次大会、岡山大学、2010/3/20-23
28. 大村彩子, 栗原佑太郎, 石崎学, 栗原正人, 守友浩, 「価数差分分光による Fe-Ni シアノ錯体混晶の酸化・還元プロセス」、日本物理学会 2010 年年次大会、岡山大学、2010/3/20-23
29. 阿部雄太, 上岡隼人, 松田智行, 守友浩, 「 $\text{RbNi}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ シアノ錯体の圧力誘起相転移」、日本物理学会 2010 年年次大会、岡山大学、2010/3/20-23
30. 松田智行, 金廷恩^A, 守友浩, 「ペンタシアノニトロシル鉄錯体における格子の熱応答」、日本物理学会 2010 年年次大会、岡山大学、2010/3/20-23
31. 柴田恭幸, 守友浩, 「シアノ錯体接合体の機能性と膜形態」、日本物理学会 2010 年年次大会、岡山大学、2010/3/20-23

32. 柴田恭幸, 守友浩, 「シアノ錯体接合体の機能性と膜形態」, 2010 年日本応用物理学会関係連合講演会, 東海大学, 2010/3/17-20

ポスター発表(主要なもの)

1. T. Shibata, and Y. Moritomo, "Functionality of heterojunction of Prussian blue analogues", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
2. H. Kamioka, T. Shibata, and Y. Moritomo, "Dynamics of photo-induced phase transition in Co-Fe cyanide films", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
3. T. Igarashi, T. Matsuda, J. E. Kim, and Y. Moritomo, "Structural phase transition induced by hole-doping in Co-Fe cyanide", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
4. Y. Kurihara, H. Kamioka, and Y. Moritomo, "Valence-differential spectroscopy of Fe-Fe cyanide film", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
5. Y. Abe, H. Tanida, T. Uruga, and Y. Moritomo, "Optical spectra of $(K_{1-x}Na_x)_{0.35}Co[Fe(CN)_6]_{0.74} \cdot zH_2O$ ", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
6. A. Omura, H. Tanaka, M. Kurihara, M. Sakamoto, and T. Kawamoto, "Electrochemical control of the elution property of Prussian blue nanoparticles thin films: mechanism and application", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
7. T. Matuda, J. E. Kim, H. Tanida, T. Uruga, and Y. Moritomo, "Cation exchange induced phase transition in cobalt(II) hexacyanoferrate(II)", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
8. T. Matsuda, J. E. Kim, K. Ohoyama, and Y. Moritomo, "Thermal expansion phenomena in Prussian blue analogues", TSAMS2009, Tsukuba, 2009/10/11-12
9. 上岡隼人, 柴田恭幸, 守友浩, 「Co-Fe シアノ錯体膜の過渡吸収分光とその温度依存性」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009/9/25-28
10. 阿部雄太, 谷田 肇, 宇留賀朋哉, 守友浩, 「アルカリ金属置換された Co-Fe シアノ錯体の光学スペクトル」, 第 54 回物性若手夏の学校, 長野県 シャレードイン志賀, 2009/8/23
11. T. Shibata and Y. Moritomo, "Rapid response of all solid device with Prussian blue junction", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
12. Y. Kurihara, H. Kamioka, and Y. Moritomo, "Valence-differential spectroscopy of transition metal cyanides", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
13. Y. Abe, J. E. Kim, T. Matsuda, and Y. Moritomo, "Phase control by external stimuli in cyano complex", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
14. H. Kamioka, T. Shibata, Y. Moritomo, "Dynamical process of photo-induced phase transition in Co-Fe cyanide films", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
15. K. Igarashi, T. Matsuda, J. Kim, and Y. Moritomo, "Symmetry control by guest concentration in Co-Fe cyanide", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
16. T. Matsuda, J. Kim, H. Osawa, H. Tanida, T. Uruga, Y. Moritomo, "Structural Phase Transition by Cation Exchange in Cobalt(II) Hexacyanoferrate(II)", PDSTM2010, 筑波, 2010/2/6-8
17. 上岡隼人, 守友浩, 「フェムト秒時間分解イメージ測定用の小型顕微鏡筒の開発」, 第4回ポリスケールテクノロジーワークショップ, 東京理科大学, 2010/3/5

<受賞>

1. 五十嵐一泰:PDST2010 で Young Student Award
2. 阿部雄太: 第 54 回物性若手夏の学校でポスターセッション最優秀賞
3. 栗原佑太郎: 第三回新竹一筑波シンポジウムで Award for the Best Poster

<特許>

1. 守友 浩、五十嵐一泰、「不揮発性エレクトロクロミック素子およびカチオンの移動を制御する方法」特願 2009-111178、2009/4/30
2. 守友 浩、柴田恭幸、「エレクトロクロミック素子および表示装置」、特願 2009-202058、2009/9/1
3. 守友 浩、栗原佑太郎、「シアノ架橋金属錯体超構造作成方法およびシアノ架橋金属錯体超構造作成装置」特願 2010-076810、2010/3/30

<その他>

1. 新聞記事

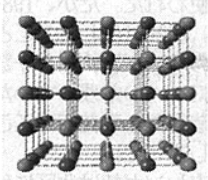
電子・原子の高速運動
同時計測し関連解明
高輝度光センターなど

高輝度光科学研究センター（兵庫県佐用町）と理化学研究所、筑波大学は共同で、大型放射光施設「Spring-8」の超高輝度X線を用いて、電子と原子の高速な運動を同時に計測することに成功した。光励起による電子と原子の運動が関連づけられれば、光記録のメカニズムの解明につながる。次世代DVDなど光記録材料の設計・開発が進むと期待される。科学技術振興機構（JST）のプロジェクトの一環で研究した。研究グループは、時間分解能が1000億分の4秒のX線回折と、同10兆分の1秒の光吸収を同時に測定するシステムを開発した。これで、電子と原子の高速運動を関連づけて解明できる。1%の原子の移動まで測れる高精度を持つという。

このシステムを使い、物質に光を照射すると原子が移動し、別の物質相に変化する「光誘起相転移」を示すコバルト・鉄シアノ錯体を試料にして測定した。その結果、電子が100億分の1秒運動すると、原子間の距離が一様に変化することを突き止めた。

物質の性質は光照射で変化するため、光記録として利用できる。コバルト・シアノ錯体は低温で光励起すると、光誘起相転移で磁石に変わる。

コバルト・鉄シアノ錯体の模式図



H22.1.27
日刊工業新聞
(科学技術・大学/29面)

電子と原子の超高速運動

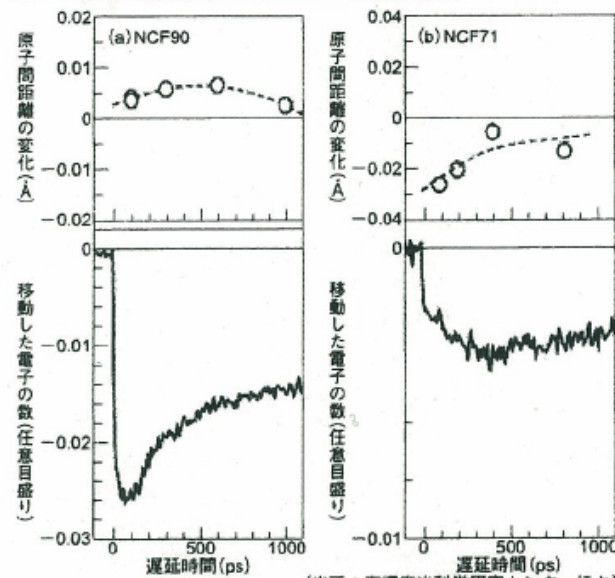
高輝度光科学研究センターなど 同時計測に成功

Spring-8 世界初

高輝度光科学研究センター、科学技術振興機構、理化学研究所、筑波大学は大型放射光施設Spring-8の高輝度X線を用いて電子と原子の超高速運動の同時計測に世界で初めて成功したと発表した。

この新しい手法を用いて光励起による電子の超高速運動と原子の一般的な超高速運動との関連を明らかにすれば、CDやDVDに用いられている光記録のメカニズムが解明され、その性能向上に大きく貢献すると期待される。

測定に用いた試料はコバルトイオンと鉄イオンが互いに違いを並んだ2種の薄膜(NiFeO/NiFeF1) (NCF90)と(NiFeO/NiFeF1) (NCF71)である。NCF90薄膜はコバルトイオンは3個



(出所：高輝度光科学研究センターほか)
 (図) 原子間距離の変化(上段)と移動した電子の数(下段)の遅延時間依存性

で鉄イオンは2個、NCF71は2個で鉄イオンは3個で7Åは逆にコバルトイオンある。光照射を行うとコバルトイオンと鉄イオンの間を電子が移動し、2つの個数が入れ替わる。実験はSpring-8から作り出される強いX線パルスを「原子を見る光」として利用した。これとは

別にタンサファイアレーザーと再生増幅器から「励起する光」と「電子を見る光」を作った。「原子を見る光」と「電子を見る光」は20ピコ秒の正確なタイミングを合わせることが出来る。

「原子を見る光」で、時間分解された回折パターンを測定すると、散乱角の大きさから原子間の距離が分かる。「電子を見る光」により移動した電子の数が分かる。NCF90薄膜では「励起する光」により電子が移動し、これにより生成される2個のコバルトイオンの半径が大きいため原子間距離が一様にならなくなっている。また、NCF71薄膜では逆に一様に原子間距離が小さくなっている。

今回の研究の結果は、CDなどで使用される光記録のメカニズム解明と性能向上に大きく貢献するものと期待される。

「原子を見る光」で、時間分解された回折パターンを測定すると、散乱角の大きさから原子間の距離が分かる。「電子を見る光」により移動した電子の数が分かる。NCF90薄膜では「励起する光」により電子が移動し、これにより生成される2個のコバルトイオンの半径が大きいため原子間距離が一様にならなくなっている。また、NCF71薄膜では逆に一様に原子間距離が小さくなっている。

今回の研究の結果は、CDなどで使用される光記録のメカニズム解明と性能向上に大きく貢献するものと期待される。

電子と原子の超高速運動を同時計測

高輝度光化学研究センターなど

高輝度光化学研究センター、科学技術振興機構、理化学研究所、筑波大学などは6日、大型放射光施設(Spring-8)の高輝度X線を用いて、電子と原子の超高速運動の同時計測に世界で初めて成功したと発表した。

これまで、異なる研究者が異なる試料に対してそれぞれの運動を計測していたため、両者の相関を精度よく決めることが

できなかったが、この新規な計測法を用いて、光誘起相転移を示すCo/Fcシアノ錯体において、電子の運動が100億分の1秒の時間で原子間距離を一様に変化させることを見いだした。この現象の発見は、コンパクトディスク(CD)やデジタル多用ディスク(DVD)といった光ディスクの性能向上に大きく貢献することが期待される。8日に発行される応用物理学会誌「アップライド・フィジックス・エクスプレス」に掲載される。

H22.1.7
 科学工業日報
 (総合・11面)

電子と原子の超高速運動 SPRING8で同時計測

世界初 理研、JASRI、筑波大など成功

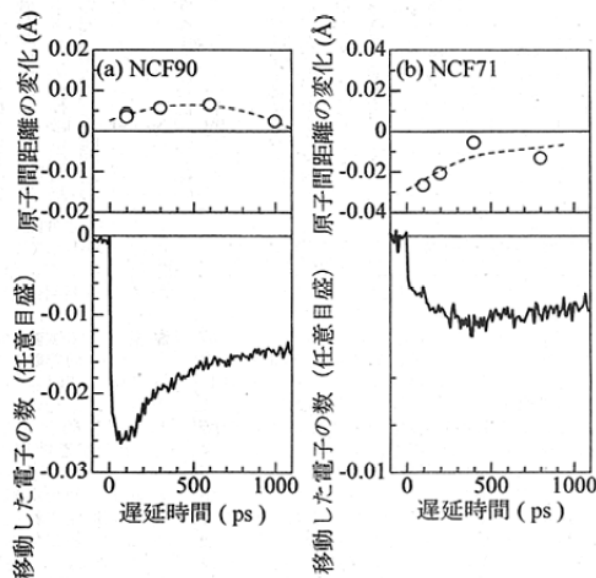
理化学研究所の高田昌樹主任研究員、高輝度光科学センター（JASRI）の木村滋・副主席研究員、筑波大学の守友浩教授らは、SPRING8の高輝度X線を用い電子と原子の超高速運動の同時計測に世界で初めて成功した。光記録のメカニズムを解明し、光記録デバイスの性能向上に役立つものと期待される。応用物理学誌 *Applied Physics Express* オンライン版に8日、掲載された。

光照射により物質の性質が変化する光照射効果は、DVDなどの光記録に利用されている。例えば、C₆₀フラーレンは低温で光照射を行うことで磁石に変化する（光誘起相転移）。より高速な書き込みや高い記録密度を有する光記録材料の開発指針を得るためには、光記録のメカニズムを明らかにする必要がある。これまで多くの研究者が、超高速時間分解分光により電子の超高速運動を調べてきたが、一方でフランスの研究グループが超高速時間分解X線回折により、原子の様な超高速運動を明らかにした。しかし、時間分解回折と時間分解分光との間には食い違いが出ていた。異なる研究者が異なる試料に対して実験を行っていたため。

そこで研究グループは、SPRING8のビームラインを用いて、1000億分の4秒の時間分解能のX線回折と10兆分の1秒の時間分解能の光吸収の同時計測を行った。

測定した試料は、インジウム錫酸化物からなる透明電極上に成長させたNCF90薄膜とNCF71薄膜。1万分の1の角度程度の微量結晶から構成されている。コバルトイオンと鉄イオンが交互に並んでおり、隣までの距離（格子定数）はNCF90が9・9512Å、NCF71が10・3020Å。NCF71薄膜では、コバルトイオンは2個で鉄イオンは3個、NCF90薄膜では逆にコバルトイオンが3個で鉄イオンは2個。光照射を行うとコバルトイオンと鉄イオンとの間を電子が移動し、2つの価数が入り替わる。

実験装置は、SPRING8のビームラインから作り出される強いX線パルス（パルス幅1000億分の4秒）を原子を見る光として利用。チタンサファイアレーザーと再生増幅器によって生成されたレーザーパルス（パルス幅10兆分の1秒）から、励起する光と電子を見る光を作った。この2つの光を作り出すことで同時計測が可能になった。原子を見る光で、時間分解された回折パターンを測定すると、散乱角の大きさから原子間の距離がわかる。NCF90薄膜では励起光により電子が移動し、イオン半徑の大きい2個のコ



原子間距離の変化（上段）と移動した電子の数（下段）の遅延時間依存性

バルトイオンが生成する間に変化させることが明らかになった。今回開発された同時測定システムを用いれば、電子の超高速運動と全体のわずかに移動しない原子の超高速運動との関係の同時計測により、電子移動によるこれらの運動の時間分解能を100億分の1秒の間に原子間距離を1nm程度まで測定することが期待される。

H22.1.15
科学新聞
(4面)

VIII-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助教	森下将史、斎藤政通
研究員	後藤秀徳、久保結丸
大学院生	乾由美子、田中翔、初見慎也（数理物質科学研究科2年）、 浦野敬太、海老名宏、黒田隆、庄司裕、友利ひかり（同1年）

低温物性実験グループでは、主に1K以下の極低温領域を舞台として、単分子架橋系やグラファイト超薄膜などのナノあるいはメゾスコピックな導体系の電気伝導、微小超伝導体の渦糸、微小ジョセフソン接合を利用した微小磁性計測および吸着³He薄膜の核磁性の研究を行っている。

今年度は7月に斎藤政通が助教として着任、2月に神田晶申が准教授に昇任した。また、久保結丸が4月から6月まで研究員として在籍した（現CEA-Saclay博士研究員）。大塚洋一は学際物質科学研究センター(TIMS)量子制御コアの担当であり、大阪大学および東京理科大学との三大学連携融合事業「アトムックテクノロジー創出事業」に携わり、国際会議ISAT-4（神戸）や3大学連携学生研究会（長万部）の開催に係わった。これらの会議、研究会には研究室メンバーが参加した。また筑波大学戦略イニシアティブ(A)「学際物質科学研究拠点」の代表として、台湾国立清華大学とのシンポジウムTSAMS2009をはじめとした国際シンポジウム・研究会の開催、学際研修コース「微細加工」の実施などの活動にあたった。

【1】単分子伝導の研究：超伝導MBJによるC₆₀分子架橋系の伝導チャンネル解析（浦野、乾、大塚）

ランダウアー公式によればナノ導体の電気伝導は少数の伝導チャンネルを介して生じ、その特性は各チャンネルの透過率の組{ τ_i }で理解できる。超伝導ナノブリッジでは多重アンドレーエフ反射を利用して各伝導チャンネルへの分解が可能であり、これまでにニオブ及び鉛を電極とした水素分子架橋系の研究を行ってきた。これを有機分子架橋系に応用し、フラーレンC₆₀の単分子架橋系の研究を進めた。リン青銅板を基板としてアルミニウムとC₆₀の真空共蒸着と電子線リソグラフィによってC₆₀を含むアルミニウムナノブリッジを作成した。これを希釈冷凍機に組み込んだ機械破断接合(MBJ)用ステージに取り付けて、30mKで破断・接合を行った。破断特性は純Alナノブリッジの場合とは明らかに異なり、C₆₀分子架橋系が実現しているものと考えられる。また、電流・電圧特性には多重アンドレーエフ反射に伴う明瞭なステップ特性が見られる。詳細な解析は今後行う。このほか、MBJ法を用いて高温超伝導体BSCCO単結晶ウィスカーの原子ポイントコンタクト特性の観測を試みた。

【2】グラフェンの電気伝導（田中、友利、後藤、神田）

(1) グラフェンにおける超伝導近接効果

単層・多層グラフェンに超伝導電極を接続したジョセフソン接合の伝導特性を検討した。単層グラフェンの場合（接合長さ200nm以上）には超伝導電流の温度依存性は従来のshortかつdirtyな接合に適用されるKulik-Omel'yanichuk理論でよく説明できることを明らかにした。ここで、超伝導電流が流れ始める温度 T_{onset} や最大超伝導電流値 I_c はキャリア密度に依存することを観測したが、 T_{onset} のキャリア密度依存はこれまで他の材料では観測例がない。原因を検討中である。また、この単層グラフェンの結果は、平均自由行程が200nmよりも短いことを示している。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ことを見出した。これは、従来の超伝導近接効果の理論では説明することができないが、『多層グラフェンに垂直な方向のゲート電界遮蔽によって、各膜の T_{onset} や I_c が異なる』と仮定したモデルで定性的に再現することができるこ

とを明らかにした。このモデルの妥当性を調べるために、2層グラフェンの超伝導近接効果について調べ、モデルから予測される結果と矛盾しない実験結果を得た。

(2) 極めて短い単層グラフェン接合の作製と伝導測定

単層グラフェンのジョセフソン接合に関する理論では、そのゼロオーバーラップ半金属という特殊なバンド構造を反映して、「相対論的」と呼ぶことのできる特殊なジョセフソン効果が出現することが予想されている。しかしながら、これまで観測例がない。我々は、相対論的効果を観測するための条件を検討し、その条件を満たすグラフェンジョセフソン接合試料の作製手法を開発し、試料の電気伝導測定を行っている。

相対論的効果を観測するための第一の条件は、グラフェン中でキャリアが無散乱で伝導することである(バリステック伝導)。バリステック伝導を実現するための、極めて短い接合の作製手法を開発した。この方法では、まずグラフェン上に電子線リソグラフィーによって、電子線レジストのアンダーカット構造を形成する。次に、斜め蒸着法によって電極金属を蒸着する。蒸着角度、蒸着量を調整することで、ナノ接合を形成できる。この手法を用いることでグラフェン中のキャリアの平均自由行程よりも十分短い電極間隔 50 nm の接合の開発に成功した。そして、作製された試料を希釈冷凍機で 0.2 K まで冷却し、常伝導状態・超伝導状態で電気伝導測定を行った。その結果、バリステック伝導が実現されていることを示唆するデータが得られたが、電極間隔が接近しているためにゲート電界が遮蔽され、キャリア密度のゲート変調が阻害されていることがわかった。相対論的効果の検証にはゲート変調が不可欠であるので、試料構造の改良が必要である。今後の研究では、別のバリステック接合作製の手法を開発し、それによって作製した試料を用いて引き続き相対論的効果の実験的観測を目指していく。

(3) 高電界下におけるグラフェンの電気伝導

高電界を印加することにより多層グラフェンのバンド構造を変化させ、新しい物性を見いだすことを目的として電気伝導の測定をおこなった。電解液による電気二重層ゲートを用いることにより、固体ゲート(300nm 酸化シリコン)の場合に比べ、150 倍のキャパシタンス、5 倍の最大電界を達成した。また、電解液滴下後グラフェンの移動度が向上することを観測し、電解液の存在が酸化シリコン中に存在する荷電不純物の影響を低減する有効な手段であることをしめした。

(4) アニールによるグラフェンの移動度向上

グラフェンデバイスの移動度(平均自由行程)を向上させる手法について検討した。移動度を向上させる方法としては、(1)水素ガス中アニール、(2)真空中で大電流印加によって発生したジュール熱による局所アニール(電流アニール)がよく用いられている。(1)については、アニール後にグラフェン上の有機物汚れが除去されていることを、AFM 観察で確認することができた。(2)については、多数の単層・多層グラフェンについて、アニール前後の移動度を比較した結果、移動度が増加する場合もあれば、減少する場合もある事が判明した。両者を AFM で観察したところ、前者ではアニール後にグラフェン表面が平坦であるのに対し、後者では、アニール後に表面に汚れの塊が多数付着している事が分かった。後者の原因の一つに、電極金属が溶解していることがあげられる。今後は、電流アニールを行う際の条件を最適化し、電流アニールをバリステックな系を構築するプロセスの一部として確立したい。

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量子渦糸の制御(黒田, 初見, 神田)

超伝導体をナノスケールにすると、さまざまな新しい現象が現れる。例えば、サイズが超伝導コヒーレンス長や磁場侵入深さと同程度のメゾスコピック超伝導体では、バルクの時には見られない新しい渦

糸状態（巨大渦糸状態、多重渦糸状態など）が出現する。我々はこの様なナノスケール超伝導状態を実験的に解明することを目指している。本研究は、高野義彦、山口尚秀（物材機構）、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。

（1）電流注入による渦糸状態の制御

前年に引き続き、正方形超伝導体において超伝導電流注入による渦糸状態の制御を調べた。渦糸状態の検出には、我々独自の方法である、Multiple-small-tunnel-junction (MSTJ) 法を用いた。前年度では、電流注入によって基底状態が入れ替わり、多重渦糸状態間の転移が起こることがわかったが、今年度は、この転移の詳細を調べた。電流注入による多重渦糸状態間転移で見られるヒステリシスは、温度や印加磁場の上昇と共に減少し、最終的に、多重渦糸状態間転移は巨大渦糸-多重渦糸状態間転移に変化する。また、注入した電流値に対する多重渦糸状態間転移の振る舞いはジョセフソン接合のゼロ電圧-有限電圧状態転移のものと同様の類似点があり、渦糸の巨視的量子トンネリング (MQT) の存在を示唆するものであった。さらに、 2×2 の微細孔のある正方形超伝導体についても同様の測定を行ったが、この場合にも、MQT と矛盾しない結果が得られた。

（2）渦糸状態に対する欠陥の影響

正方形メソスコピック超伝導体の表面に欠陥を導入し、局所的に試料の形状を変えた時の渦糸状態を観察した。渦糸状態の検出にはトンネル接合法を採用した。トンネル接合法を用いれば、超伝導電流密度の空間分布に関する情報を得ることができるため、渦糸の侵入や排出を高精度に検出できる。測定の結果、欠陥が正方形の辺の中心に存在する時には、欠陥が無い時や欠陥が正方形の頂点に存在する時と比べて、渦糸の侵入磁場が減少することがわかった。これは、渦糸が辺の中心から侵入する傾向があることに関係していると考えられる。また、高温では欠陥の影響が小さくなることもわかった。これは、高温でコヒーレンス長が長くなった結果、相対的に欠陥が小さくなったことが原因であると考えられる。このような欠陥を用いることで、渦糸の侵入、排出を制御できることが実験的に明らかになった。

【 4 】微小トンネル接合型 SQUID による分子磁性体磁化の量子トンネル現象（斎藤、海老名、大塚）

局所的な磁束変化を高感度に測定できる微小トンネル接合型マイクロ SQUID 磁力計の開発を進めた。既に開発報告のあるブリッジ型マイクロ SQUID と比較して、本素子は測定に伴うジュール発熱が極めて小さく、かつ連続的な測定を行うことが可能であるという特徴を有する。前年度までに $2 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ のループサイズを持つ素子の基本特性を調べ、SQUID ループに平行な磁場を加えることによる磁化測定法の有効性を常磁性標準試料である CPA 微結晶を用いて確認した。

今年度は本デバイスを用いて量子トンネリングによる磁気緩和現象研究をスタートし、これまでに Fe8 核クラスター $[\text{Fe}_8\text{O}_2(\text{OH})_{12}(\text{tacn})_6]\text{Br}_8 \cdot (\text{H}_2\text{O})_9$ ($\text{tacn}=1, 4, 7$ -triazacyclononane) 単結晶の磁化測定を行った。Fe8 核クラスターは代表的な分子磁性体であり、 $S = 10$ という高いスピン基底状態を持つ物質である。測定は温度 100 mK、平行磁場掃引速度 0.8 mT/s で行い、今回作製した SQUID は約 0.6 T まで磁場範囲で磁化測定可能であり、ジュール発熱はブリッジ型に比べ 7 桁以下であった。磁気ヒステリシス曲線では、 $\pm 0.22 \text{ T}$ などで磁化の量子トンネルに伴う単分子磁石に特徴的な階段状の変化を確認することができた。なお、本研究では数理物質科学研究科物質創成先端化学専攻大塩寛紀教授の協力をいただいた。

【 5 】電界ドーピングによる電気伝導計測（庄司、大塚）

イオン液体は室温でも液体として存在する塩である。イオン液体を誘電体とした電界効果トランジスタではゲート電圧は電極及び試料の両界面に形成される電気二重層領域に集中する。電気二重層は 1nm ほどの厚さなので、発生する電場は非常に強く、高い静電容量が得られる。この方法は最近有機結晶、

ポリマー、無機結晶などに適用され、従来の絶縁体薄膜を用いた FET 構造と比べて格段に低電圧かつ高濃度の電界ドーピングが実現されている。前年からスタートした導電性高分子および半導体の低温伝導研究にこの方法を適用することを試みた。前者では化学ドーピングでは避けられない格子の乱れを導入することなしにドーピングが可能であることが重要であり、配向性を持つ真空蒸着ポリチオフェン薄膜試料を、また後者では電界効果の標準系としてシリコン FET を試みた。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 】高温超伝導体固有接合における巨視的量子トンネルの研究（久保、大塚）

微小ジョセフソン接合の位相自由度を利用した位相量子ビットや磁束量子ビットは量子計算実現の有効な方法として研究がすすめられている。高温超伝導体の固有ジョセフソン接合は高いプラズマ周波数をもち高温動作が可能である。本研究では、加工に有利な形状を有し合成も容易な BSCCO 単結晶ウィスカーを用いて、固有ジョセフソン接合系のゼロ電圧状態から電圧状態への遷移を調べた。集束イオンビーム加工によって面積 $2.2\ \mu\text{m} \times 2.0\ \mu\text{m}$ 、有効厚さ 56 nm の接合を作製し、30 mK までの温度で測定した結果、熱励起による遷移から巨視的量子トンネルによる遷移へのクロスオーバーを確認した。クロスオーバー温度は約 260 mK、プラズマ周波数は 86 GHz と評価され、単結晶ウィスカーが固有ジョセフソン接合系として良質であることが確認された。本研究は独立行政法人物質材料研究機構高野グループとの共同研究である。

【 7 】ヘリウム 3 単原子層膜における強フラストレーション量子スピン系の研究（森下）

原子レベルで平坦なグラファイトの表面に物理吸着して生成する 2 次元固体 ^3He は、2 次元量子スピン系のモデル物質と考えられる。2 次元量子スピン系の大きな興味は、相互作用が等方的である場合、絶対零度まで長距離秩序相を持たないこと、反強磁性相互作用をもつ場合、幾何学的なフラストレーションを生じ、その基底状態が理論的にも未解決である点である。 ^3He スピン間の磁気相互作用は、多体交換モデルで説明されるが、ここでは強磁性相互作用と反強磁性相互作用が共存し、この競合が新たなフラストレーションを生んでいる。本研究では、熱容量・熱伝導測定を中心にこの系の調査を行っている。実験は全て、研究基盤総合センター低温部門の共同利用設備を用いて行われている。

(1) ^3He - ^4He 希釈冷凍機の整備

吸着 2 次元固体 ^3He における交換相互作用は mK 程度以下と非常に弱く、この系の性質を調べるためには、mK 以下の温度を必要とする。今年度、そのベース温度を与える ^3He - ^4He 希釈冷凍機本体において、冷媒であるヘリウムが真空断熱容器中に漏れ出し、十分な低温が得られない問題が発生し、その解決に多くの時間と労力を払わざるを得なかった。これまでも何箇所か漏れを生じており、前ユーザー等はこの漏れを樹脂で接着することにより止める手法を採っていた。しかし、樹脂は経年劣化や温度変化に伴う劣化が激しく、必要に応じて樹脂を増し塗りしていた。今回生じた漏れは、落雷による瞬間停電の際、誤動作で真空断熱容器中に大量の空気が流入して生じた。これは、急激な熱膨張により樹脂が割れたり、はがれたりして生じたものと考えられる。同時多発的に複数箇所でも漏れを生じた上、樹脂の増し塗りの結果、室温では漏れないが低温でのみ漏れが生ずるなど、漏れ箇所を特定し修理する上で困難な状況となった。このため、これまで使用されていた樹脂を全て除去して改めて半田付けすることにした。解体して作業することができないために、隙間に入り込んだ樹脂を完全に除去することができない問題や、半田が溶接部に十分に回り込まないなどの困難もあり、修理に時間を要したが、漏れは全て止めることができた。数回、室温と低温との温度サイクルを経験したが、漏れは再発せず、実験が可能な状況になった。

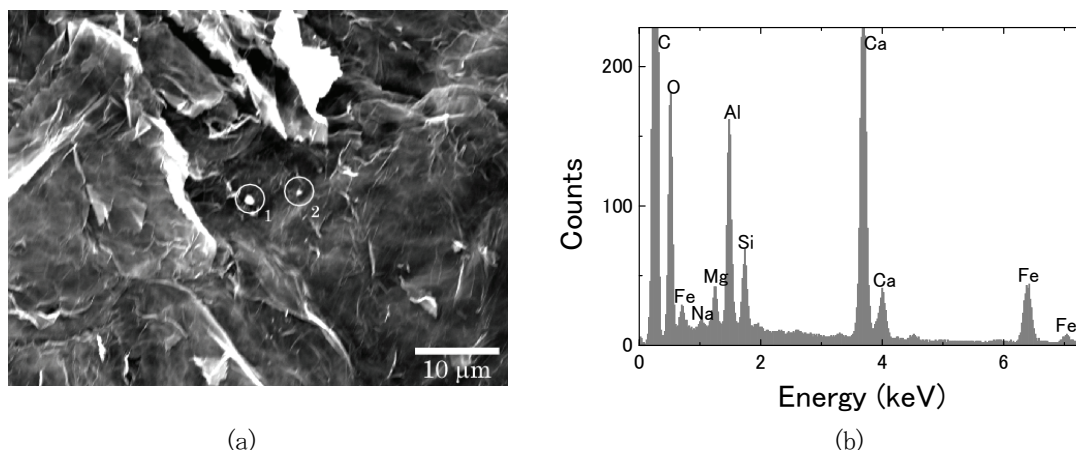


図1. (a) 劈開グラファイト表面のSEM画像。白丸で囲んだ輝点が不純物。
 (b) 画像(a)の白丸1の部分でのEDSの結果。ピークに対応する元素記号を付した。

(2) カゴメ格子 ^3He 固相薄膜の生成

幾何学的フラストレーションの強いスピン系の典型的な構造として、三角格子、カゴメ格子などが挙げられる。様々な三角格子上、カゴメ格子上のスピン物質が合成されているが、格子の違いによる差異について、詳細はあきらかになっていない。

グラファイト上 ^3He 薄膜は三角格子を基調とするが、吸着第2原子層に生ずる 4/7 相と呼ばれる整合固相において、1/4 の ^3He を非磁性な ^4He に置換すると、残る 3He はカゴメ格子を組むことが期待される。実際に、このような系の熱容量は温度に対しダブルピーク構造を示し、低温ピークはスピン系の短距離秩序に、高温ピークは ^3He と ^4He が熱励起として吸着サイトを交換していることに由来するものとして非常によく説明できる。即ち、充分な低温ではカゴメ格子が実現されていることが強く示唆される。カゴメ格子実現は、多体交換相互作用の競合の面でも興味深い。というのは、基底状態では ^4He は吸着ポテンシャルのより強いサイトに吸着され、 ^4He を含む経路でのリング交換は禁止される。例えば、4体や5体の交換は完全に禁止される。これは多体交換相互作用の競合を大きく影響し、磁性も変化することが期待される。しかしながら、磁性を反映する熱容量や帯磁率の温度依存性は、純粋な ^3He でも、1/4 を ^4He で置換した場合でも、絶対値が 3/4 倍になるだけで、ほとんど変化していない。カゴメ格子が実現していない可能性も残される。この問題に結論を与えるために、 ^3He と ^4He の置換量を 1/2 に変更しての測定を行ったが、上述の冷凍機の問題等で確定的な結果が得られておらず、引き続き調査中である。

(3) グラファイト基盤中の不純物観察

グラファイト基盤と ^3He 薄膜との間の熱の授受について、これまでの熱伝導測定で、熱は 0.1 mm 程度の巨視的な距離にわたり、フォノンやスピン素励起として ^3He 薄膜面内を流れ、局所的なスポットでグラファイト基盤へと流れ込むことが明らかになっている。実際のグラファイト基盤として Grafoil と呼ばれる多数劈開して表面積を増したものをを用いているが、熱が流れ込む局所的なスポットとしてはこの中に含まれる不純物、特に磁性をもった不純物のクラスターが関与していると考えられる。灰分分析により既に知られている Grafoil 中の不純物量と熱伝導から、クラスターは micron サイズと推定される。クラスター内のフォノンやマグノンの励起エネルギーを 0.1 mK 程度とするためにも、この程度のクラスターサイズが必要となる。しかしながら、micron サイズの不純物が含まれることは、にわかには信じ難い。そこで、Grafoil について帯磁率の測定と、走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面観察、エネルギー分散型 X 線分光 (EDS) による元素分析を行った。

磁化測定では、強磁性の寄与が観測された。この強磁性磁化は、灰分分析から得られている磁性不純物量とほぼ一致し、磁性不純物元素が磁性を持った状態でグラファイト中に含まれていることを示している。

一方、大気中で劈開したグラファイト表面のSEM画像の一例を図1(a)に示す。丸で囲んだ部分の輝点が不純物クラスターと考えられる。実際、この部分についてEDS分析を行うと図1(b)のようなスペクトルが得られ、Al, Ca, Siなどの不純物が含まれ、一部のクラスターにはFeが含まれることがわかった。直径0.1~10 μm 程度の不純物クラスターが観測され、熱伝導機構を説明する上で予測された大きさと符号する。また、劈開していない最表面での結果であるが、不純物クラスターの平均間隔は0.1 μm 程度であり、これも熱流経路の長さとは符合する。これらは、熱伝導機構のモデルを強く支持する結果である。

<学位論文>

- ・ 初見慎也:メゾスコピック超伝導体における局所電流注入による量子渦糸状態の制御(数理物質科学研究科、物理学専攻、修士論文、2010年3月)

<論文>

1. 神田晶申, 後藤秀徳, 塚越一仁, 劈開法で得た単層・多層グラフェンの電子・スピン・クーパー対伝導, 応用物理学会応用電子物性分科会誌, 第15巻第3号114-119(2009).
2. N. Kokubo, S. Okayasu, A. Kanda and B. Shinozaki: History dependent vortex configurations in superconducting disks of amorphous MoGe, Journal of Physics, Conference Series, 150 022044 (2009).
3. 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).
4. S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda: Effect of supercurrent injection on vortex penetration and expulsion fields in mesoscopic superconducting squares, Physica C 469, 1080 - 1083 (2009).
5. M.V. Milosevic, A. Kanda, S. Hatsumi, F.M. Peeters, Y. Ootuka: Local Current Injection into Mesoscopic Superconductors for the Manipulation of Quantum States, Phys. Rev. Lett. 103, 217003 (2009).
6. S. Murakawa, Y. Tamura, Y. Wada, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai: New Anomaly in the Transverse Acoustic Impedance of Superfluid $^3\text{He-B}$ with a Wall Coated by Several Layers of ^4He , Physical Review Letters 103, 155301 (2009)
7. M. Morishita: Thermal Relaxation in ^3He Solid Films on Graphite, J. Low Temp. Phys., 158, 666 (2009).
8. H. Miyazaki, S. Li, A. Kanda, and K. Tsukagoshi: Resistance modulation of graphite/graphene film controlled by gate electric field, Semiconductor Science and Technology, 25 (3) 034008/1-8 (2010).
9. S. Odaka, H. Miyazaki, S. Li, A. Kanda, K. Morita, S. Tanaka, Y. Miyata, H. Kataura, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi: Anisotropic transport in epitaxial graphene on SiC substrate with periodic nanofacets, Appl. Phys. Lett. 96 (6) 062111/1-3 (2010).
10. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, S. Kashiwaya, Y. Ootuka, S. Nomura: Optical mapping of the boundary of a two-dimensional electron gas by a nearfield optical microscopy, Physics Procedia 3(2010) 1171-1175.
11. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Electrostatic Manipulation of Level of Bulk Liquid for Studies of Saturated Superfluid ^3He Films, Journal of Low Temperature Physics 158, 716 (2010)

13. Y. Kuroda, S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda: Effect of surface defects on vortex penetration in small superconducting squares, *Physica C* in press.
14. H. Tomori, A. Kanda, H. Goto, S. Takana, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi: Fabrication of ultrashort graphene Josephson junctions, *Physica C* in press.
15. A. Kanda, T. Sato, H. Goto, H. Tomori, S. Takana, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi: Dependence of proximity-induced supercurrent on junction length in multilayer-graphene Josephson junctions, *Physica C* in press.
16. S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, A. Kanda, Experimental distinction between giant vortex and multivortex states in mesoscopic superconducting squares, *Physica C* in press.
17. S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, A. Kanda: Giant vortex and multivortex states under local supercurrent injection in a mesoscopic superconducting square, *Journal of Physics, Conference Series*, in press.
18. S. Tanaka, H. Goto, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene, *Journal of Physics, Conference Series*, in press.
19. H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Inverse spin valve effect in multilayer graphene device, *Journal of Physics, Conference Series*, in press.
20. Y. Kubo, Y. Takahide, S. Ueda, Y. Takano, and Y. Ootuka, Macroscopic Quantum Tunneling in a Bi₂ Sr₂ CaCu₂ O_{8+δ} Single Crystalline Whisker, to appear in *Applied Physics Express*

<著書>

1. A. Kanda, Y. Ootuka, K. Kadowaki, F. M. Peeters: 18. Novel Superconducting States in Nanoscale Superconductors, in "The Oxford Handbook of Nanoscience and Technology: Basic Aspects (Oxford Handbooks in Physics)", Oxford University Press (New York, Apr. 2010. pp.639-676).
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6章(徳本洋志, 齊木幸一郎監修, シーエムシー出版)p. 90 - p. 101.

<講演>

国際会議

1. A. Kanda, H. Goto, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, H. Yoshioka, M. Hayashi: Anomalous temperature dependence of critical supercurrent in multilayer graphene coupled to superconductors, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe International Conference Center (Kobe), 2009. 7.24.
2. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda: Superconducting proximity effect through single-layer and multilayer graphene films, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe International Conference Center (Kobe), 2009. 7.24.
3. H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Tunable semiconducting state in bilayer graphene, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe International Conference Center (Kobe), 2009. 7.24.
4. S. Tanaka, H. Goto, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi and A. Kanda: Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene, Graphene Tokyo 2009, Univ. Tokyo, 2009. 7. 25.
5. A. Kanda, H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, H. Yoshioka, and M. Hayashi: Superconducting transition of multilayer graphene coupled to superconductors, Graphene Tokyo 2009, Univ. Tokyo, 2009. 7. 25.
6. H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi and A. Kanda: Proximity-induced supercurrent in single layer graphene, Graphene Tokyo 2009, Univ. Tokyo, 2009. 7. 25.
7. A. Kanda, H. Goto, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka: Observation of superconducting

- proximity effect in single and multi-layer graphene, 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Tokyo, 2009. 9. 7.12.
8. H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, Y. Ootuka and S. Nomura: Optical mapping of the edge of Hall-bar by a near-field optical microscopy in magnetic field, NGSS-14, 2009.7.16
 9. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Electrostatic Bulk Liquid Manipulation for Saturated Superfluid ^3He Films, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), Evanston, Illinois, USA, 2009.8.5-11.
 10. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Thickness Dependence of Superfluid Transition Temperature of ^3He film in Magnetic Fields of 0 and 3 kGauss, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), Evanston, Illinois, USA, 2009.8.5-11.
 11. M. Morishita: Thermal Relaxation in ^3He Solid Films on Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009) (Northwestern University, Evanston, IL USA, August 7, 2009).
 12. M. Morishita: Impurities in Grafoil Substrate, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009) (Northwestern University, Evanston, IL USA, August 7, 2009).
 13. (招待講演) A. Kanda, M.V. Milosevic, S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, F.M. Peeters: Manipulation of vortex states in mesoscopic superconductors by local supercurrent injection, The 12th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, Lake Yamanaka, 2009. 9. 12-16.
 14. N. Kokubo, S. Okayasu, A. Kanda, B. Shinozaki: Direct observations of vortex states in amorphous MoGe disks by scanning SQUID microscopy, The 12th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, Lake Yamanaka, 2009. 9. 12-16.
 15. (招待講演) A. Kanda: Gate modulation of spin transport in multilayer graphene, International IMR Workshop on Group IV Spintronics, Sendai, 2009. 10. 5-6.
 16. Y. Ootuka, Opening Remark, 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 17. Y. Ootuka, Electrical Transport through Superconducting Nono-Bridge, 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば) 2009.10.11
 18. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Suppression of superfluid transition temperature of ^3He films in submicron geometry, 2nd Tsukuba-Shinchi Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), 筑波国際会議場, 2009.10.10-12.
 19. S.Hatsumi, Y.Kuroda, Y.Ootuka, A.Kanda: Manipulation of vortex states in a mesoscopic superconducting square by local current injection, The 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 20. Y.Kuroda, S.Hatsumi, Y.Ootuka, A.Kanda: Influence of Surface defects on transitions between mesoscopic vortex states in small superconducting squares, The 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 21. H.Tomori, H.Goto, S.Tanaka, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi A.Kanda: Fabrication of a ballistic graphene junction The 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 22. H.Goto, H.Tomori, S.Tanaka, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi A.Kanda: Proximity-induced supercurrent in single-layer graphene The 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 23. Sho Tanaka, H.Goto, H.Tomori, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi, A.Kanda: Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene, The 2nd Tsukuba-Hsinchu Bilateral Symposium on Advanced Materials Science and Technology (TSAMS2009), エポカルつくば(つくば), 2009.10.11
 24. A. Kanda, H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, H. Yoshioka, M. Hayashi: Unconventional proximity-induced superconducting transition in multilayer graphene, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), Tsukuba, 2009. 11. 2-4.
 25. H. Tomori, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Fabrication of ballistic graphene Josephson junctions, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), Tsukuba, 2009. 11. 2-4.

26. Y. Kuroda, S. Hatsumi, Y. Ootuka, A. Kanda: Influence of defects on vortex penetration and expulsion in mesoscopic superconductors, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), Tsukuba, 2009. 11. 2-4.
27. S. Hatsumi, Y. Kuroda, Y. Ootuka, A. Kanda: Reversible switching between vortex states by supercurrent injection into mesoscopic superconductors, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), Tsukuba, 2009. 11. 2-4.
28. (招待講演) A. Kanda: Spin and Cooper-pair transport in single and multi-layer graphene devices, The 4th Hiroshima Workshop on Sustainable Materials Science, Hiroshima, 2009. 11. 13-14.
29. Y. Ootuka, Opening Remarks, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
30. H. Tomori, H. Goto, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Fabrication of a ballistic graphene junction, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
31. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Thickness dependence of superfluid transition temperature of submicron ^3He films, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Kobe, Japan, 2009.11.18-19.
32. H. Miyazaki, K. Tsukagoshi, and A. Kanda: Electric field modulation of bilayer graphene channel, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
33. H. Goto, S. Tanaka, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Gate modulation of spin transport in multilayer graphene, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
34. S. Tanaka, H. Goto, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, A. Kanda: Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
35. Akinobu Kanda: Electron Transport in Multilayer Graphene, The 4th International Symposium on Atomic Technology (ISAT-4), Maiko, 2009. 11.18-19.
36. (招待講演) Akinobu Kanda: Superconducting proximity effect in graphene, "Graphene Workshop 2009", Universiteit Antwerpen, Campus Groenenborger, Antwerp (Belgium), 2009. 11. 24.
37. S. Odaka, H. Miyazaki, A. Kanda, K. Morita, S. Tanaka, Y. Miyata, H. Kataura, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi: Electric transport in epitaxial graphene on vicinal SiC substrate with periodic atomic-scale facets, Material Research Society (MRS) 2009 Fall Meeting, Boston, USA, 2009. 11. 30 - 12. 4.
38. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda: Theoretical study of superconducting proximity effect in monolayer and bilayer graphene, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN), Kaanapali (USA), 2009. 12. 2.
39. A. Kanda, H. Goto, S. Tanaka, H. Tomori, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi: Gate modulation of spin transport in multilayer graphene, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN), Kaanapali (USA), 2009. 12. 3.
40. A. Kanda, H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka: Superconducting proximity effect in single and multilayer graphene, International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices (ISANN), Kaanapali (USA), 2009. 12. 3.
41. Y. Ootuka, Opening Remarks, Symposium on Creation of Functional Materials 2009, エポカルつくば(つくば), 2009.12.3
42. M. Saitoh, H. Ebina, H. Oshio, and Y. Ootuka: Development of micro-SQUID Magnetometer for Investigation of Single-Molecule Magnets, Symposium on Creation of Functional Materials (SCFM2009), 筑波国際会議場, 2009.12.3-4.
43. H. Hiura, H. Miyazaki, A. Kanda, K. Tsukagoshi: Characterization of Graphene by Scanning Electron Microscopy, 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09 (ALC'09), Maui, Hawaii, USA, 2009. 12. 6-11.
44. H. Miyazaki, A. Kanda, K. Tsukagoshi: Gate-voltage modulation of conductance in bilayer graphene, 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09 (ALC'09), Maui, Hawaii, USA, 2009. 12. 6-11.
45. S. Murakawa, Y. Wada, M. Wasai, K. Akiyama, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, and Y. Okuda:

Surface Majorana Cone of the Superfluid ^3He B Phase on a Partially Specular Wall, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), Yokohama, Japan 2010.3.9-12.

46. M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: Magnetic Field Dependence of Dissipative Flow in Superfluid ^3He Films, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), Yokohama, Japan, 2010.3.9-12.
47. M. Morishita: Thermal Conductivity of ^3He Solid Films on Graphite in Weak Magnetic Fields, International Symposium on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2010) (Yokohama, March 9, 2010).
48. M. Morishita: Magnetization Measurements and Surface Observation of Grafoil Substrate, International Symposium on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2010) (Yokohama, March 9, 2010).
49. A. Kanda, H. Goto, H. Tomori, S. Tanaka, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, M. Hayashi, H. Yoshioka: Temperature dependence of proximity-induced supercurrent in single and multi-layer graphene, 2010 APS March Meeting, Portland, U.S.A., 2010. 3. 17.
50. M. Hayashi, H. Yoshioka, A. Kanda: Superconducting Proximity Effect in Monolayer and Bilayer Graphene: Critical Current and Pair amplitude, 2010 APS March Meeting, Portland, U.S.A., 2010. 3. 17.
51. H. Miyazaki, L. Songlin, T. Minari, A. Kanda, K. Tsukagoshi: Temperature dependence of conductance in bilayer graphene with electric-field-induced band gap, 2010 APS March Meeting, Portland, U.S.A., 2010. 3. 17.
52. A. Kanda, M.V. Milosevic, S. Hatsumi, Y. Ootuka, F.M. Peeters: Manipulation of quantum vortex states by local supercurrent injection into mesoscopic superconductors, 2010 APS March Meeting, Portland, U.S.A., 2010. 3. 16.

国内会議

1. 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.
2. 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.
3. 大塚洋一, 神田晶申, 塚越一仁: 固定電極にリンクしたナノスケール導体の電気伝導, ナノリンク分子の電気伝導第5回研究会, 松島(宮城), 2009.5.24-26
4. (招待講演) 神田晶申: ナノカーボン材料への電子・スピン注入と量子伝導, 次世代スーパーコンピュータプロジェクト ナノ分野グランドチャレンジ研究開発, ナノ統合拠点物性科学WG連続研究会, 「ナノ構造体の電気伝導」, 秋葉原コンベンションホール, 2009. 6. 30.
5. (招待講演) 神田晶申, 後藤秀徳, 塚越一仁: 劈開法で得た単層・多層グラフェンの電子・スピン・クーパー対伝導, 応用物理学会応用電子物性分科会研究例会「グラフェンの形成・基礎物性とデバイス展開」, 機械振興会館(東京), 2009. 7.17.
6. 海老名宏, 山岸徹, 斎藤政通, 大塚洋一: 微小トンネル接合型マイクロ SQUID 磁力計の開発, 第4回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), 2009.8.27
7. 黒田 隆, 初見 慎也, 大塚 洋一, 神田 晶申: メゾスコピック超伝導体における渦糸状態転移に対する欠陥の影響, 第4回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), 2009.8.27
8. 庄司 裕, 大塚洋一: 導電性高分子の低温電気伝導測定, 第4回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), 2009.8.27
9. 友利ひかり, 後藤秀徳, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: バリステックグラフェン接合の作製, 第4回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), 2009.8.27
10. 浦野 敬太, 大塚洋一: Break Junction 法を用いたグラファイトコンタクトの伝導測定, 第4回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), 2009.8.27
11. 宮崎久生, 小高隼介, 塚越一仁, 神田晶申, 青柳克信: 電場誘起のバンドギャップを持つ2層グラフェンにおける抵抗の温度依存性, 応用物理学会 2009 年度秋季講演会, 富山大学, 2009. 9. 8-11.
12. (招待講演) 神田晶申, 宮崎久生, 塚越一仁: グラフェントランジスタの電界効果, 応用物理学会 2009 年

- 度秋季講演会シンポジウム「新しいパイ電子系と高性能新型トランジスタ」, 富山大学, 2009. 9. 9.
13. 小久保伸人, 岡安悟, 神田晶申, 篠崎文重: 走査型 SQUID 顕微鏡で直接観測したアモルファス MoGe 円板の磁束状態, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 14. 林正彦, 神田晶申, 吉岡英生: 2 層グラフェンにおける超伝導近接効果, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 15. 後藤秀徳, 友利ひかり, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: 単層グラフェンの超伝導近接効果, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 16. 神田晶申, 林正彦, 吉岡英生, 後藤秀徳, 友利ひかり, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁: 電場下における多層グラフェンの特異な近接効果誘起超伝導転移, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 17. 友利ひかり, 後藤秀徳, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: バリステックグラフェン接合の作製と電気伝導測定, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 18. 山岸徹, 中嶋佑奈, 海老名宏, 大塚洋一: 微小トンネル接合小型 SQUID 磁力計の開発, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大, 2009.9.25
 19. 浦野敬太, 乾由美子, 大塚洋一: MBJ 法を用いたグラファイトナノコンタクトの伝導測定, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大, 2009.9.25
 20. 田中翔, 後藤秀徳, 友利ひかり, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: グラフェンにおける電気伝導の層数効果 II, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 21. 初見慎也, 黒田隆, 大塚洋一, 神田晶申: 正方形メソ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 II, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 22. 黒田隆, 初見慎也, 大塚洋一, 神田晶申: メソスコピック渦糸状態転移に対する欠陥の影響, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009. 9. 25-28.
 23. 斎藤政通, 池上弘樹, 河野公俊: 超流動 3He 薄膜臨界流の磁場依存, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009.9.28
 24. 斎藤政通, 池上弘樹, 河野公俊: 超流動 3He 薄膜臨界流の磁場依存性, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」若手秋の学校 2009, 阿蘇郡高森町, 2009.9.28-10.1
 25. 後藤秀徳, 友利ひかり, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: グラフェン多層膜におけるスピン伝導の電界制御, 東京大学物性研究所短期研究会“ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究”, 東京大学物性研究所, 2009. 10. 22-24.
 26. 友利ひかり, 後藤秀徳, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: バリステックグラフェン接合の作製と電気伝導測定, 東京大学物性研究所短期研究会“ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究”, 東京大学物性研究所, 2009. 10. 22-24.
 27. (招待講演) 神田晶申: グラフェンの超伝導近接効果, 東京大学物性研究所短期研究会“ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究”, 東京大学物性研究所, 2009. 10. 22-24.
 28. (招待講演) 神田晶申: グラフェンにおける超伝導近接効果, 第 2 回連携ミニ研究会(筑波大-KEK)「グラフェン・グラファイトとその周辺の物理」, 筑波大, 2009. 11. 27.
 29. 斎藤政通, 池上弘樹, 河野公俊: 超流動 3He 薄膜流における散逸の磁場依存性, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」 A04 班研究会, 和歌山県田辺市, 2009.12.11-13
 30. (依頼講演) 神田晶申: グラフェンにおけるクーパー対輸送のゲート電界効果, 東京工業大学セミナー, 東京工業大学本館 1 階 H115 講義室, 2009. 12. 22
 31. (依頼講演) 神田晶申: メソスコピック超伝導体における特殊な渦糸状態とその制御産総研セミナー, 産総研つくば中央第2事業所, 2010. 2.8.
 32. (招待講演) 神田晶申: グラフェンの基礎物性と応用の可能性, 社団法人未踏科学技術協会第 6 回バイオナノテクフォーラムイブニングセミナー21, 東京女子医科大学, 2010. 2. 19.
 33. 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申, 固定電極にリンクしたナノスケール導体の電気伝導, ナノリンク分子の電気伝導 領域会議, 東大(柏), 2010.3.1
 34. 斎藤政通, 海老名宏, 大塩寛紀, 大塚洋一: マイクロ SQUID 磁力計の開発と単分子磁石の磁化測定, 第 4 回ポリスケールテクノロジーワークショップ, 野田市, 2010.3.5
 35. 黒田隆, 初見慎也, 大塚洋一, 神田晶申, M.V. Milosevic, F.M. Peeters, 山口尚秀, 高野義彦: メソスコ

- ピック超伝導体における局所電流注入による巨大渦糸—多重渦糸状態間転移, 日本物理学会 2010 年年次大会, 岡山大学, 2010. 3. 20-23.
36. 後藤秀徳, 田中翔, 友利ひかり, 大塚洋一, 塚越一仁, 神田晶申: グラフェン多層膜の高電界下における電気伝導, 日本物理学会 2010 年年次大会, 岡山大学, 2010. 3. 20-23.
 37. 神田晶申, 後藤秀徳, 友利ひかり, 田中翔, 大塚洋一, 塚越一仁, 林正彦, 吉岡英生: 数層グラフェンにおける超伝導近接効果, 日本物理学会 2010 年年次大会, 岡山大学, 2010. 3. 20 -23.
 38. 伊藤宙陸, 古谷景佑, 柴田祐輔, 大塚洋一, 野村晋太郎, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大, 2010.3.20
 39. 庄司裕, 大塚洋一, イオン液体を用いた高濃度電界ドーピング, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大, 2010.3.20
 40. 浦野敬太, 大塚洋一, MBI 法による C60 架橋系のトンネルスペクトロスコピー, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大, 2010.3.21
 41. 海老名宏, 斎藤政通, 大塩寛紀, 大塚洋一: 微小トンネル接合小型 SQUID 磁力計による分子磁性体の磁化測定, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010.3.22

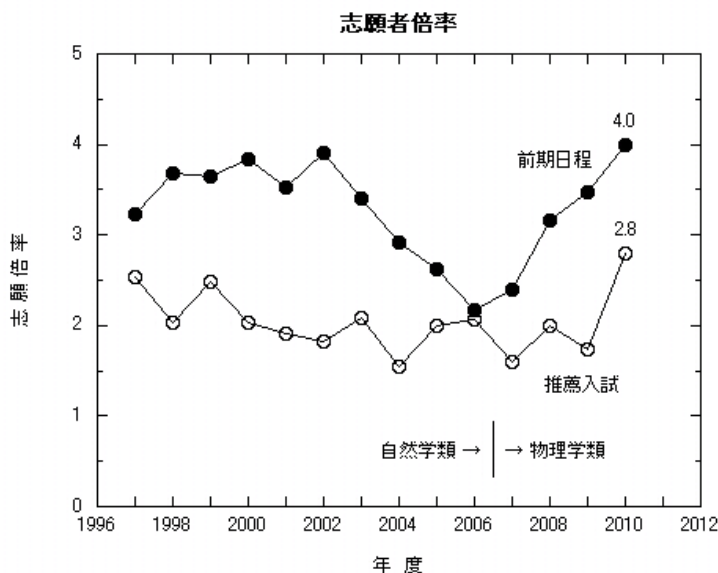
X 物理教育および物理教育の研究

【1】物理教育（中井直正）

物理学類が発足して3年目となり、4年生だけが自然学類物理学主専攻に所属し、1~3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、おおむね順調に推移している。

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。通常の講義に加えて、自分で試行錯誤しながら研究心や探究心を養うために1~3年生を対象として「課題探求実習」を正式科目とし、年間4課題程度で1課題当たり数人の学生で実施している。これをさらに全学生に拡大するかどうかを検討している。また1年生対象の「物理学A」や「物理学B」の講義と「物理学演習」の内容や進度の整合性を取る方策など継続的に授業の改善を図っている。

大学入試は、推薦入試において高校教育の過度の暗記から解放し「なぜだろう、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、教科書の持込を可とした。その結果として意図したわけではないが定員15名に対し志願者は42名と大幅に増加した（志願倍率2.8倍）。試験は大きな混乱もなく18名が合格し入学した。一般入試の前期日程は定員43名に対し、志願者は171人（志願倍率4.0倍）で物理学類になってから4年連続で単調増加となった（図）。受験者は168名で合格者は48名（実質倍率3.5倍）で、そのうち47名が入学した。志願者が増えている理由は、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、全国的に受験生の理学系への回帰現象が起きていること、物理学類として大学説明会を改善したことなどが考えられる（数学類や化学類も志願者を増やしている）。他にAC入試（定員2名）が志願者13名で合格者と入学者が2名、オリンピック特別入試が志願者2名で合格者と入学者が2名、私費外国人留学生特別選抜は志願者3名で合格者2名、入学者1名。韓国からの留学生（日韓）が1名であった。2学期推薦入試（帰国子女）は志願者が1名で合格し入学した。入学定員（60名）が割り振られているAC入試、推薦入試、一般入試前期日程の総合格者数は68名でうち67名が入学した。他の入試も含めた1年生への入学者数は71名である。また3年時への編入試験（若干名募集）は志願者12名で合格者が4名、入学者は2名であった。



【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は大学全体の大学説明会の翌日7月30日（木）に実施した。学類長からの学類の説明の後、理論に関する講義2件を開講し、物理学実験は4テーマのうち1つを希望にしたがって選択して行った。その後、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51名と多数の参加があった。アンケートによると満足度は3点満点で2.69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	物理学類長挨拶及び事務連絡	
9:50～10:10	物理学類説明（中井学類長）、実験内容説明、アンケート	
10:20～11:00	【講義1】 素粒子理論	（石橋延幸）
11:10～11:50	【講義2】 相対性理論と宇宙進化	（梅村雅之）
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 オシロスコープの使い方とコンピュータによる制御	（東山和幸）
	② 光の干渉と回折	（富本慎一）
	③ ガイガー・ミュラー計数管による放射線と宇宙線の測定	（鈴木 宏）
	④ 極低温	（大塚洋一）
15:30～16:15	在学生との懇談	
16:15～16:30	修了式（中井学類長）	
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。

【3】カリキュラム関係（初貝安弘）

夏休みに導入した物理学 AI、BI の再履修クラスは非常勤の先生の協力のもと、本年も順調に行われた。高校で物理学を未習の全学の学生に対して開講している総合科目「初めて学ぶ物理学 I, II, III」は「現代人のための科学 I」および「初めて学ぶ物理学 I, II」と変更しておこなった。また物理学類の学生向けの「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. 「光学望遠鏡で天体を測定する」（中井） 2. 「身の回りの物理」（小沢） 3. 「物質中にあるフラクタル・自己相似な図形を描く」（初貝）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前年度に引き続いて整備した。

また、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向けて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「自発的対称性の破れ-物質科学から素粒子宇宙物理学まで-」(教養の新たな世界を体験する)と題して素粒子物理(金)と物性物理(初貝)に関する講義の後、実習としての KEK、JAXA の見学を行った。

《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21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	3	4	1	2	3	13	9	1	{ 0 }	[6]	23 { 0 } [6]
宇宙理論	4	4	0	0	4	12	6	0	{ 1 }	[2]	18 { 1 } [2]
原子核理論	5	3	0	1	1	10	1	0	{ 0 }	[5]	11 { 0 } [5]
凝縮系理論	2	4	1	1	1	9	3	1	{ 0 }	[9]	13 { 0 } [9]
計算物性物理 (創)	2	2	1	1	1	7	4	0	{ 1 }	[3]	11 { 1 } [3]
計算生命理論	2	0	1	0	2	5	2	0	{ 0 }	[0]	7 { 0 } [0]
素粒子実験	6	10	2	0	1	19	6	0	{ 1 }	[18]	25 { 1 } [18]
宇宙観測	3	4	2	1	3	13	4	0	{ 1 }	[10]	17 { 1 } [10]
原子核高エネ	2	6	2	1	2	13	4	1	{ 1 }	[7]	18 { 1 } [7]
原子核低エネ	3	3	0	1	2	9	4	0	{ 0 }	[6]	13 { 0 } [6]
磁性物性	3	5	0	0	1	9	4	0	{ 0 }	[2]	13 { 0 } [2]
半導体物性 (創)	7	7	1	0	3	18	5	0	{ 1 }	[11]	23 { 1 } [11]
強相関物性	1	2	2	0	0	5	1	0	{ 0 }	[4]	6 { 0 } [4]
表面物性	0	0	0	0	0	0	1	0	{ 0 }	[0]	1 { 0 } [0]
低温物性	5	3	0	0	0	8	0	0	{ 0 }	[2]	8 { 0 } [2]
プラズマ	7	3	1	1	0	12	15	0	{ 0 }	[9]	27 { 0 } [9]
合 計	46	51	12	8	20	137	60	3	{ 4 }	[80]	200 { 4 } [80]
(創)	9	9	2	1	4	25	9	0	{ 2 }	[14]	34 { 2 } [14]

*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) 上田 悟 [青木 慎也]
Wilson Chiral Perturbation Theory for twisted mass lattice QCD
(ツイストされた質量を持った格子QCDに対するウィルソンカイラル摂動論の研究)
- 2) グェン ホアン オアン [宇川 彰]
Pion form factor from 2+1 dynamical flavor lattice QCD
(2 + 1 動的フレーバーの格子量子色力学からのパイ中間子形状因子)
- 3) 村野 啓子 [青木 慎也]
Energy dependence of nucleon-nucleon potentials from Lattice QCD
(格子QCDから求める核子間ポテンシャルのエネルギー依存性)
- 4) 秋月 千鶴 [梅村 雅之]
The Structure of a Slim Disk Outflow Explored by Three-Dimensional Radiation Transfer
(三次元輻射輸送から探るスリム円盤アウトフローの構造)
- 5) 佐久間 優 [梅村 雅之]
Feedback Effects of First Supernovae on the Subsequent Population III Star Formation
(連続的種族III星形成に対する初代超新星のフィードバック効果)
- 6) 佐藤 大介 [梅村 雅之]
The Effect of Partial Redistribution on the Escape of Lyman alpha Photons from Subgalactic Clouds
(銀河内ガス雲からのライマンアルファ光子の脱出における部分再分配の効果)
- 7) 矢島 秀伸 [梅村 雅之]
Ultraviolet Radiation Transfer in Dusty Primordial Galaxies
(ダスト形成中の原始銀河における紫外線輻射輸送)
- 8) 川下 洋輔 [矢花 一浩]
Real-time calculations for photo-induced phenomena in molecules based on time-dependent density functional theory
(時間依存密度汎関数法に基づく分子の光誘起現象に対する実時間計算)
- 9) 萩原 陽介 [舘野 賢]
Theoretical studies of functional mechanisms of biological macromolecules
(生体高分子の機能発現機構の理論的研究)

- 10) 永井 義一 [金 信弘]
 Search for the Standard Model Higgs Boson in the $WH \rightarrow l \nu b \bar{b}$ Channel 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 $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ 過程のヒッグス粒子探索)
- 11) 間明田 好一 [中井 直正]
 Study of the Water-Vapor Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of IC1481
 (IC1481の活動的銀河中心核における水蒸気メーザー円盤の研究)
- 12) 宮本 祐介 [中井 直正]
 Kinematics and Distribution of Molecular Gas in the Spiral Galaxy M51
 (渦巻銀河M51の分子ガスの運動と分布)
- 13) 山倉 鉄矢 [中井 直正]
 Development of THz band quasi-optical Hot-Electron Bolometer Mixer employing superconducting NbTiN microbridge
 (NbTiN超伝導細線を用いたテラヘルツ帯準光学ホットエレクトロンボロメータミキサの開発)
- 14) 高尾 健二郎 [小野田 雅重]
 Nuclear Magnetic Resonance Studies for the Triangular Lattice Systems $Li_{1-x}VO_2$ and $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$
 (三角格子系 $Li_{1-x}VO_2$ および $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$ の核磁気共鳴研究)

【博士論文】

<課程博士> [] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻

- 1) 大久保 雄太 [富田 章久]
 On the implementation of quantum information processing with linear optics
 (線形光学による量子情報処理技術の実装について)
- 2) 津村 公平 [野村 晋太郎]
 Optical investigations of modulation of the transport properties of superconductor/semiconductor junction and quantum interference effect in semiconductor two-dimensional system
 (光学的手法による超伝道体/半導体接合に於ける輸送特性変調と半導体二次元系中量子干渉効果の研究)
- 3) 伊藤 宙陸 [野村 晋太郎]
 Study of electronic properties of semiconductor heterostructures by a dilution-refrigerator based near-field optical microscope in magnetic field
 (希釈冷凍機温度磁場中近接場光学顕微鏡による半導体ヘテロ構造の電子状態の研究)

【博士論文】

<論文博士> [] 内は指導教員名
数理物質科学研究科 物理学専攻

1) 下村 真弥 [三明 康郎]

**Systematic Study of Azimuthal Anisotropy for Charged Hadron
in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at RHIC-PHENIX**

(RHIC-PHENIX実験での相対論的原子核衝突における荷電ハドロンの方角異方性について
の系統的な研究)

【修士論文】

<博士課程修士> [] 内は指導教員名

数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 齋藤 華 [吉江 友照]
クォーク質量が大きい領域での QCD 有限温度相転移の次数に関する研究
- 2) 渡邊 龍祐 [石塚 成人]
カイラル摂動論による 2 体パイ中間子ポテンシャルの研究
- 3) 青山 浩之 [梅村 雅之]
高赤方偏移ガンマー線バーストによる宇宙背景放射の減衰
- 4) 笹倉 啓介 [矢花 一浩]
TDHFB 法による核内対相関と原子核の非線形振動運動の研究
- 5) 篠原 康 [矢花 一浩]
時間依存密度汎関数理論に基づくコヒーレントフォノン生成メカニズムに関する研究
- 6) 村山 聖 [矢花 一浩]
原子核の負パリティ励起状態の系統的研究
- 7) 磯崎 健太 [谷口 伸彦]
量子ドット系のファノ近藤効果と電荷・スピン制御性の理論的研究
- 8) 白岩 智 [宮崎 州正]
コロイド分散系のガラス転移
- 9) 棚谷 翔 [初貝 安弘]
スピン液体相におけるベリー一位相の Z_2 量子化の数値的研究
- 10) 金 海英 [金 信弘]
遠赤外線光子検出のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器の開発研究
- 11) 河内山 真美 [受川 史彦]
TCAD シミュレーションによる SOI ピクセル検出器の放射線損傷評価
- 12) 瀬賀 智子 [受川 史彦]
埋め込み p 型ウェル構造をもつ SOI ピクセル検出器の放射線耐性の研究
- 13) 高橋 優介 [受川 史彦]
リニアコライダー実験用細分割カロリメータに用いられる光検出器 MPPC の長期安定性の研究
- 14) 塙 慶太 [受川 史彦]
 Z^0 ボソンの崩壊事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の運動量再構成精度の評価

- 15) 林 隆康〔受川 史彦〕
ATLAS 実験における W+jets 事象のシミュレーションによる研究
- 16) 深見 智代〔金 信弘〕
CDF 実験 TOF 測定器に用いられる光電子増倍管の長期耐久性の研究
- 17) 松隈 恭子〔金 信弘〕
光子コンバージョン事象を用いた ATLAS 内部飛跡検出器の物質評価
- 18) 三井 真吾〔金 信弘〕
Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーのバルク部の放射線損傷
- 19) 山田 美帆〔金 信弘〕
Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーの陽子線・ γ 線照射による放射線損傷の評価
- 20) 秋山 大樹〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡による系外銀河中心部のアンモニア観測
- 21) 粉川 慶太〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯における両偏波観測用受信機の開発
- 22) 野々川 博晃〔中井 直正〕
つくば 32m 電波望遠鏡による電離領域 W49N の観測的研究
- 23) 前橋 秀紀〔中井 直正〕
南極 30 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の電波ポインティングシステムの開発
- 24) 生山 友博〔新井 一郎〕
銅クラスター陽イオンと硫化水素との反応についての研究
- 25) 小川 賢一郎〔小沢 顕〕
RI ビームのエネルギー損失測定用傾斜電極型電離箱の性能評価
- 26) 伊藤 由太〔小沢 顕〕
RI 蓄積リングの磁場校正のためのクラスターイオン源の開発
- 27) 梶谷 緑〔三明 康郎〕
RHIC-PHENIX $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 陽子-陽子衝突実験における累積方位角相関と平均横運動量の粒子多重度依存性の研究
- 28) 木村 瑞希〔江角 晋一〕
核子対当たり重心系衝突エネルギー 200GeV での銅-銅衝突における荷電二粒子相関のジェット分布測定
- 29) 轟木 貴人〔三明 康郎〕
 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金・金衝突における包括光子-ハドロン相関の反応平面及びラピディティ依存性の研究

- 30) 浜田 英太郎 [江角 晋一]
RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における多粒子相関の反応平面依存性を用いたパートン-QGP 間相互作用の研究
- 31) 横山 広樹 [三明 康郎]
LHC-ALICE 実験における QGP 研究のためのクォーク/グルーオン・ジェット識別能力の評価
- 32) 石川 尚志 [小野田 雅重]
低次元伝導性複合結晶 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ の元素置換効果
- 33) 齊藤 佑弥 [小野田 雅重]
三角格子系 Li_xCoO_2 ($x \approx 1$) の核磁気共鳴
- 34) 塚原 修一 [小野田 雅重]
ペロブスカイト系 SrTiO_3 の金属-バンド絶縁体境界近傍の熱電特性
- 35) 阿部 雄太 [守友 浩]
アルカリ金属置換/圧力印加によるシアノ錯体の相制御の研究
- 36) 五十嵐 一泰 [守友 浩]
Co-Fe シアノ錯体におけるホールドープによる物性制御
- 37) 初見 慎也 [大塚 洋一]
メゾスコピック超伝導体における局所電流注入による量子渦糸状態の制御
- 38) 今井 寧央 [吉川 正志]
GAMMA10 センtral部における電子密度分布及び揺動の閉じ込め電位依存性
- 39) 大野 洋平 [吉川 正志]
金中性粒子ビームプローブを用いた GAMMA10 プラズマの東西可変式リミター径依存の研究

【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) 大竹 朗〔白石 賢二〕
窒化シリコン膜中の電荷トラップ欠陥に異種元素が与える影響の理論的研究
- 2) 小池 美知太郎〔白石 賢二〕
二酸化シリコン膜中の酸素空孔欠陥の第一原理計算による考察
- 3) 川名 啓介〔舛本 泰章〕
チャージチューナブル InP 量子ドットにおけるスピン偏極
- 4) 野澤 伸介〔舛本 泰章〕
II-VI族半導体とその量子構造におけるスピンの時間分解カー回転法による研究
- 5) 吉田 清太郎〔舛本 泰章〕
フォトンエコーによる単層ディスク状 InAs 量子ドットの研究
- 6) 渡邊 真人〔舛本 泰章〕
窒素をドーブしたIII-V族化合物半導体中の単一不純物発光中心の研究
- 7) 柴田 祐輔〔野村 晋太郎〕
2ch-ナノ SQUID を用いた局所磁場観察のための測定系開発と評価

物理学セミナー

平成21年度

	開催日	講師	題目
第1回	9月2日	中井 直正 (宇宙観測)	パルサーの発見と重力波の検出から学ぶこと
第2回	9月9日	富本 慎一 (物性実験)	半導体量子構造におけるスピンドYNAMICS
第3回	9月16日	青木 慎也 (素粒子理論)	量子色力学による核力の理解に向けて
第4回	9月30日	岡本 崇 (宇宙理論)	銀河形成の物理
第5回	10月7日	有光 敏彦 (凝縮系理論)	非平衡定常状態を記述する新しい統計力学の構築---充分発達した乱流を題材として---
第6回	10月14日	原 和彦 (素粒子実験)	LHCでのATLAS実験
第7回	10月21日	濱松 清隆 (連携大学院) (プラズマ)	核融合プラズマにおける高速粒子閉じ込め研究
第8回	10月28日	和田 道治 (連携大学院) (原子核実験)	精密測定が切り開く新しい物理
第9回	11月18日	矢花 一浩 (原子核理論)	フェルミ多粒子系ダイNAMICSの第一原理計算

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 4,235,700 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
710,768 円

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額(千円)
特定領域研究 計	教授	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	17,200
" 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	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	700
" 公	教授	守友 浩	20045001	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	2,300
" 計	准教授	岡田 晋	19054002	ナノチューブ複合構造体の物性解明と物質設計	1,300
" 公	准教授	北條 仁士	20026003	相対論効果を考慮したITERスケールプラズマの反射法シミュレーション研究	1,000
" 公	准教授	宮崎 州正	21015001	コロイド系のガラス転移と非線形レオロジー	1,900
" 公	助教	久保 敦	21020006	表面プラズモンポラリトンの顕微鏡フェムト秒ダイナミクス	2,100
" 公	助教	斎藤 政通	20029022	超流動ヘリウム3薄膜における境界効果と不均一超流動相の研究	2,800
新学術領域研究 総	教授	青木 慎也	20105001	素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明	3,800
" 計	准教授	野村 晋太郎	20104005	低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測	16,900
基盤研究(S)	教授	宇川 彰	18104005	超並列クラスタ計算機による計算素粒子物理学の展開	18,600
"	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	27,000
"	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	23,600
基盤基盤(A) 一般	教授	中井 直正	20244011	天の川のアンモニア掃天観測	4,500
" "	教授	舛本 泰章	20244044	人工原子の量子光学とスピン緩和の研究	15,200
" "	教授	守友 浩	21244052	シアノ架橋金属錯体界面を通じた物質移動と電圧誘起機能	15,000
" "	准教授	森 正夫	21244013	理論と観測の融合による銀河発生学の探究	4,400
" "	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	5,700
基盤研究(B) 一般	教授	青木 慎也	20340047	格子量子色力学による核力の研究	4,600
" "	教授	金谷 和至	21340049	物理的クォーク質量における有限温度・有限密度QCDの格子研究	2,300
" "	教授	初貝 安弘	20340098	対称性の破れを伴わない量子液体相：幾何学的位相による理論とその応用	4,200
" "	准教授	舘野 賢	21340108	生体反応の量子ハイブリッド分子動力学シミュレーション	4,100
" "	准教授	野村 晋太郎	21340076	光ゲート法による過渡的量子輸送現象の解明	10,000
" "	講師	笹 公和	21310004	加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確率	8,200
基盤研究(C) 一般	教授	石橋 延幸	20540247	D-ブレーンと閉じた弦の場の理論	600
" "	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
" "	准教授	宮崎 州正	21540416	過冷却液体のスローダイナミクスと動的不均一性	1,400
" "	講師	小松原 哲郎	21540295	銀河系ガンマ線A1-26の天体起源の解明	2,100

研究種目	職名	研究代表者	課題番号	研究題目	金額(千円)
基盤研究(C) 一般	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	1,400
〃	〃	准教授 石塚 成人	20540248	格子QCDによる共鳴状態の研究	900
挑戦的萌芽研究	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	1,300
〃	講師	吉川 耕司	21654026	6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション	1,100
若手研究(B)	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	600
〃	講師	武内 勇司	20740122	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	700
〃	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	1,600
〃	助教	佐藤 勇二	21740158	可解構造に基づいた重力理論/ゲージ理論双対性の研究	1,000
〃	準研	船木 靖郎	21740209	原子核におけるガスのクラスター構造、及びクラスターによる量子凝縮状態の研究	900
〃	研究員	有川 晃弘	21740281	量子可解模型の相関関数と動力学	900
				合計	262,900

※ 網掛けは計算センターより申請・交付

平成21年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	研究員	山崎 剛	日本物理学会 第四回若手奨励賞(素粒子論領域)	格子QCD数値計算によるK中間子崩壊過程の解析	3月

平成21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	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性半導体量子素子の創出	3,900,000
3	教授	守友 浩	文部科学省	物質のフェムト秒物理・化学現象解析のためのX線散乱計測技術(フェムト秒時間分解顕微鏡の構築と光応答性物質の探索)	3,000,000
4	講師	笹 公和	文部科学省	極微量放射性核種AMSによる施設環境モニタリング研究	9,999,483
5	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構	高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明	3,858,000
6	准教授	岡田 晋	(独)科学技術振興機構	グラファイト複合構造体の基礎物性解明とデバイス設計指針の開発	2,600,000
合計					31,157,483

平成21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	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性の発現」に対する研究助成	1,000,000
合計					1,000,000

平成21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	12,289,000
合計					12,289,000

役 務 分 担

平成 2 1 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	小野田雅重
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）	小沢顕，吉川耕司
（2年）	吉江友照，武内勇司
（3年）	守友浩，岡田晋
（4年）	今井剛，橋本幸男
自然学類就職委員	今井剛，橋本幸男
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：小沢顕，吉川耕司
学類学生委員会	小沢顕，吉川耕司
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21.4.1～平22.3.31)

【物理学系に來られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
SCHURY Peter Henry	講師	平21.4.1	理化学研究所山崎原子物理研究室 協力研究員
鈴木 宏	助教	平21.4.1	理化学研究所 リサーチアソシエイト
船木 靖郎	準研究員	平21.4.1	理化学研究所 基礎科学特別研究員
岩田 潤一	助教	平21.6.1	計算科学研究センター研究員
斎藤 政通	助教	平21.7.1	理化学研究所 協力研究員
長江 大輔	準研究員	平21.8.16	日本原子力研究開発機構 博士研究員
佐藤 構二	講師	平21.9.1	米国フェルミ国立研究所 リサーチアソシエイト
川勝 望	助教	平21.12.1	国立天文台学振特別研究員(PD)

【物理学系を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
北條 仁士	准教授	平21.10.24	死亡
永井 誠	準研究員	平21.3.31	高エネルギー加速器研究機構 素粒子 原子核研究所CMBグループ・研究員

物理学系構成員

2009. 4. 1～2010. 3. 31

		教授	准教授	講師	助教	準研	技術
理 論	素粒子	青木(慎) [計七] 石橋 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] 川勝		
	原子核	矢花 [計七]	丸山 [連携・物理]	橋本 [計七]		船木	
	物性	有光 白石 [計七] 初貝	岡田 [計七] 館野 [計七] 谷口(伸) 宮崎		吉田 岩田 [計七]		
実 験	素粒子	受川 金 新井 [客員・物理]		佐藤(構) 武内 原			
	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] Schury 中條	鈴木	長江	加藤
	磁性物性		小野田				
	半導体物性	舛本 蔡 [連携・物質創成] 富田 [連携・物質創成]	池沢 野村 二瓶 [連携・物質創成]		富本		
	強相関物性	守友	川本 [連携・物理]		上岡 [学際七]		
	表面物性			東山	久保		
	低温物性	大塚 [学際七長]	神田		斎藤 [学際七] 森下		
プラズマ	今井 [フセ長] 坂本 [連携・物理] 藤田 [連携・物理] 濱松 [連携・物理]	假家 中嶋 [フセ] 北條 [フセ] 吉川(正)	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

2009（平成21）年度

発行 2010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