

領域略称名：新ハドロン
領域番号：2104

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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」

平成21年度～平成25年度

平成26年6月

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・現象解析研究センター
教授・飯嶋 徹

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	4
3. 研究領域の設定目的の達成度	6
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	9
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	10
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	11
7. 総括班評価者による評価	12
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	18
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	25

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

本領域では、これまで独立に研究を進めてきた素粒子・原子核分野の実験研究者と理論研究者が結集し、クォークと反クォークから成るメソンやクォーク 3 個からなるバリオンとしては理解できないエキゾチックハドロンの成り立ちと、物質中でハドロン質量が変化する機構を実験的に確立し、QCD の動力学によってクォークからハドロンが形成される機構の解明を目指す。

【研究の学術的背景】

現在観測されている物質の最小単位はクォークとレプトンである。クォークは量子色力学(QCD)に支配され、ゲージ場であるグルーオンを媒介し強い相互作用をする。その結果現在の冷えた宇宙ではクォークはハドロンを形成し原子核を構成する。ハドロン形成の過程でクォークが束縛される際には、カラーの閉じ込め、質量の生成、カイラル対称性の自発的な破れという豊かな力学過程を伴う。これらに類似の事象は様々な物理系で見られ、ミクロな世界を支配する法則から多様性に富んだマクロ現象を理解する際には不可欠、かつ現代物理学の根幹をなす概念である。これら QCD の非摂動事象は現在スーパーコンピュータを用いた数値実験により確認されつつあるが、その詳細な動的メカニズムは解明されていない。さらに、経験的には構成クォーク模型が成功を収め、20 世紀の加速器実験で発見されたハドロンは殆ど全てがクォークと反クォークのメソン ($q\bar{q}$) と、3 クォークのバリオン (qqq) に分類されているが、他の配位が強く抑制される理由についての QCD に基づいた理解は得られていない。構成クォークはカイラル対称性が自発的に破れた世界での準粒子であり、「構成クォークがどのように質量を獲得し相互作用をするのか、そしてどのようなハドロンを作り得るのか」といった疑問を解き明かすことにより、物質形成の根幹に関わる疑問に答えることができる。その際、質量を異にするフレーバーや温度・密度等の環境を変えることができれば、強力な研究手段となり得る。

この様な背景の元、上記の疑問に突破口を開く発見が 21 世紀に入って日本の実験研究から次々に得られた。まず、LEPS 実験で、ストレンジクォークを含むクォーク 5 つを必要とするエキゾチックバリオン Θ^+ (ペンタクォーク) が発見され、2008 年にはその再確認結果が発表された (Phys. Rev. C79(2009)025210)。さらに、Belle 実験ではチャームクォークの領域で、X(3872)に始まり非 $c\bar{c}$ 中間子の候補が次々に発見された。中でも 2007 年に発見された電荷を持つ Z(4430)⁺は $c\bar{c}u\bar{d}$ の配位をもつエキゾチックメソン (テトラクォーク) の候補である (Phys. Rev. Lett. 100(2008)142001)。さらに、E325 実験 (ϕ 実験) では、原子核中でのベクター中間子 (ρ , ω , ϕ) の質量減少を世界に先駆けて観測し、カイラル対称性が有限密度中で部分的に回復するという初田・国広等による理論の予言が実証されつつある。理論研究では、クォーク模型によるハドロン分光と相互作用、カイラル対称性に基づいた動力学、格子 QCD による数値実験の研究で世界を牽引する成果をあげてきた。これらの研究の源には湯川のパイ中間子予言と南部による自発的対称性の破れの研究があることは言うまでもなく、ハドロン物理学の分野でわが国は長年にわたり世界をリードしてきたといえる。本研究領域ではこれまでの成果の発展を図り、多彩なフレーバーを持つハドロンの研究を展開し、上記の物質形成の根幹に関わる諸問題に取り組む。

【具体的な研究目的・全体構想】

計画研究 A01 では、KEKB/Belle 実験において、チャーム及びボトムクォークを構成子に含むエキゾチックハドロンの探索を網羅的に行い、主として 4 クォーク状態の理解を進める。X(3872)等が発見された B 中間子の崩壊過程だけでなく、電子・陽電子及び光子・光子衝突などの様々な過程で生成される粒子の探索と測定を組織的かつ効率的に進め、その全貌を明らかにする。そして、見つかった新粒子の性質 (崩壊モードやスピン・パリティ) を測定し、それらがどのような状態であるか (テトラクォーク、分子構造、ハイブリッドなど) の理解を進める。

一方、計画研究 B01 では、SPring-8 の LEPS 実験において、ストレンジクォークを構成クォークとする

ペンタクォーク Θ^+ や、メソン・バリオン共鳴に焦点を絞った研究によって、主に 5 クォーク状態の理解を進め、LEPS2 や J-PARC における実験に展開する。ペンタクォーク Θ^+ については、生成から崩壊までを一貫して調べ、質量、幅、内部量子数を決定し、 Θ^+ の生成反応機構を解明する。さらに、メソン・バリオン共鳴とされる $\Lambda(1405)$ などの異状ハドロンに焦点を当てる。

計画研究 C01 では、J-PARC に大立体角の電子対測定用スペクトロメータを建設し、有限な原子核密度下でのベクター中間子の質量減少と崩壊幅増大の系統的測定(原子核物質サイズ依存性、運動量依存性)を行い、この質量変化がカイラル対称性の回復によるものであるか否かを確定する。

計画研究 D01 では、以上の 3 実験計画研究の横糸として、将来の高輝度実験に向けて共通に必要な、粒子識別装置、バーテックス検出器、高速飛跡検出器、高速データ収集システムなどの開発研究を行う。そして、A01 による物理解析成果と D01 による検出器開発成果をもとに、B ファクトリー実験の検出器改良と粒子識別装置を中心とする検出器の製作を進め、将来の高輝度 B ファクトリー実験につなげる。また、B01 と D01、C01 と D01 の連携によって、コライダー実験用に培われた測定器技術を LEPS/J-PARC 等の固定標的実験へ導入することを図る。

理論計画研究 E01 では、本領域の実験研究で得られるデータを、多彩なフレーバーを持つハドロン物理という一貫した視点で捉え、量子色力学 (QCD) に基づいた理論研究を展開する。従来のクォークモデルでは説明困難なエキゾチック状態の構造・反応と、核物質中におけるハドロンの性質変化を集中的に解明する。A01 と B01 で得られる実験データをもとにマルチクォーク系のダイナミクスを明らかにするとともに、C01 で期待されるハドロンの質量変化のデータをもとにカイラル対称性の自発的破れに基づいたハドロン質量生成の起源を明らかにする。格子 QCD と実験結果を反映させることで有効理論の精度を上げ、未知の現象を予言し新たな実験を提案する。

【我が国の学術水準の向上・強化につながる点】

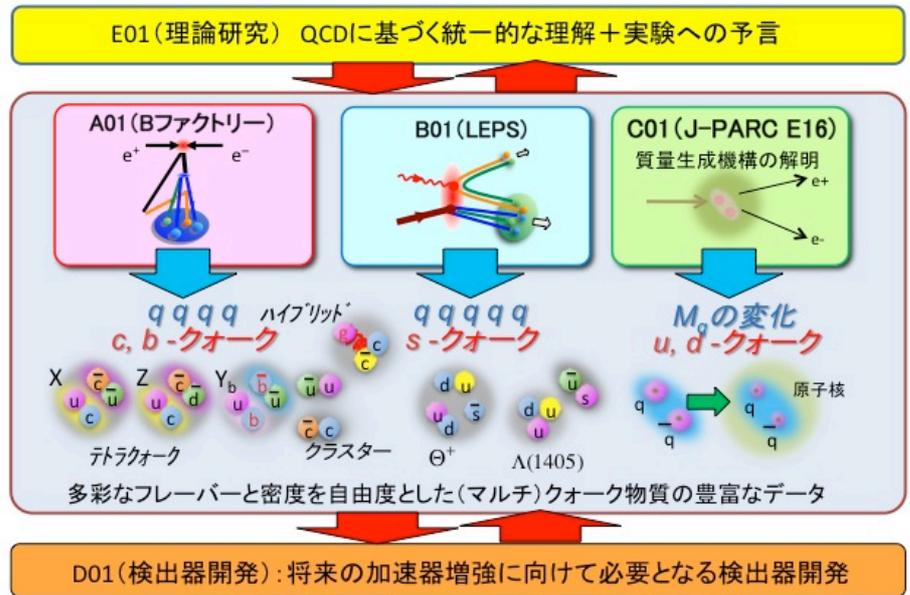
本領域の研究により、ペンタクォークやテトラクォーク状態が確立しその構造が明らかになれば、これまでのクォークモデルに基盤をおいたメソンとバリオンの描像を超える全く新しい物質の存在形態が確立することとなる。そして、本領域の研究を引き金に高輝度 B ファクトリー、LEPS2、J-PARC における実験研究が発展すれば、クォークの閉じ込めと質量生成機構の解明にむけた研究が飛躍的に進む。このことによって、素粒子と核物理学の間に新たな学問領域が創出できる。近年のハドロン物理では、既述のとおり日本のグループが世界をリードして行く中、B ファクトリー、SPring-8、J-PARC における実験には多くの海外研究者が参加している。本領域の推進は、この研究分野における日本の役割を高め、基礎物理学に対する国際的な貢献を強化することにつながる。

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

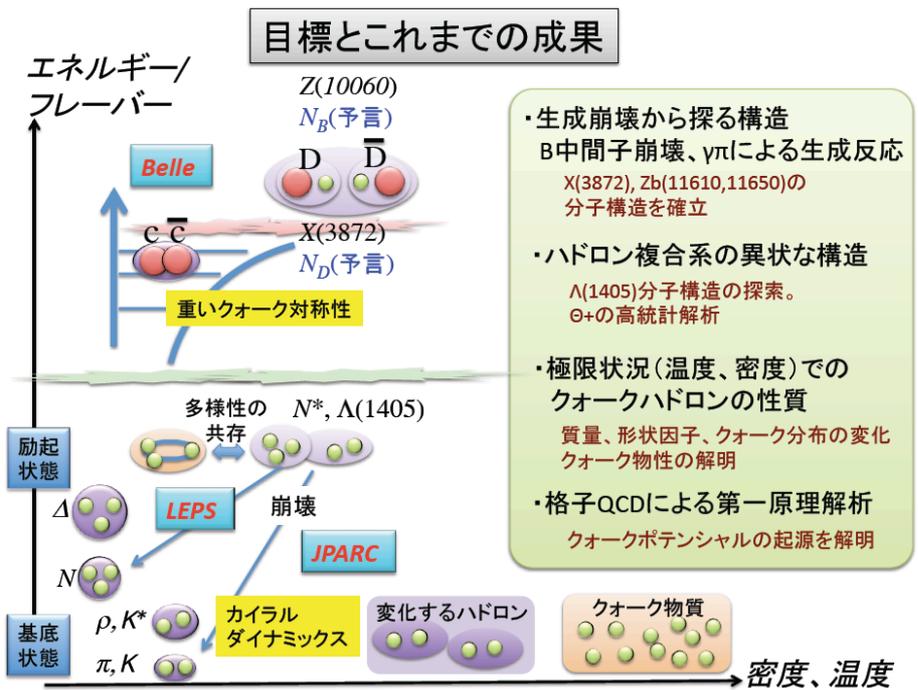
研究組織

本領域研究では、総括班の統括のもと、各計画研究班が有機的に配置された。その概念図を右に示す。A01, B01, C01 からなる加速器実験施設を拠点とした実験研究、それらに共通する測定器開発を担当する D01、そして、QCD に基づいたハドロン研究を行う理論班 E01 から構成された。領域研究実施期間中 2 度公募研究を採択し（前期 17 件、後期 10 件）、各計画研究に関連しつつカバーしきれない研究、独創的・萌芽的な研究を支援した。



計画研究の連携状況

実験研究計画研究班では、A01 における重いフレーバー領域におけるエキゾチックハドロンの探索、B01 では軽いフレーバー領域におけるエキゾチックハドロンの構造の探索、C01 ではハドロン質量の起源に代表されるダイナミクスの探索、というそれぞれ異なる観点に基づいた研究が実施された。右の図にその概念図を示す。本領域の目指す「多彩なフレーバー」に関して、A01 では重いフレーバー、B01, C01 では軽いフレーバーの現象が重点的に探索された。得られた結果は E01 の理論研究班との連携のもと物理の議論がなされた。その結果、重いフレーバーの投入がエキゾチック状態の形成に役割を果たしていること(重いクォーク対称性)、またその基盤となる相互作用は軽いクォークのダイナミクス(カイラルダイナミクス)が決めていることが明らかになった。これにより Belle が最初に発見した X(3872), Zb(11610,11650)が、ハドロン分子状態であることが裏付けられた(概念図に示した)。



結果、重いフレーバーの投入がエキゾチック状態の形成に役割を果たしていること(重いクォーク対称性)、またその基盤となる相互作用は軽いクォークのダイナミクス(カイラルダイナミクス)が決めていることが明らかになった。これにより Belle が最初に発見した X(3872), Zb(11610,11650)が、ハドロン分子状態であることが裏付けられた(概念図に示した)。

人的交流の成果として、以下の事例をあげることが出来る。A01 では素粒子実験研究者が中心になって KEK/Belle を拠点としたエキゾチックハドロンの探索が行われたが、そこに B01, C01 を構成する原子核ハドロンの実験研究者が参画する Belle/NPC コンソーシアムを立ち上げた。これは本領域研究の連携成果のうち最も顕著なものである。さらにこのコンソーシアムには、理論研究者も参画するなどして、従来の研究者の垣根を外して、多くの研究者の交流が実現された。それにより、個々の研究プロジェクトに参画する人材数におい

ても、顕著な増加があり、それによりすでに研究成果が報告されるに至った。

公募研究との連携状況

公募研究は領域研究の直接の成果にとらわれることなく、関連研究を自由な発想の元に行うことで、広い観点から領域研究の発展に資するものとした。各計画研究における公募研究との連携は以下の通り。

[A01]：反ニュートリノ・原子核散乱におけるチャームクォークを含むペンタクォークの探索。B 中間子崩壊における a_1 中間子や K_1 中間子の三体崩壊。これらは計画研究と相補的に進められほぼ目標とした成果が得られた。

[B01]：本計画研究により大立体角検出器の建設が進んだ。計画研究 D01 班や公募研究との連携により、2つの新型高速応答検出器、Time-Of-Propagation(TOP)検出器と Resistive Plate Chamber (RPC)、の開発が進められた。TOP は大立体角検出器における実用性が確認され、RPC は LEPS2 施設において実用化されている。

[C01]：E16 実験に kaon 同定能力を加える検出器の開発がおこなわれた。また、D01 の公募研究で開発されたエアロジェルの η' 中間子原子核探索実験への応用がおこなわれた。

[D01]：A01, B01, C01 の三研究で広く活用できる技術開発として、超高屈折率エアロジェル輻射体の開発、ポータブルデータ収集システムの開発、低消費電力パイプライン ADC を開発した。また、LHC に設置する検出器の開発も進めた。

[E01]：物質中におけるハドロンの性質、原子核の多体問題理論を用いたハドロン物理への応用、重いクォークの対称性を利用した励起状態の分類などの研究で進展が見られた。U(1)A 対称性の破れに関しては Spring-8 の次期計画の中心課題にとり上げられた。

総括班企画事業

総括班は、計画研究班、公募研究、関連する研究者間の交流を確実にするために、以下の事業を行った。

- ①. ハドロンスクエア：数ヶ月に1度の割合で、ハドロン物理関係者によるセミナー交流を行った。理論と実験研究の最新の進捗状況が報告され、それまでの達成状況を整理し、次の段階に向けた議論が効果的に行われた。20名程度の比較的少人数の参加により、テーマを絞って集中的に議論を行った。
- ②. 定期研究会：年度末に、各計画研究と公募研究の進捗状況と、関連分野の研究者による招待講演を交えた研究会を行った。報告と共に、最新情報を共有し次年度に向けた検討を行った。
- ③. クロスオーバー研究会：ハドロン物理の研究には多岐に渡る研究アプローチが必要になる。この観点に基づいて、計算科学分野との交流を企画した。理論研究に重点が置かれたが、実験研究者も交えて意見交換は、計算科学分野にとっても有益であった。その発展形として、世界各国から格子 QCD と有効理論の専門家による滞在型の研究会が 2015 年に京大基研で行われる予定。
- ④. 国際会議 HADRON2013：領域開催期間中最後の年度に、世界のハドロン研究者が集結し新ハドロン研究を総括する、国際研究集会を開催した。世界の主要実験施設からの最新の実験結果を携えた実験研究者と共に、理論研究の第一人者を招待することができた。本領域の計画研究の成果が発表されると共に、公募研究の研究者にも積極的な参加を促すことで、領域全体と世界の研究者との交流が実現できた。
- ⑤. サマースクール：主として理論研究班担当で行ったが、講義の半分は実験研究者によるものとし、実験研究者との交流を図った。実践形式の演習では理論研究の題材を主としつつ、実験データとの接点を重視し、若手実験研究者の参加を促した。また A01 班の協力のもと、建設中の KEK Belle2 見学を実施した。

3. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

本領域は、KEK B ファクトリー実験における X(3872)や Z(4430)⁺をはじめとするエキゾチックハドロンの相次ぐ発見や SPring-8 の LEPS 実験によるペンタクォーク候補 Θ^+ の報告を契機として、これまで独立に研究を進めてきた素粒子・原子核の研究者が結集して開始したものである。

その結果、B ファクトリー実験においては、本領域開始後に 11 種類もの新しいハドロ粒子が見つかり、エキゾチック状態の候補は以前に見つかったものも含めて 20 種類に達した。その中にはボトムクォークを構成粒子とするものも発見され、ストレンジネスからボトムクォーク領域の広いエネルギースケールでハドロ分光学を系統的に捉え直す道が開けた。特に、ボトム・反ボトムクォーク対を含む $Z_b(10610)$ と $Z_b(10650)$ の発見は特筆すべき成果であり、理論研究によって、これらの新粒子が各々 $B\cdot B^*$ と $B^*\cdot B^*$ の分子状態と解釈できることが確実となった。さらに、 Z_b が発見されたのと同じ反応パターンで Z(3895)⁺が見つかったことや、X(3872)に関する理論的考察の深まりにより、これらもまた $D\cdot D^*$ の分子状態である可能性が高まった。これはまさに「多彩なフレーバー」によりエキゾチック状態の本質を系統的に探ろうとする本領域のアプローチによる顕著な成果と言ってよい。一方、 Θ^+ については、従来の 2.6 倍の統計によるデータ解析結果を得た。 Θ^+ の存否は未だ決着していないが、反応終状態の選別が重要であることが判明し、実験セットアップを改良した今後のデータ収集でより明快な結果が得られるものと期待される（下記の[B01]の報告参照）。

また、本領域を契機として素粒子-原子核両分野の研究者の本格的な連携が始まった。特に、Belle NPC (Nuclear Physics Consortium) による核物理研究者の B ファクトリー実験データ解析への参入、スーパーB ファクトリー実験用に開発した TOP 検出器等の技術の LEPS/LEPS2 や J-PARC 実験への応用、さらに理論面では、「素核宇宙融合」領域との共催で開催した「クロスオーバー研究会」を契機とする現象論と格子 QCD 計算との連携など、具体性を持った本格的な連携が進んだ。

このように素粒子-原子核分野の本格的連携によって、軽クォークから重クォークまでの多彩なフレーバー自由度を駆使した新しいハドロ物理学が開拓できたと考える。このことは総括班が主催した領域評価委員会においても高く評価されている。

以下に各計画研究の達成度について述べる。

[A01]

計画研究 A01 では世界最高輝度を誇る高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子衝突型加速器における B ファクトリー実験(Belle 実験)で蓄積された高統計データを解析し、新たなエキゾチックハドロンの探索とその性質の体系的な解明を中心とした新しい観点でのハドロ物理解析を展開することが目標であった。

Belle では、エキゾチックメソン(4 個のクォークより成るテトラクォーク)の候補 X(3872)を世界で初めて発見し、B ファクトリーのデータがハドロ物理の新しい領域を拓くことを示し世界中の注目を浴びた。エキゾチックメソン候補は、その後も B 中間子崩壊および電子・陽電子衝突過程などに見いだされ、電荷を持つ Z(4430)⁺の発見により確定的なものとなった。このように、Belle 実験は、重いフレーバーのエキゾチックメソンの研究でも世界をリードしてきたが、今までこれらの解析に携わってきた研究者の経験を生かすとともに新たに参加した原子核分野の研究者や他の計画研究の研究者と連携し、重いフレーバーのメソンを中心として、軽いフレーバーやバリオンなどの研究も積極的に進めた。

本研究の 5 年間で、X(4360), Y(3915), Z(3895)等のチャーム・反チャームクォーク対を含む新粒子のみならず、 $h_b(1P/2P)$, $\eta_b(2S)$, $Z_b(10610/10650)$ 等のボトム・反ボトムクォーク対を含む新粒子も発見され、合計 11 個の新しいハドロ粒子が発見された。そのうちエキゾチック粒子はそれ以前に発見されたものを含めて約 20 個に達し、エキゾチックハドロンの本質の系統的な理解への道が開けてきた。

さらに、チャームクォークをストレンジクォークに置き換えた反応過程、始状態輻射 $e^+e^- \rightarrow \phi \pi^+\pi^-$ や二光子衝突による $\phi\omega$ や $\phi\phi$ 生成を用いてストレンジクォークを含むエキゾチックハドロンの探索を行った。

また、原子核分野の研究者との連携を深め Belle データによる幅広いハドロ物理の解析が推進され、電子・

陽電子衝突によるストレンジバリオンおよびチャームバリオン生成断面積を系統的に測定して、生成断面積とバリオン粒子の質量の関係を詳細に調べることにより、バリオンの構造の違いを明らかにすることができた。

公募研究では、反ニュートリノ・原子核散乱におけるチャームクォークを含むペンタクォークの探索を原子核乾板を使い反応位置や粒子のトポロジーを精度よく測定し感度を上げる試みや、B 中間子崩壊を使って、 a_1 中間子や K_1 中間子の三体崩壊を詳細に調べこれらの中間子の性質の新たな研究を行うなど、計画研究と関連し相補的な研究が進められほぼ目標とした成果が得られた。

[B01]

SPring-8 のレーザー電子光施設(LEPS)の 実験は最低 5 つの構成クォークからなるペンタクォーク Θ^+ を世界で初めて見出した(Phys. Rev. Lett. 91, 012002(2003))。本計画研究が始まる前の 2009 年には、LEPS 実験から重陽子中の中性を標的とした $\gamma n \rightarrow K^+ X$ 反応における $K^+ X$ の欠損質量スペクトル中に Θ^+ に対応するピーク構造を再び確認したとの報告がなされた(Phys. Rev. C79, 025210(2009))。計画研究 B01 では、少なくとも 5 つの構成クォークを必要とする Θ^+ や、メソンとバリオンの分子的な相関が示唆される $\Lambda(1405)$ のような異常なクォーク構造を持つバリオンについて生成から崩壊まで包括的に測定し、それらの属性(質量,崩壊幅,spin,isospin,parity,形状因子等)を実験的に解明する。このような従来にないエキゾチックな状態の存在形態を明らかにすることにより、従来の単純なクォーク模型を超えたハドロン形成の新しい描像を得る。

Θ^+ について、上述の 2009 年発表論文のデータに比べての 2.6 倍の統計量のデータを解析しピーク構造が再確認されたが統計的な有意性は低下した。解析をさらに進め、 Θ^+ の生成に寄与しない、大きく前方に反跳を受けた陽子を含む事象の混入を突き止め、除いたところ、ピーク構造がより強調された。J-PARC でハドロンビームを用いた Θ^+ 生成実験も行い、生成断面積と崩壊幅の上限値を得た。 Θ^+ については、継続してデータを蓄積し、その存在と生成や崩壊様式を調べる必要がある。

$\Lambda(1405)$ について、 $\gamma p \rightarrow K^+ \pi^+ \Sigma^0$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ の生成スペクトルを測定した。 $\pi^+ \Sigma^0$ と $\pi^- \Sigma^+$ の欠損質量スペクトルにおける荷電非対称性を確認し、反応に関与するアイソスピン 0 と 1 の振幅の干渉項の存在を支持した。生成断面積の光子エネルギー依存性から $\Lambda(1405)$ の生成閾値近傍と高エネルギー側で生成機構が異なる可能性が示唆された。これらは、 $\Lambda(1405)$ の動的生成に関わる情報を与え、 $\Lambda(1405)$ の構造を解明する手がかりを与えるものである。J-PARC では、 $K^- d \rightarrow \pi^- \Sigma^0 n$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ 分光実験の準備が完了した。J-PARC 施設のトラブルにより予定されたビームタイムは延期となったが、施設運転再開後にデータ収集が予定され、 $\Lambda(1405)$ の 2 極構造 ($\pi^- \Sigma^0$ と KN の共鳴極)に関する情報を得る。

米国より大型のソレノイド電磁石と付随する検出器および電子回路の提供を受け、新設した LEPS2 実験施設に輸送して大立体角検出器として組み立てられた。大立体角検出器の用いる新型高速応答検出器(TOP と RPC)の開発に成功した。現在、LEPS2 は BGO ガンマ線検出器等を用いた物理データ取得を開始している。

[C01]

計画研究 C01 では、有限密度でのカイラル対称性回復を検証すべく原子核中でのベクトル中間子質量変化の系統的な測定をおこなう J-PARC E16 実験を推進した。電子対測定スペクトロメータ用の電子検出器 (GEM トラッカー、HBD、および 鉛ガラスカロリメータ検出器)の開発は終了し、量産を開始した。また、スペクトロメータ磁石改良部品の調達が完了した。当初計画では、第 4 年度(2012)後半には実験を開始する予定であったが、J-PARC において、東日本大震災の影響や、ビームライン予算化の遅れ(最終的には 2013 年度に建設が開始された)により、2015 年度末ビームライン完成、2016 年度実験開始、が現在の予定である。本研究の進展は KEK でのビームライン予算化の実現にあたって大きく寄与したと考える。

GEM(ガス電子増幅器)トラッカーについては、信号のタイミング情報の利用により GEM に対して斜めに入射する粒子に対する分解能の悪化をおさえ、新開発の小型プリアンプの使用とあわせて要求性能である 100 ミクロンを達成した。PHENIX 実験との協力で開発した HBD(ハドロンブラインドチェレンコフ検出器)は読み出し方式の変更によってパイオン棄却能力を向上させた。本実験で予想される値の 10 倍以上の中性子バックグラウンド中での安定動作も確認した。この双方で使用する GEM については、国内企業との協力で化学エッチング法による大型カプトン製 GEM (300mm 角まで)の国産化に成功した。同企業から国内大学への販売事例

もある。また、CERN/RD51 共同研究への参加で GEM 読み出し回路開発の協力を国内外で行っている。読み出しおよびトリガー回路開発では Belle II 実験の協力を得た。

公募研究では、検出器開発を目的とした 2 つの研究は順調に開発を終えた。理研 RIBF でパイ中間子原子の精密分光を行う公募研究は、2010 年にパイロット実験に成功して、分散整合ビーム光学による実験手法の有効性を実証した。2012 年度に行う予定だった本番の実験は、震災後の電気料金高騰による RIBF 施設のビームタイム不足のため、残念ながら 2014 年度まで延期されているものの、ビームライン性能の確認実験、検出器テスト実験などを遂行し、準備は順調である。

[D01]

D01 計画研究では、3 実験プロジェクト (B ファクトリー実験、LEPS 実験、KEK-E325/ J-PARC-E16 実験) に参画する研究者が協力し、将来の高輝度施設における実験に向けた測定器開発研究を強力に進めることを目的として、(1) 高輝度 B ファクトリー実験に向けた次世代粒子識別装置「TOP Counter」および「エアロジェル RICH」の実用化を目指した研究と、(2) 高速読み出し回路の共通基盤技術の開発を進めた。特に名古屋大学で独自に開発してきた TOP カウンターについては、光検出器 (MCP-PMT: マイクロチャンネル内蔵型光電子増倍管) の量子効率と寿命の改良を行うとともに、実機仕様プロトタイプ検出器のビームテストを行って、Belle II 実験で要求される性能を持つことを確認した。これらの成果により TOP 検出器の開発が完了し、実機用光検出器の調達を進めることができた。また、TOP 検出器を LEPS2 実験に応用する検討も進んでいる。エアロジェル RICH 検出器については、公募研究とも連携して、エアロジェル輻射体の性能改善に成功し、使用するハイブリッド型光検出器 (HAPD) の中性子線やガンマ線に対する放射線耐性を改善し最終的に問題がないことを確かめた。高輝度実験に向けた測定器読み出し回路の開発については、COPPER システムに使用する転送部のプロトタイプを開発し、Belle II 実験の中央飛跡検出器のテストベンチを用いた性能検証を行った。公募研究においては、B ファクトリー、Spring-8、J-PARC の三施設で広く活用できる技術開発として、 $n=1.1$ 以上の超高屈折率を有するエアロジェル輻射体の開発や、ポータブルなデータ収集システムの開発、低消費電力パイプライン ADC の開発が進んだ。また、LHC 衝突点の超前方に設置して超高エネルギーハドロン反応を測定する検出器の開発も進めることができた。

[E01]

LEPS2, J-PARC, KEKB で行われるハドロン実験により、膨大なデータの取得が予想されていた。本計画研究ではこれらのデータと第一原理である QCD に基づいて、ハドロンの新しい存在形態と質量生成の動的機構を解明する理論的な手法を確立し説明すると共に、物質の成り立ちに関わる基本的な問題解決に結びつけることを目指した。現象の説明に留まらず新しい現象を予言し、実験研究と有機的に発展できるような理論研究を展開することを目標とした。

その結果領域研究発足のきっかけとなった新粒子の多くは、ハドロン分子共鳴の可能性であることを指摘した。本理論研究では、それらが重いクォークを含むハドロン分子状態であり、カイラル対称性の自発的破れに基づく π 交換力が働くことによってできることを示した。多彩なフレーバーの観点を持つことで、ハドロンの多様な存在形態を作り出す機構を明らかにすることができた。さらにこれらをもとに、新たな状態、生成・崩壊率などの理論予言も可能になった。以上の点において、領域設立当初の目的を達成したと言える。

一方で、ハドロン間の相互作用には未知の部分が多く、それらのより完全な理解なくしては、多くの現象を首尾一貫して説明するには至らないことも指摘された。QCD に基づいたより第一原理的な研究の進展が望まれる。これに関連して、クォーク間ポテンシャルの格子 QCD に基づいた解析がなされ、閉じ込め機構の起源の一端が明らかになった。これらを背景に、計算科学分野とのクロスオーバー研究会を実施し、格子 QCD 計算分野とのより密接な連携を進めることとなった。

公募研究では、計画研究でカバーすることの出来ない関連研究課題が遂行され、計画研究全体の基盤を強化すると共に、発展的な研究を実現することが出来た。特に (1) 励起状態で発現する有効自由とハドロン分子状態の形成、(2) 格子 QCD による重いハドロン分光と結合の研究は、上記のような計画研究の成果を得る上で重要な役割を果たした。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

【東日本大震災の影響】

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、茨城県東海村のJ-PARCとつくば市のKEKが被災した。幸い、本領域の計画研究の中に、両施設で実施中の実験はなかったため、直接的に大きな被害はなかったと言ってよい。但し、一部では以下のような関連施設の運用停止によって少なからず影響があった。しかしながら、領域内の研究機関を中心とする連携によって対処することができたものと考えている。

- 計画研究 A01 では、KEK の計算機が停止し、その後の運用の見通しもしばらく立たず、当研究に関する物理解析への影響が懸念されたが、もう一方の拠点である奈良女子大学や他の計画研究の名古屋大学や大阪大学核物理研究センターの計算機を重点的に活用することにより、影響を最小限にすることができた。尚、4月後半より KEK の B 計算機もほぼ通常に運用が可能になり研究は順調に進んでいる。
- 計画研究 D01 では、KEK で行う予定であった試作器の製作が困難となったが、名古屋大学に代替スペースを確保し、製作に用いる大型定盤等の設備を移設して予定通り製作が進められるよう対処した。
- 計画研究 C01 では、東北大学電子光物理学研究センターにおけるテスト実験終了直後に東日本大震災の直撃を受けたが、同施設スタッフの献身的協力により人員、データ、重要サンプルのいずれも失うことなく撤収できた。2011年6月に予定していた J-PARC におけるパイオンビームによるテスト実験が約1年延期され、HBD 検出器のパイオン棄却性能の確認が遅れたため、量産への移行は遅れた。同様に、検出器の動作におけるハドロンバックグラウンドの悪影響の発見も遅れたが、理研 RIBF の活用により開発を完了し、量産への移行を可能とした。
- J-PARC 加速器を使用する公募研究のいくつかは震災によるビームの停止に影響を受けたが、復旧予定に基づいてスケジュールを調整した。
- また、一定期間、J-PARC や東北大電子光物理学研究センターのテストビームが使用できないことによる検出器開発への影響も懸念されたが、計画研究 B01 の本拠地である RCNP や SPing-8 のテストビームを活用して、高輝度 B ファクトリー用ドリフトチェンバーのテストや半導体検出器の中性子耐性の試験を行うなどの対応を計った。

【J-PARC ハドロン実験施設における事故の影響】

2013年5月23日にJ-PARCハドロン実験施設において放射性物質漏えい事故が発生した。同施設のみならずJ-PARC全体の運転が停止された。事故調査と対策の後、J-PARC各施設では順次実験を再開しているが、ハドロン実験施設へのビーム取りだし再開は2015年1月の予定である。大きく影響を受けた計画研究は次の2つである。

- 計画研究 B01 では、 $K-d \rightarrow \pi \Sigma n$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ の実験実施の準備を終え、2013年6月にビームタイムが予定されていたが、事故により延期された。事故前に、同じ実験装置で ^3He 標的に K- を照射する実験がデータ収集を行っており、このデータを解析することにより、本実験とほぼ同じ条件で実験装置が動作していることが確認できた。実験施設が再開すれば直ちに実験が可能である。
- 計画研究 C01 では、2013年5月に予定していた検出器テスト実験がキャンセルされた。電子ビームによる GEM トラッカー、HBD、鉛ガラスのテストは2013年12月に東北大電子光物理学研究センターで、また、GEM のハドロンバックグラウンド耐性のテストは2013年8月と2014年2月に理研 AVF サイクロトロンで行い、遅れを半年程度にとどめた。

【計画研究 C01 の実験の遅れについて】

C01 の当初計画では、第4年度(2012)後半には実験を開始する予定であったが、J-PARC における高運動量ビームライン予算化の遅れのため、ビーム実験に至っていない。最終的には2012年度補正予算により3年計画が措置されビームライン建設は開始された。予算化の遅れの原因としては、東日本大震災からの復旧をふくむ KEK 内での予算配分の都合があったものと思われる一方、本領域研究の進展は、予算化の実現に大きく寄与したと考えられる。当初計画時には2012年度半ばにビームライン完成を想定していたが、それは3年半おくらせて2015年度末ビームライン完成、2016年度実験開始、が現在の予定である。一方、検出器開発も上述のように地震および事故の影響を受けて当初予定よりは遅れたが、計画期間内には終了して量産を開始している。

その他領域計画としての大きな遅れはない。

5. 研究計画に参加した若手研究者の成長の状況（1 ページ程度）

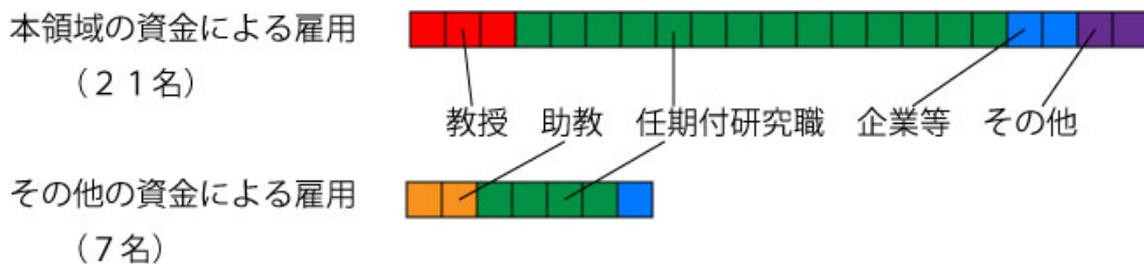
研究領域内での若手研究者育成の取組及び参加した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

（1）サマースクールの実施

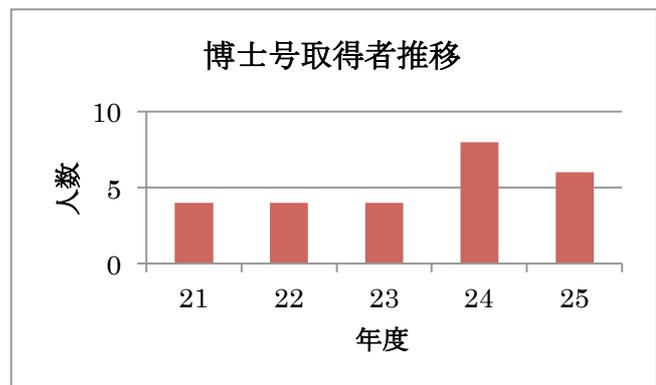
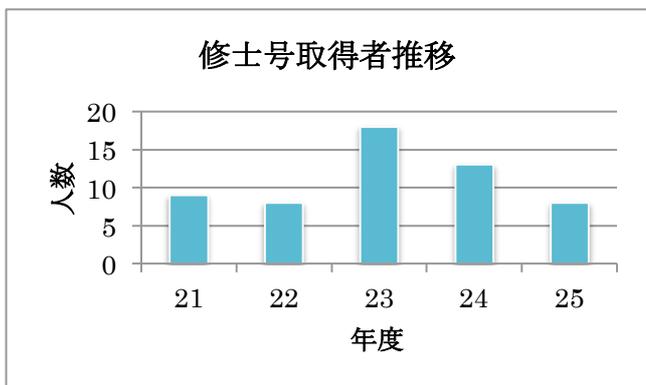
若手人材育成の取り組みとして、2010 年より毎年 3-4 日間にわたるサマースクールを実施した（計 4 回）。講師らが実際に行った研究に基づいた課題を題材にし、参加者自らによって定式化、数値計算の遂行、結果のまとめと発表までを行う実践形式とした。参加者は 2010 年 37 名、2011 年 34 名、2012 年 34 名、2013 年 36 名。2012 年と 2013 年は国際スクールとし英語での授業を実施し、アジアからの参加者を招いた。

（2）若手研究者・大学院生の活躍

本研究領域の資金で特任助教または研究員として雇用した若手研究者、その他の資金で関連した研究に従事した若手研究者の領域の研究期間終了時における進路の統計を下図に示す。



3 名が教授となって研究グループを率いる立場に昇進したことは特筆すべき成果である。また、ほとんどの者が任期付研究職に転身し、引き続き関連分野の研究に従事している。その下の世代である大学院生の活躍も顕著であって、計画研究と公募研究を合わせ、下図に示すように、関連する研究で博士号を取得した者の総計は 26 名、修士を取得したものの総計は 56 名にのぼる。この中には原子核談話会新人賞 1 件、TIPP2011 国際会議でのベストポスター賞 1 件、KEK 測定器開発室主催の測定器開発優秀修士論文賞 1 件、HUA (J-PARC ハドロンホールユーザー会) 修士論文賞 3 件の受賞を含む。このように、本研究領域が関連分野の若手研究者の育成に資したところは大きい。ニュートリノ実験に従事していたものを特任助教または研究員として採用した事例や、LEPS や J-PARC における実験で学位を取得したものが Belle 実験に参入した事例などを含むことから、有能な若手が異なるプロジェクトを経験して視野を広めると同時に、そうした人の動きが領域内のプロジェクト間の交流を促進し、互いに切磋琢磨して研究の手法や内容を高める結果につながったと言える。



6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

各計画研究の研究経費の使途および金額について以下にまとめる。

5 年間 積算	直接経費 + 間接経費	直接経費					間接経費
		計	物品費	旅費	謝金等	その他	
A01	147,411,978	113,331,978	34,340,548	35,499,584	36,892,953	6,598,893	34,080,000
B01	313,950,000	241,500,000	191,271,663	13,202,054	36,847,222	179,061	72,450,000
C01	316,065,682	243,105,682	217,357,696	7,443,151	10,112,299	8,192,536	72,960,000
D01	284,570,960	218,870,960	130,191,276	29,928,155	53,053,722	5,697,807	65,700,000
E01	156,260,000	120,200,000	4,528,160	20,856,191	92,307,130	2,508,519	36,060,000
X00	27,950,000	21,500,000	2,392,100	14,529,680	911,026	3,667,194	6,450,000

[A01]

初年度に拠点の奈良女子大学に専用のデータ解析用計算サーバーを導入し、さらにそれらを有効に活用するため、2年目にディスクアレイシステムを増強した。また初年度は、KEKに大容量のファイルサーバー・ディスクシステムを増設した。これらの計算機資源を有効に活用するため、KEKおよび奈良女子大学にそれぞれ一名ずつ研究員を雇用し、解析に専念するとともに計算機システムの活用および環境の整備に努めた。その結果、これまでのエキゾチックハドロンの物理解析を継続発展させることができ、新たに11個のエキゾチックハドロンの候補を含む新共鳴粒子を発見や、既存のエキゾチック粒子の性質の詳細研究などの成果をあげるのに寄与した。

[B01]

物品費：高出力深紫外固体レーザーおよび関連する光学部品を調達し、光子ビームの強度増強とエネルギー領域の拡張を果たした。4K冷凍機：重水素標的の開発により、ハドロンビームを用いたハドロン実験が可能になった。旅費：研究打合せ旅費のほか、国内外の学会等での成果発表、SPRING-8、J-PARC、東北大における実験準備や検出器の試験、BNLでの大型電磁石解体輸送準備など。謝金等：実験データの解析や検出器開発などを推進する研究員等の雇用。その他：国際会議等登録費、手数料など。

[C01]

物品費はスペクトロメータ磁石部品、GEM試作、GEMトラッカーおよびHBD製作を、旅費は検出器のビームテスト（東北大 ELPH、SPRING-8、J-PARC）、国内外の学会参加をまかなった。謝金はPD雇用、「その他」はGEM蒸着、鉛ガラス加工、物品輸送などの役務が主たる使途である。これらにより、E16実験のための磁石改良部品の調達と主検出器の開発が完了し、量産を開始することができた。

[D01]

物品費としては主としてTOP検出器用光検出器であるマルチアノード型光電子増倍管の製作を行った。H21、22年度の試作によって量子効率を20%改善し、H23-25年度には実機用光電子増倍管の調達を行った。旅費は、CERN、フェルミ加速器研究所やSPRING-8加速器における検出器ビームテストのほか、成果発表、研究打合せのための国内外旅費に使用した。人件費は特任助教および研究員4名×2年の雇用経費である。これらの経費使用により、検出器の性能改善、性能確認が可能となり、若手人材の雇用によって研究を強力に進めることができた。

[E01]

研究費の多くは研究支援者（ポスドク研究員、特任助教）の雇用に使われた。その結果、査読付きジャーナルに94編の原著論文を、国際会議における招待講演を44件行うことができた。また当研究費で雇用した特任助教の2名が教授職に就くことができた。

[X00]

経費の多くは、領域研究会、若手スクール、クロスオーバー研究会、検出器研究会、総括班会議などの参加者の旅費サポートや会議費、様々な学会での成果発表旅費として使用した。特にH25年度には、約160万円をHadron2013国際会議の主催（主として旅費サポート）で使用した。これらの経費により、研究交流、若手育成、成果発表等を進めることができた。

7. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本領域では、総括班評価者として以下の各氏に領域の評価・助言を依頼しており、2011年8月と2014年4月の2回にわたり、領域評価委員会を開催した。以下に評価委員会の報告書に記された全体講評コメントと、第2回委員会における各委員のコメントの抜粋を記載する。各委員からえた全コメントについては、成果報告書（冊子体）に記載する。

評価者	所属・身分	専門分野
土岐博	大阪大学名誉教授	原子核理論
徳宿克夫	KEK 素粒子原子核研究所・教授	素粒子実験
永江知文	京都大学大学院理学研究科・教授	原子核実験
中村純	広島大学情報メディア研究センター・教授	素粒子原子核理論、 計算機物理学
山内正則	KEK 素粒子原子核研究所・教授	素粒子実験
Steve Olsen	ソウル大学・教授	素粒子実験

第1回領域評価委員会（2011年8月4日、名古屋大学にて開催）

本評価委員会には、土岐、徳宿、永江、中村、山内の各氏（敬称略）が参加し、以下の全体講評をえた。

1. 素粒子・原子核分野の実験研究として実質的な共同研究が行われており、ハドロン物理をキーワードとし、最新最強の日本の大型加速器を駆使した野心的な研究課題である。理論研究も加わり、参加研究者の物理解明への研究意識も高い。世界を牽引する新しい研究分野の発足を高く評価したい。
2. この研究課題の特徴は軽いクォークから重いクォークを構成要素とするハドロンを共通の土台で解明しようとするものである。すでにいくつもの新しい共鳴状態が発見されているが、その共通点や相違点が理論的に明らかになりつつある。参加研究者間や QCD 等の数値計算を中心とする研究課題の研究者と共同での研究会も随時開催されており、研究課題は順調に進行していると評価している。
3. ハドロン物理でのカイラル対称性の役割が強く意識されている。単純に発見学（博物学）にとどまらない努力がなされていることが見受けられる。核内でのカイラル対称性の回復の実験研究の努力と相まって、総合的な理解がなされることを強く望む。
4. 計画研究でも若い研究者が中心となり、新しい物理が展開されている。ハドロン物理のスクールが開催される等、若い研究者の育成にも積極的に取り組んでいる。若い研究者の育成は着実に成果を上げていると評価する。
5. この研究課題の強みは、日本の大型加速器の中心課題として素粒子原子核のコミュニティから強く支持されている所である。新しい測定器の開発や構築に取り組んでおり、今後の実験データの収集にも威力を発揮するものと思われる。特に、この研究課題で開発が進んだ TOP 測定器はスーパーB ファクトリーでの欠かせない粒子識別測定器としての活躍が約束されている。新しい測定器開発により、分野を超えた形で活用されようとしている。

第2回領域評価委員会（2014年4月18日、名古屋大学にて開催）

本評価委員会には、土岐、徳宿、永江、中村、Olsen の各氏（敬称略）が参加し、以下の全体講評をえた。

【全体講評】

1. 素粒子と原子核、理論と実験という大きな研究領域を超えた総合的な研究が成功裏に行われたことを高く評価する。日本の超大型の加速器がその特徴を十分に生かしたことで、分野を超えて実験データの解析が行われたことも素晴らしい成果に結びついた。今後さらに発展することが期待できる。
2. 物理としては Belle で得られた重いクォークを含む素粒子の実験データは世界に大きなインパクトをあたえた。全く新しい研究分野を切り開いた。世界最大の加速器である LHC でも追試実験が行われるほどの研究分野を牽引していることは大いに評価できる。
3. 全く新しいコンセプトの粒子識別装置である TOP 測定器が科研費によりほぼ完成し、今後 Belle-II での重要な測定器になる。素晴らしい成果である。
4. J-PARC での実験の装置開発はしっかりと完成したが、大型地震などの不可抗力で実験できなかったが、今後着実に実験データが出ることが期待できる。
5. 非可換ゲージ理論である QCD 理論が直接応用される研究分野が開発された。研究成果が一般公開されること

が期待される。

【各委員のコメント（抜粋）】

1. 2011年の第1回の評価委員会では、素粒子分野と原子核分野の実験、理論両面から生まれてきた優れた新学術領域だと言う評価をすると同時に、この研究分野で行うべき研究についての希望を書いた。その研究期間が終了した段階での印象は、最初の段階で議論したことを確実に実行したという印象と、さらに世界をリードして全く新しい分野を作り、それを確立したという印象を強くしている。
2. 素粒子と原子核、理論と実験という境界をうまくクロスして研究が進展できたと評価する。元々ハドロン物理の分野は、上記の境界にまたがっており、研究交流が重要な領域であるが、実際はなかなか交流が難しい。新学術領域の枠組みでの研究で、後で述べるような各計画研究の独立した研究成果に加えて、各計画研究間の交流がうまく機能していると感じる。この辺は総括班がしっかり機能しているためであろうと判断するが、そこを担当した研究者の努力とリーダーシップを称えたい。
3. 本学術研究では、Bファクトリー、LEPS、J-PARCという多様な実験グループと理論班が連携して研究を進めてきた。その中で修行し、経験を積んで多くの若手研究者が育ったことは高く評価されるべきである。新学術領域研究のねらいである「若い研究者を育成していく」ことに関して最も成功した事例を提供しており、今後の我が国における研究のGood Practiceとなっている。
4. Bファクトリーで多くの新しいハドロン状態が見つかったことは、クォーク・ハドロン物理がこれまで考えられていたよりはるかに豊富な内容を含むことを示しており、新学術領域研究のもう一つのねらいである「新たな学問領域を切り開く」ことにも成功している。ここでは、非常に重いクォークと軽いクォークという大きくスケールの違うものが構成要素となり、それぞれの特徴が無視できない物理となっている。さらに、素粒子は2つのクォークからなる中間子、3つのクォークからなる重粒子の2種類というこれまでの常識を変える必要も強く示唆されている。また、JPARCでは有限密度中でのハドロンの振舞いについて、信頼度の高いデータが蓄積され、有限密度QCDの研究に着実な基礎を与えつつある。
5. B班によって進められたLEPS、J-PARCにおけるペンタクォーク探索実験においても新しい進展があった。LEPSではレーザー光学系の改良によりガンマ線強度の改善が図られた。高統計の最新の解析では、包括測定においてクリアな信号が観測されなかったものの、重陽子標的中の陽子との反応を除去することによりバックグラウンドを抑制して信号を観測できることが示された。一方、J-PARCにおける π 中間子ビームを用いた実験ではペンタクォークの信号は観測されなかった。これに加えてLEPSではK-pp状態の探索や $\Lambda(1405)$ 生成などについて新たな知見が得られている。新たにLEPS2施設を立ち上げたことやJ-PARC高運動量ビームラインでのチャームバリオン分光実験の提案など、近い将来への道筋を切り開いたところも高く評価できる。
6. C班では、J-PARC E16実験の実現に向けて検出器系の開発に大きな進展をみせ、多くの物が量産状態に入っている。これらのことが後押しとなって、補正予算により、この実験に不可欠である高運動量ビームラインの建設が実現したことは大きく評価される。その建設スケジュールに合わせて実験準備がスムーズに進んでいくことが望まれる。
7. 次世代粒子識別装置であるTOPカウンターの開発研究が順調に進んだ。アメリカからの参加もあり、アメリカでも非常に評価されている。この科研費での新しい概念の測定器の実現が近づいている。LEPSでもTOP測定器の導入が考えられており、この研究領域研究の成果であると言える。
8. 一方で重いクォークに着目した理論研究が発展したことは素晴らしいことである。特に重いクォークと軽いクォークで構成される2つのメソンが π 交換力でしきい値領域で束縛状態や共鳴状態を作る可能性が追求されたが、現象論的ではあるがハドロン物理の特徴を十分に取り込んでいる。格子QCD理論でもクォーク間の相互作用が研究されており、基本理論に軸足を置いた満足できる理論研究が進行している。
9. この研究分野は非可換ゲージ理論であるQCD理論の直接の応用の分野であり、さらには素粒子と原子核の両者からのアプローチが可能であることで、多くの興味深い研究が行われている。実験ではRHICやLHCの重イオンを使った実験とも深い関わりがあり、新しい発見が今にも出てきそうな雰囲気を持っている。シンポジウムでもその雰囲気があり、この研究領域が切り開いた分野がさらに発展することを強く望んでいる。「新ハドロン」研究領域の研究成果を多いに評価したい。

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎または計画研究毎に整理する〕

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

[A01]

(1) 始状態輻射電子・陽電子衝突で生成された $Y(4260)$ 粒子の $J/\psi \pi^+ \pi^-$ 崩壊の $J/\psi \pi^+$ の普遍質量を調べることで新たに荷電チャームonium様粒子 $Z(3895)^+$ を発見した(図 1)。これは、Belle では 6 個目の荷電エキゾチックハドロンであるが、中国の BESIII 実験でも同時に発見され、話題になった。

(2) Belle 実験では、 $\Upsilon(5S)$ のエネルギーで大量のデータを収集したが、これは世界でも類を見ないユニークなデータであり、 b クォークと反 b クォーク対を含むボトモニウム領域のエキゾチックハドロンの研究の格好の場である。これらのデータを解析し、まず $h_b(1P)$ 粒子および $h_b(2P)$ 粒子を発見した。さらにこれらの崩壊構造から、 $\Upsilon(nS) \pi$ および $h_b \pi$ に崩壊する荷電ボトモニウム粒子 $Z_b(10510)$ と $Z_b(10560)$ を発見した(図 2 参照)。これらは、 b クォークと反 b クォーク対を含み電荷をもつので、明らかにエキゾチック粒子である。5 つの異なる崩壊モードで同時に発見されたこととなり、疑いの余地のないものである。

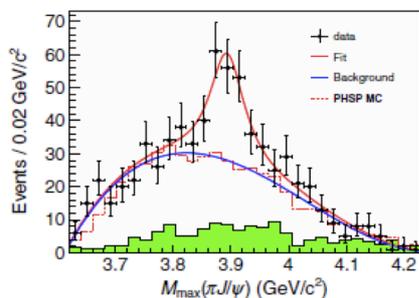


図 1: J/ψ と π の質量分布

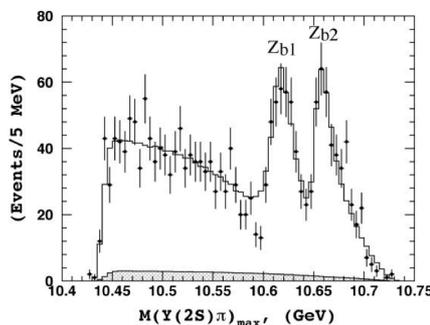


図 2: $\Upsilon(2S)$ と π の質量分布

(3) 同じく、光子・光子衝突反応において J/ψ 中間子と ϕ 中間子に崩壊する質量が 4350 MeV で崩壊幅が 13 MeV の新共鳴粒子を発見した(図 2)。この共鳴粒子はチャーム・反チャームクォークとストレンジ・反ストレンジクォークの四つのクォークよりなるテトラクォークと呼ばれるエキゾチックハドロンの可能性が高い。

(4) 光子・光子衝突反応において J/ψ 中間子と ω 中間子に崩壊する質量が 3915 MeV で崩壊幅が 17 MeV の新共鳴粒子を発見した(図 1)。この粒子は、 B 中間子の崩壊で発見された J/ψ 中間子と ω 中間子に崩壊する共鳴粒子(質量は 3940 MeV でエキゾチックハドロンの候補であった)と同一粒子と判断され、PDG では $\chi_{c0}(2P)$ と同定されている。

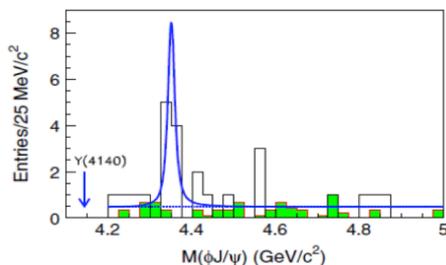


図 3: J/ψ と ϕ の質量分布

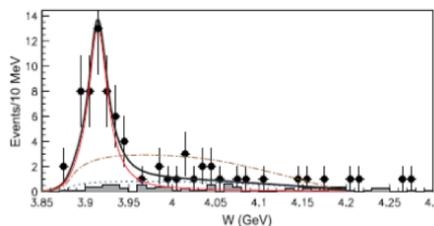


図 4: J/ψ と ω の質量分布

[B01]

1) Θ^+ : 2009 年に LEPS から発表された論文データより 2.6 倍多い統計量のデータを用いた解析を行い、ピーク構造が再確認されたが、統計的な有意性は低下した。解析をさらに進めたところ、反応により大きく前方に反跳を受けた陽子を含む事象の混入を突き止めた。大きな陽子反跳を伴う事象は Θ^+ の生成に寄与しないとして除いたところ、ピーク構造がより強調された(図 1)。このピーク構造についてはより高い統計で確認する必要があるので、反跳陽子に対する検出効率をさらに上げたデータを取得中である。

一方、J-PARC において $p(\pi, K^-)$ 反応を用いた Θ^+ の探索実験を行った。大強度の π 中間子ビームと散乱 K^- 中間子とともに高分解能スペクトロメータで測定し、スペクトルにピーク構造は観測されなかったものの生成断面積の上限値 260 nb を得た。この結果から反応における $\bar{K}N\Theta$ 結合は小さいことが要請される。また、 Θ^+ の崩壊幅について 1MeV 以下という制限を与える。

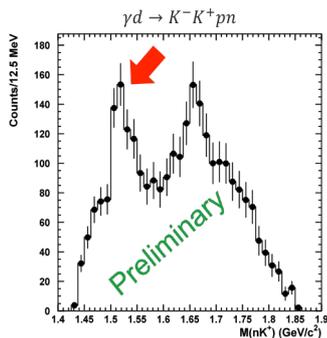


図 1：反跳陽子を除いた nK^+ の欠損質量スペクトル

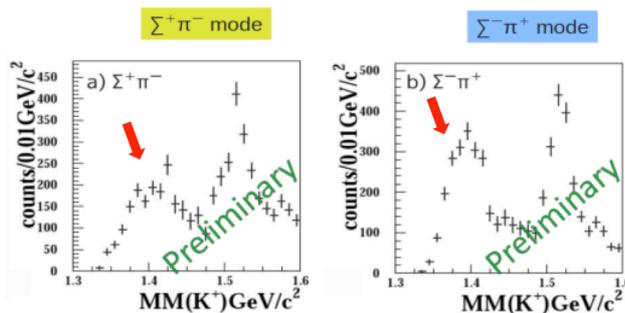


図 2： $\gamma p \rightarrow K^+ \pi^\pm \Sigma^\mp$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ の生成スペクトル

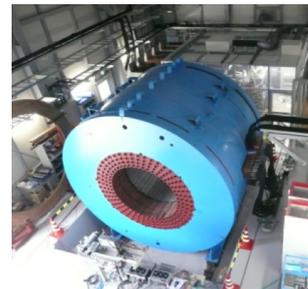


図 3：LEPS2 実験室に設置されたソレノイド電磁石

(2) $\Lambda(1405)$ ： $\gamma p \rightarrow K^+ \pi^\pm \Sigma^\mp$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ の生成スペクトルを測定した。 $\pi^+ \Sigma^-$ と $\pi^- \Sigma^+$ の欠損質量スペクトルにおける荷電非対称性を確認した (図 2)。これは、反応におけるアイソスピン 0 と 1 の振幅の干渉項の存在を示す。また、 $\pi^+ \Sigma^-$ と $\pi^- \Sigma^+$ の欠損質量スペクトルの和について、 $\Lambda(1405)$ の生成率の γ 線エネルギー依存性を求めた。生成閾値近傍 ($1.5 < E_\gamma < 2.0$ GeV) からエネルギーを上げる ($2.0 < E_\gamma < 2.4$ GeV) と生成率が減少し、さらにエネルギーを上げる ($2.4 < E_\gamma < 3.0$ GeV) と生成率は再び上昇する。これはエネルギー領域によって $\Lambda(1405)$ の生成機構が異なる可能性を示唆する。

J-PARC において、 $K^- d \rightarrow \pi \Sigma n$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ 研究を推進した。入射 K^- ビームと散乱中性子の運動量を測定し、標的を円筒状に取り巻くように設置された検出器で崩壊粒子を捉え、 $\Lambda(1405)$ の崩壊荷電終状態 ($\pi^\pm \Sigma^\mp$ および $\pi^0 \Sigma^0$) を同定することにより、反応に寄与するアイソスピン 1 と 0 の振幅を分解する。本計画研究により実験準備がすべて整い、2013 年の夏にビームタイムが割り当てられたが、J-PARC 施設のトラブルによりデータ収集は施設再開後に延期された。

(3) 装置開発：米国のブルックヘイブン国立研究所 (BNL) から大型のソレノイド電磁石と付随した検出器と電子回路の提供を受け日本に輸送した。本計画が後押しとなって大阪大学が SPring-8 に新しく建設した LEPS2 ビームラインにおいて理研仁科加速器センターによって建設された実験室に、輸送したソレノイド電磁石が組み立てられた (図 3)。この大立体角検出器によって、 Θ^+ の生成とともに $K_s^+ p$ へ崩壊する過程を測定し、フェルミ運動による分解能の不定性を排除した測定が可能になる。なお、LEPS2 ビームラインは 2013 年 1 月にコミッションが始まり、同年 4 月から BGO ガンマ線検出器等を用いた物理データ取得を開始した。

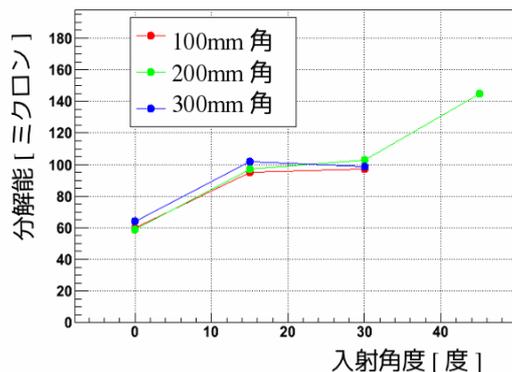
大立体角検出器で用いる 2 つの新型高速検出器の開発を行った。本領域研究の計画研究 D01 班と共同して LEPS 施設で Time-Of-Propagation (TOP) カウンターがテストされ、高い時間応答を達成し、LEPS2 実験において π/K 分離が可能であることを示した (IEEE Tr. Nucl. Sci. 投稿準備中)。Resistive Plate Chamber (RPC) はガラスのような高抵抗体を多層並べた高速応答ガス検出器である。1m を超える長い読み出し電極を持つ RPC で、読み出し電子回路ジッターの寄与 (40ps) を含みながらも 60ps の高い時間分解能を達成した (JINST 7, P12005 (2012))。

本計画研究で、光子ビームの増強が図られた。波長が 266 nm の大出力固体レーザーを複数同時に入射し、光学系を工夫することで、逆コンプトンガンマ線のエネルギーを最大 3GeV までに引き上げるとともに、ガンマ線強度を増強させた (Nucl. Instr. Meth. A737, 184-194 (2014))。

[C01]

計画研究 C01 では、J-PARC E16 実験のための電子検出器 (GEM トラッカー、HBD、および鉛ガラスカロリメータ検出器) の開発が終了し、量産を開始した。J-PARC においては、研究開始当初の予定より遅れていた高運動量ビームラインの建設も予算化され、2016 年には E16 実験としてビーム使用開始の予定である。

(1) GEM トラッカーに関しては、信号のタイミング情報の利用により、粒子が斜めに入射した際における位置分解能の悪化を防ぐ方式を実用化した。また、測定粒子への影響を極力小さくするための低物質質量二次元読出しストリップ基板を開発した。3 種類のサイズ (100 mm 角、200mm 角、300mm 角) のそれぞれについて性能を確認した。GEM 読み出し回路については、CERN との協力により、CERN 製 ASIC を用いた 256 チャンネルの小型プリアンプを開発し、その利用により GEM トラッカーの位置分解能を最高で従来の 80 ミクロンから 60 ミクロンに改善できた。飛跡位置分解能の入射角度依存性を図に示す。



(2) HBDについては、量産型一号機で入射角度0度の電子に対して平均光電子数11個を確認し、斜め15度入射に対しても通過距離が長くなる分で計算通りに増加することを確認した。一方、読み出しパッドのサイズの最適化と信号のあるパッド数を用いた解析の導入により、最終的な電子識別能力(パイ粒子棄却能力)を3倍以上向上できることをテスト機で確認した。これらの結果にもとづく実機でのパイ粒子除去率は99.4%になる見通しである。

(3) 国内企業との協力により、最大300mm角のカプトン製GEMの化学エッチング方式による安価な量産を国産でまかなえる態勢をととのえた。今後国内で製作されるGEM検出器への供給も可能である。このカプトン製300mm角国産GEMが、J-PARCでの実験で予想される量の十数倍である毎時80-90mSvという中性子バックグラウンドの中でも、HBDで用いるCF₄ガス中で放電に対して安定に運転できることを理研RIBFでのテストで確認した。

公募研究ではφ→KK崩壊の測定実験のためのエアロゲル検出器開発では実機大のプロトタイプを製作して目標性能(Kaon検出効率97%)を得た。η'中間子原子核探索実験のためのエアロゲル検出器開発についても目標性能(陽子除去率99.5%)を得て実機の仕様を決定した。

理研RIBFにおけるパイ中間子原子精密分光実験は、2010年のパイロット実験により、π-¹²¹Sn原子の発見、(d, 3He)反応によるパイ中間子原子生成断面積の角度依存性の測定などの成果をあげ、施設の都合で2014年度に延期された本実験にむけて鋭意準備中である。

[D01]

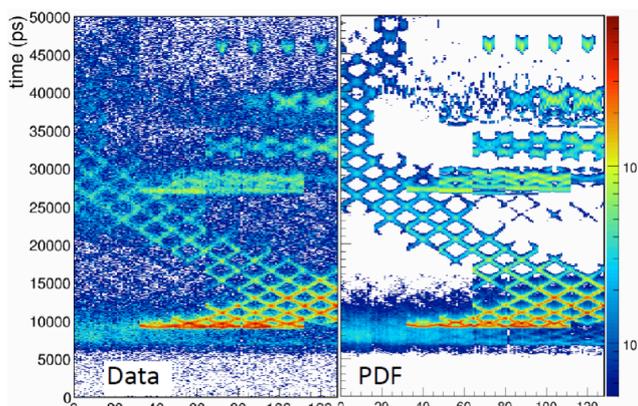
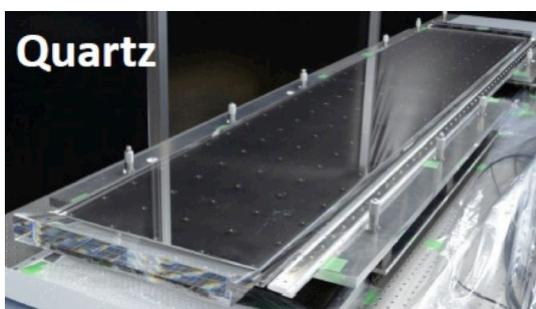
計画研究D01では以下の主要成果が得られた。

(1) TOP 検出器用光検出器の性能改善

TOP Counterに使用する光検出器として浜松ホトニクスと共同開発してきたマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管(MCP-PMT)の改良を行った。まず光電面の量子効率をスーパーバイアルカリ光電面技術の適用によって改善し、TOP検出器のチェレンコフ光検出効率を約20%向上した。さらに、アウトガスが出にくいMCPプレートの開発によって7C/cm²以上の出力電荷までの寿命があるMCP-PMTの開発に成功した。

(2) TOP カウンター実機プロトタイプの性能確認

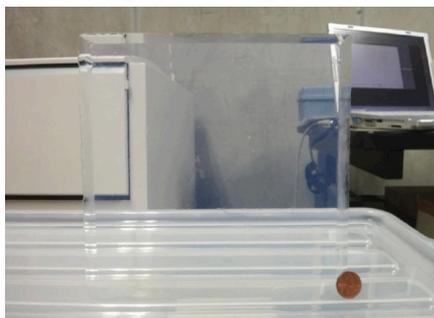
TOP Counterの基本動作原理検証のため、プロトタイプ検出器を製作し、CERN、Fermilab、SPring-8においてビームテストを繰り返して性能確認を行った。特に、2013年6月に行ったSPring-8のLEPSビームラインを使ったテストでは、実機サイズの石英光学系と光検出器をフル装備したプロトタイプ検出器で実験を行い、シミュレーションで予想される検出光子数(垂直入射で平均約25個)が得られた、チェレンコフリングイメージも期待通りのものが得られた。



図：TOP 検出器プロトタイプ (左) とビームテストで得られたチェレンコフリングイメージ。

(3) エアロジェル RICH 検出器の開発

ピンホール乾燥法という新製法を用いたエアロジェル輻射体の開発を進めた。この結果、n=1.055で従来と比べ、新製法では、60%以上透明度の向上に成功した。また、クラック無しサンプルの大型化にも取り組み、180x180x20mm³という大型エアロジェルの製造(右図)に成功した。また、エアロジェルRICH検出器に使用するハイブリッド型光検出器(HAPD)の量子効率を約20%から30%以上に改善した。また、APDのシリコン層の構造を改良して、中性子とガンマ線に対する放射線耐性の改良を行い、Belle II実験環境下で動作する検出器の生産が可能となった。



(4) 高輝度実験に向けた測定器読み出し回路の開発

COPPERシステムに使用する転送部のプロトタイプの開発を行った。Belle II実験の中央飛跡検出器のテスト

ベンチを用いて、その読み出しエレクトロニクス of FPGA にデータリンクの送出側のファームウェアを組み込み、新たに製作した COPPER に装着する受信カードと光ファイバーで接続した。テストチェンバーの宇宙線の信号やテストパルスなど種々の信号を COPPER に送り、データの解析をおこないデータリンクの動作を確認した。

また、関連する公募研究では以下の成果が得られた。

(5) シリカエアロジェルの製造方法について、上記計画研究と連携した開発を行い、ピンホール乾燥法を用いて、従来は不可能であった $n=1.1$ 以上の高屈折領域でも透明度の高いエアロジェル放射体の製法を確立した。

(6) 「POCKET DAQ」と呼ぶ、B ファクトリー実験で開発された COPPER システムを採用した汎用のポータブルデータ収集系を開発した。既に実用化されテスト実験等で使用されている。

(7) LHC 衝突点の超前方領域において超高エネルギーハドロン反応を測定する LHCf 実験に向けて、GSO シンチレータを用いた検出器の開発を行った。

[E01]

(1) X(3872) と Z_b(10610, 10650)

新ハドロン研究のきっかけとなった X(3872)、領域研究実施中に発見された Z_b 粒子が、ハドロン分子状態として記述できることを示した (瀧澤・竹内ら PTEP 093D01, 2013 および (大古田ら, Phys. Rev. D86 014004, 2012)。ハドロンの分子共鳴構造を強く示唆するもので、ハドロンの存在形態に対して新たな視点をもたらした重要な成果である (図 1)。

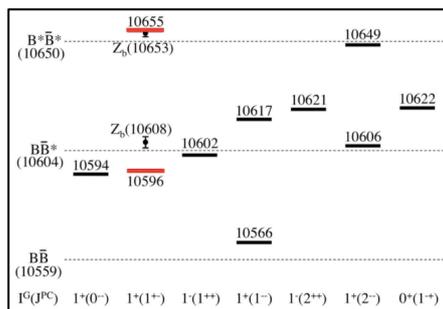
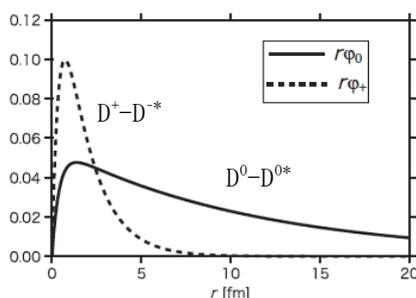


図 1. 左: X(3872) 状態における、 D^0-D^{0*} (実線) および D^+-D^{*-} (破線) 波動関数。右: $B(*)-B(*)$ 分子状態で予言される様々な状態。赤線が実験で観測された Z_b 粒子。

(2) 高次ベクトル中間子

ホログラフィック有効模型により核子の形状因子を解析し、高次ベクトル中間子の影響を解析した (原田ら, Phys. Rev. D83 (2011) 114040)。有効理論の高次効果を検証する可能性を持つ興味深い結果である。

(3) カイラル対称性と閉じ込め機構

QCD の数値シミュレーションと (格子 QCD)、解析的な方法によって、カイラル対称性の破れが低エネルギーモードの性質に依存する一方、閉じ込めポテンシャルは低エネルギーモードには依存しないことを示した。カイラル対称性の破れと、閉じ込めの機構を解明するための重要な手がかりを与えた。(菅沼ら, Phys. Rev. D86 (2012) 034510)。

公募研究

(1) パイ中間子 3 体系における普遍的物理: 3 体系のエフィモフ効果に代表される少数系の普遍的物理が、理論のパラメータを調整することでパイ中間子 3 体系において実現することを示した。この結果は多重パイ中間子チャンネルのソフト化の解析に有用なことが期待できる (Phys. Rev. C89 (2014) 032201)。

(2) UA(1) 量子異常効果の検証: eta-prime(958) 中間子の有限密度中での質量減少の実験的検証に向けた理論研究である。UA(1) 量子異常の回復測定のため、eta-prime(958) 中間子の生成崩壊反応を解析した。束縛エネルギーと崩壊幅の測定から、対称性回復の痕跡を探った (Phys. Rev. C87, 045201 (2013))。

(3) 反 D 中間子 (あるいは B 中間子) と核子の束縛系の存在可能性について重イオン衝突実験で観測可能性を議論した。様々なエキゾチックハドロンと同様に反 D 中間子-核子系についても観測可能な生成量があることがわかった (Phys. Rev. Lett. 106, 212001 (2011))。

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

計画研究 A01

[雑誌論文]

1. “Measurement of branching fractions for $B \rightarrow J/\psi \eta K$ decays and search for a narrow resonance in the $J/\psi \eta$ final state”, *T. Iwashita, K. Miyabayashi, Y. Sakai, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他173名 (The Belle collaboration), Progress of Theory and Experimental Physics 2013, 123C01 (2014) 査読あり
2. “First Observation of the $Z_b^0(10610)$ in a Dalitz Analysis of $Y(5S) \rightarrow Y(nS) \pi^0 \pi^0$ ”, *P. Krokovny, Y. Sakai, K. Miyabayashi, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他176名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 86, 052016 (2013) 査読あり
3. “Experimental constraints on the spin and parity of the $Z(4430)^+$ ”, *K. Chilikin, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他183名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 86, 074026 (2013) 査読あり
4. “Evidence of a new narrow resonance decaying to $\chi_{c1} \gamma$ in $B \rightarrow \chi_{c1} \gamma K$ ”, *V. Bhardwaj, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Sakai, K. Trabelsi, S. Uehara, 他全183名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 111, 032001 (2013) 査読あり
5. “Study of $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ and Observation of a Charged Charmonium-like State at Belle”, *Z. Q. Liu, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他180名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 110, 252002 (2013) 査読あり
6. “Evidence for the $\eta_b(2S)$ and observation of $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S) \gamma$ and $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S) \gamma$ ”, *R. Mizuk, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他168名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 109, 231002 (2012) 査読あり
7. “First observation of the P-wave spin-singlet bottomonium states $h_b(1P)$ and $h_b(2P)$ ”, *I. Adachi, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他121名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 0321001 (2012) 査読あり
8. “Observation of two charged bottomonium-like resonances in $Y(5S)$ decays”, *A. Bondar, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他151名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 0122001 (2012) 査読あり
9. “Evidence for a new resonance and search for the $Y(4140)$ in the $\gamma \gamma \rightarrow \phi J/\psi$ process”, *C. P. Shen, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, S. Uehara, 他121名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 112004 (2010) 査読あり
10. “Observation of a charmonium-like enhancement in the $\gamma \gamma \rightarrow \omega J/\psi$ process”, *S. Uehara, Y. Sakai, K. Miyabayashi, E. Nakano, Y. Watanabe, K. Trabelsi, 他109名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 092001 (2010) 査読あり

[学会発表]

1. 新山雅之, “Inclusive Hadron production in e^+e^- collision at B-Factories”, Moriond QCD, 2014年3月22-27日, La Thuile, Italy
2. 宮林謙吉, “Hadron Physics at Belle II / SuperKEKB”, XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013), 2013年11月4-8日, 奈良, Japan
3. 住浜水季, “Light hadron spectroscopy at Belle”, XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013), 2013年11月4-8日, 奈良, Japan
4. ChengPing Shen, “Exotic charmonia at Belle”, 9th International Workshop on Heavy Quarkonium 2013 (QWG 2013), 2013年4月22-26日, IHEP, Beijing, China
5. 酒井和幸, “Charmed hadrons at Belle”, Workshop on Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics in 2013, 2013年2月11-13日, Tokai, Japan
6. V. Bhardwaj, “Charmonium and -like states from Belle”, Moriond Electroweak, 2012年3月7日, La Thuile, Italy
7. 飯嶋 徹, “Hadron Physics from Belle”, International Conference on the Structure of Baryons (BARYONS' 10), 2010年12月7-11日, Osaka, Japan
8. K. Trabelsi, “Hadron physics and spectroscopy”, 50 Cracow School of Theoretical Physics, 2010年6月10日, Zakopane, Poland
9. 上原貞治, “Review of recent results on XYZ from Belle and BaBar”, 13th International Conference

[公募研究]

[学会発表]

1. 石黒 勝巳 他、“ニュートリノ振動実験OPERAにおけるニュートリノ反応から出た核破砕片の研究”, 日本物理学会 2010年秋季大会 (2010年9月)
2. 松田達郎、“COMPASSにおけるハドロンスペクトロスコピー”, Hadron Structure and Interactions 2009、東京家政大学、2009年8月24-25日.
3. 松田達郎、“CERN COMPASSにおけるハドロン物理プログラム”、第482回基礎科学セミナー、日本原子力科学研究機構先端基礎研究センター、2012年9月21日.

計画研究 B01

[雑誌論文]

1. “Search for K-pp Bound State via $\gamma d \rightarrow K^+ \pi^- X$ Reaction at $E_\gamma = 1.5 - 2.4$ GeV”, *A.O. Tokiyasu, T. Hotta, T. Nakano, T. Yorita, M. Yosoi, 他全 72 名, Phys. Lett. B728, 616-621(2014). 査読有
2. “Development of High Intensity Laser-Electron Photon Beams up to 2.9 GeV at SPring-8 LEPS Beamline”, *N. Muramatsu, T. Hotta, T. Nakano, T. Yorita, M. Yosoi, 他全 28 名, Nucl. Instr. Meth. A737, 184-194(2014). 査読有
3. “Recent Progress and Results of LEPS, LEPS2, and ELPH”, *N. Muramatsu, Few-Body Systems 54, 997-1004(2013). 査読有
4. “New Result on Θ^+ from LEPS”, *Y. Kato, Few-Body Systems 54, 1245-1250(2013). 査読有:
5. “Photoproduction of $\Lambda(1405)$ and $\Sigma^0(1385)$ on the Proton at $E_\gamma=1.5-3.0$ GeV at SPring-8/LEPS”, *Y. Nakatsugawa, Few-Body Systems 54, 1179-1182(2013). 査読有
6. “Hadron Experimental Facility at J-PARC”, *H. Noumi, Few-Body Systems 54, 813-820(2013). 査読有
7. “Search for Pentaquark Θ^+ in Hadronic Reaction at J-PARC”, *M. Naruki, Few-Body Systems 54, 955-960(2013). 査読有
8. “Search for the Theta+ pentaquark via the $\pi^- p \rightarrow K^- X$ reaction at 1.92 GeV/c”, *K. Shirotori, M. Naruki, H. Noumi, S. Sawada, K. Tanida, 他全 68 名, Phys. Rev. Lett. 109, 132002/1-5(2012). 査読有
9. “Near-threshold Lambda(1520) production by the gamma p \rightarrow K+ Lambda(1520) reaction at forward K+ angles”, *H. Kohri, T. Hotta, T. Nakano, T. Yorita, M. Yosoi, 他全 59 名, Phys. Rev. Lett. 104, 172001/1-4 (2010). 査読有
10. “Measurement of spin-density matrix elements for phi-meson photoproduction from protons and deuterons near threshold”, *W.C. Chang, T. Hotta, T. Nakano, T. Yorita, M. Yosoi, 他全 56 名, Phys. Rev. C 82, 015205/1-11 (2010). 査読有
11. “Backward-angle eta photoproduction from protons at $E_\gamma=1.6-2.4$ GeV”, *M. Sumihama, T. Hotta, N. Muramatsu, T. Nakano, M. Yosoi, 他全 51 名, Phys. Rev. C80, 052201 (2009). 査読有
12. “Measurement of the incoherent gamma d \rightarrow phi p n photoproduction near threshold”, *W.C. Chang, T. Nakano, T. Hotta, N. Muramatsu, M. Yosoi, 他全 55 名, Phys. Lett. B684, 6 (2010). 査読有
13. “Near-threshold photoproduction of L(1520) from protons and deuterons”, *N. Muramatsu, T. Hotta, T. Nakano, M. Yosoi, 他全 55 名, Phys. Rev. Lett. 103, 012001 (2009). 査読有

[学会発表]

1. M. Niiyama, “Recent results of LEPS, ELPH and prospects of LEPS2”, XV international Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2013), 2013年11月7日, 奈良
2. T. Nakano, “Pentaquarks”, XV international Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2013), 2013年11月5日, 奈良
3. M. Yosoi, “Hadron Physics Experiments at LEPS and LEPS2”, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, 2013年10月2日, パリ
4. 白鳥昂太郎, “Search for Theta+ pentaquark using a hadron beam at J-PARC”, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月20日, 高知大学
5. M. Yosoi, “LEPS2 Project”, International Workshop on using Heavy flavors to probe New Hadron Spectroscopies/Dynamics, 2012年11月20日, Busan
6. Y. Kato, “New results on Theta+ from LEPS”, International Workshop on using Heavy flavors to probe New Hadron Spectroscopies/Dynamics, 2012年11月20日, Busan
7. K. Tanida, “Strangeness Nuclear Physics in J-PARC: initial results and recovery from the Earthquake”, VIII TOURS Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, 2012年9月6日, Schwarzwald
8. H. Noumi, “Hadron Experimental Facility at J-PARC”, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), 2012年8月21日, 福岡
9. K. Tanida, “Hadron Physics Experiments at J-PARC”, Hadron Production and J-PARC Physics, 2012年4月12日, Pohang

10. K. Shirotori, "Search for Theta+ via the pion induced reaction at JPARC: J-PARC E19", The fifth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2011 (APFB2011), ソウル
11. M. Niiyama, "LEPS II GeV photons at SPring-8", XIV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2011), 2011年6月16日, ミュンヘン
12. K. Shirotori for the J-PARC E19 collaboration, "Search for Θ^+ pentaquark baryon at the J-PARC K1.8 beam line: First result and current status", Hadron Physics Meeting (Strangeness Physics at J-PARC), 2011年5月28日, Pohang
13. M. Yosoi, "LEPS2: the second Laser-Electron Photon facility at SPring-8", International Conference on the structure of baryons (BARYONS' 10), 2010年12月11日, 大阪
14. M. Naruki, "Status Report of the J-PARC E19", International Conference on the structure of baryons (BARYONS' 10), 2010年12月10日, 大阪
15. T. Nakano, "Highlights and Prospects from LEPS and LEPS2", International Conference on the structure of baryons (BARYONS' 10), 2010年12月9日, 大阪
16. T. Nakano, "Recent Results from LEPS and Future Prospects at LEPS2", 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, 2009年11月9日, 筑波大学
17. T. Nakano, "Theta+", JSPS 日米共同セミナー「JLab と J-PARC における中間子生成反応」, 2009年10月11日、ハワイ
18. T. Nakano, "Penta-quark", 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 2009年9月17日、リコッティ, 東海

[公募研究]

[雑誌論文]

1. "High Time Resolution RPCs with Different Readout Geometries", *N. Tomida, 他全8名, JINST 7, P12005/0-9, 2012. 査読有

[学会発表]

1. "Resistive plate chambers for the LEPS2 TOF system", N. Tomida, C-Y, Hsieh, M. Niiyama, H. Ohnishi, W-C, Chang, T. Hashimoto, H. Hamano and K. Mizutani, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2013), 2013年12月2-6日、Hayama, Kanagawa

計画研究 C01

[雑誌論文]

1. "A Development of the GEM tracker for the J-PARC E16 experiment", *Y. Komatsu, H. En'yo, K. Ozawa, S. Yokkaichi, 他、計15名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 732 (2013) 241-244 [査読有]
2. "Experimental Investigation for Mass Modification of Vector Mesons at J-PARC" *D. Kawama, H. En'yo, A. Kiyomichi, R. Muto, , K. Ozawa, F. Sakuma, S. Yokkaichi, 他計25名、JPS Conf. Proc. 1, 013074(2014) [査読有]
3. "A development of HBD for the J-PARC E16 experiment", *K. Aoki, H. En'yo, , K. Ozawa, , S. Yokkaichi, 他計14名, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 628, 300-303, (2011) [査読有]

[学会発表]

1. M. Naruki, "Experimental studies on medium modification of vector mesons" Hirscheegg 2014: Hadrons from Quarks and Gluons (International Workshop XLII on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations), 2014/1/12-18, Hirscheegg, Kleinwalsertal, Austria
2. M. Naruki, "Experimental studies on medium modification of hadron mass", XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013), 2013/11/4-8, Nara, Japan
3. D. Kawama, "Experimental Investigation for Mass Modification Effect in Nuclei" XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013), 2013/11/4-8, Nara, Japan
4. K. Kanno, "Development of the Hadron Blind Detector for the J-PARC E16 experiment", IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM 2013, 2013/10/27-11/2, Seoul, Korea
5. K. Aoki, "Mass modification of vector mesons", New Hadron Spectroscopies/Dynamics, 2012/11/21, Pusan, Korea
6. K. Ozawa, "Measurements of meson mass at J-PARC", Zimanyi 2011 winter school on Heavy Ion Physics, 2011/11/30, MTA KFKI RMKI, Hungary
7. S. Yokkaichi, "Vector meson measurements through dielectron: planned experiment at J-PARC" Workshop "Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy", 2010/9/17, ECT*, Trento, Italy
8. S. Yokkaichi, "Vector meson in nuclear medium, experiments at KEK and J-PARC" NFQCD 2010 Symposium of 'Exotic Hadron' and 'Hadrons in Nuclei' 2010/2/18, YITP, Kyoto

9. R.Muto, "Measurement of vector meson mass in nuclear medium using p + A" US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC 2009/10/12, Hawaii's Big Island, USA
10. Y. Watanabe, "Development of GEM detectors for a large acceptance phi meson spectrometer" Hawaii 2009 3rd joint meeting of the nuclear physics divisions of the JPS and APS 2009/10/15 Hawaii's Big Island, USA

[公募研究]

[雑誌論文]

1. "First Precision Spectroscopy of Pionic Atoms at RI Beam Factory", *K. Itahashi et al., Few Body Syst. 54 (2013) 1569-1572 [査読有]
2. "BigRIPS as a high resolution spectrometer for ionic atoms", T. Nishi et al, Nucl. Instr. Meth. B317(2013)290 [査読有]
3. "Feasibility Study of Observing η' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction", K. Itahashi, *H. Fujioka et al., Progress of Theoretical Physics 128, 601-618 (2012). [査読有]
4. "Formation of η' (958)-mesic nuclei by the (p,d) reaction", *H. Nagahiro, D. Jido, H. Fujioka, K. Itahashi, S. Hirenzaki, Physical Review C 87, 045201 (2013). [査読有]

[学会発表]

1. K. Itahashi, "Pionic atom factory project at RIBF present status and future perspectives", Hadron2013, 2013/11/4-8, Nara, Japan
2. H. Fujioka, "Spectroscopy of η' -nucleus bound states at GSI-SIS", Meson2012, 012/5/31-6/5, Crakow, Poland

計画研究 D01

[雑誌論文]

1. "Design and performance study of the TOP counter", K. Matsuoka, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 732 (2013) 357-360
2. "Status and perspectives of vacuum-based photon detectors", T. Iijima, Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 639 (2011) 137-143
3. K. Inami, "TOP counter prototype R&D", Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 639 (2011) 298-301
4. "Lifetime-Extended MCP-PMT", T. Jinno, K. Inami, et al., Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 629 (2011) 111-117
5. "Measurement of Cherenkov photons by SiPMs with light guides", S. Korpar, T. Iijima, et al., Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 610 (2009) 427-430
6. "Study of an HAPD with 144 channels for the Aerogel RICH of the Belle upgrade", S. Nishida, I. Adachi, T. Iijima, et al., Nuclear Instruments and Methods A, 査読有, 610 (2009) 65-67

[学会発表]

1. K. Inami, TOP counter for particle identification at Belle II experiment, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
2. K. Matsuoka, Development and production of the MCP-PMT for the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
3. K. Suzuki, Mechanical Structure of the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
4. T. Hayakawa, Performance Tests of a full scale prototype of the Belle II TOP counter, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
5. S. Hirose, Performance of the MCP-PMT for the Belle II TOP Counter in a Magnetic Field, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2013), Dec. 2-6, 2013, Hayama, Kanagawa, Japan
6. 鈴木一仁、飯嶋徹、他、Belle II 測定器の建設の現状と展望、日本物理学会第 68 回年次大会、企画講演、2013 年 3 月 26-29 日、広島大学
7. K. Matsuoka, Design and performance study of the TOP counter, 13th Vienna Conference on Instrumentation, Feb. 11-15, 2013, Vienna
8. 飯嶋徹、第 4 回次世代光センサーワークショップ&EASIROC 研究会、2012 年 12 月 25-26 日、大阪
9. K. Inami, Progress of Belle II detector and performance, The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics, Sep. 17-21, 2012, Nagoya
10. T. Iijima, "Particle Identification at Belle II & Development of New Photodetectors", International Workshop on Probing Strangeness in Hard Processes - PSHP2010, Frascati, Italy, Oct. 2010
11. T. Iijima, "Status and perspectives of vacuum-based photon detectors", 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2010), May 2-7, 2010, Cassis, France
12. S. Shiizuka, Study of 144-channel Hybrid Avalanche Photo-Detector for Belle II RICH counter, 12th

【公募研究】

〔雑誌論文〕

1. R. Itoh, T. Higuchi, M. Nakao, S. Y. Suzuki, and S. Lee, “Data Flow and High Level Trigger of Belle II DAQ System,” IEEE Trans. Nucl. Sci. vol 60, issue 5 (2013).

〔学会発表〕

1. さこ隆志、 “赤外線照射による GSO シンチレータの放射線損傷からの回復”、日本物理学会 2013 年秋期大会、2013 年 9 月、高知大学
2. 伊藤領介、 “Belle II 実験の高次レベルトリガー (HLT)”、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 11 日、京都産業大学

計画研究 E01

〔雑誌論文〕

1. “Lattice QCD Analysis of the Polyakov Loop in terms of Dirac Eigenmodes”, *T. Iritani and H. Suganuma, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 3, 033B03:1-20 (2014) 査読有
2. “Composite and elementary nature of a resonance in the sigma model”, H. Nagahiro and A. Hosaka, Phys. Rev. C 88, 055203 (2013) 査読有
3. “Spin degeneracy in multi-hadron systems with a heavy quark”, S. Yasui, K. Sudoh, Y. Yamaguchi, S. Ohkoda, A. Hosaka and T. Hyodo, Phys. Lett. B 727, 185 (2013) 査読有
4. “X(3872) as a hybrid state of charmonium and the hadronic molecule,” *Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013, 093D01, 1-18, (2013) 査読有
5. “Determination of exotic hadron structure by constituent-counting rule for hard exclusive processes”, H. Kawamura, S. Kumano, T. Sekihara, Phys. Rev. D 88 (2013) 034010, 1-12. 査読有
6. “Dense Baryonic Matter in Hidden Local Symmetry Approach: Half-Skyrmions and Nucleon Mass”, Yong-Liang Ma, Masayasu Harada, Hyun Kyu Lee, Yongseok Oh, Byung-Yoon Park and Mannque Rho, Physical Review D 88, 014016:1-12 (2013) 査読有
7. “Gauge-Invariant Formalism with a Dirac-mode Expansion for Confinement and Chiral Symmetry Breaking”, *S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma, Phys. Rev. D 86 034510:1-11 (2012) 査読有
8. “Exotic Mesons with Hidden Bottom near Thresholds”, Shunsuke Ohkoda, Yasuhiro Yamaguchi, Shigehiro Yasui, Kazutaka Sudoh, Atsushi Hosaka, Phys. Rev. D 86 (2012) 014004 査読有
9. “Decays and productions via bottomonium for Zb resonances and other B⁻B⁺ molecules”, S. Ohkoda, Y. Yamaguchi, S. Yasui, A. Hosaka, Phys. Rev. D 86 (2012) 117502 査読有
10. “Integrating Holographic Vector Dominance to Hidden Local Symmetry for the Nucleon Form Factor”, M. Harada and M. Rho, Physical Review D 83, 114040:1-14 (2011) 査読有

〔学会発表〕

1. A. Hosaka, “Exotic Hadrons with heavy quarks”, Workshop on QCD, Hirschegg, Austria, Jan. 13-17, 2014
2. A. Hosaka, “Hadrons with heavy quarks”, FJNSP-LIA workshop, Paris, France, Sept. 30-Oct. 3 2013
3. A. Hosaka, “Photoproduction of ϕ (ss) meson”, Nstar workshop, Peniscola, Valencia, Spain, May 27-30, 2013
4. H. Suganuma, “Analytical Relation between Confinement and Chiral Symmetry Breaking in terms of Polyakov Loop and Dirac Eigenmodes in Odd-Number Lattice QCD”, QCD-TNT-III International Workshop on “From Quarks and Gluons to Hadronic Matter: A bridge too far?”, ECT*, Trento, Italy, 2-6 Sep. 2013
5. S. Kumano, “Flavor structure of the light-quark sea in nucleons and possible J-PARC projects”, Workshop on Flavor Structure of the Nucleon Sea, ECT*, Trento, Italy, July 1 - 5, 2013.
6. M. Harada, “New Approaches to In-medium spectral function -- Holographic Mean-Field Theory for Baryon Many-Body Systems - ”, “Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy”, ECT*, Trento, Italy, May 20 - 24, 2013,

【公募研究】

〔雑誌論文〕

1. T. Hyodo, Y.-R. Liu, M. Oka, K. Sudoh, S. Yasui, “Production of doubly charmed tetraquarks with exotic color configurations in electron-positron collisions”, Phys. Lett. B 721 (2013) 56-60 査読有
2. Sungtae Cho, Takenori Furumoto, Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido, Che Ming Ko, Su Houng Lee, Marina Nielsen, Akira Ohnishi, Takayasu Sekihara, Shigehiro Yasui, Koichi Yazaki (the ExHIC collaboration), “Exotic Hadrons in Heavy Ion Collisions”, Phys. Rev. C 84, 064910 (2011) 査読有.

主催した国際会議、シンポジウム、ワークショップ等

1. Hadron physics symposium, 2014/4/17-19, 名古屋大学
2. XV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013), 2013/11/4-8, 奈良県新公会堂
3. 第4回次世代光センサーに関するワークショップ兼 EASIROC 研究会(共催), 2012/12/25-26, 大阪大学
4. International Workshop on using Heavy Flavours to Probe New Hadron Spectroscopies/Dynamics. 2012/11/18-21, Pusan, Korea
5. 第二回 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(共催), 2012/7/12-13, 名古屋大学
6. 第一回 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(共催), 2011/6/23-24, 計算科学研究機構、神戸
7. 第3回次世代光センサーに関するワークショップ(共催), 2010/12/17-18, 名古屋大学
8. 12th International conference on the structure of baryons (BARYONS' 10) (後援), 2010/12/7-11, 大阪大学



Hadron2013 国際会議 (2013/11/4-8、奈良県新公会堂)



Hadron Physics Symposium (2014/4/17-19, 名古屋大学)

ホームページ

新学術領域 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
http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/

新聞報道 Belle エキゾチックハドロン関連

2012. 1. 11	日経産業新聞	特異な粒子 新タイプ 高エネ研など 加速器実験で発見 クォーク 4 個以上 (P. 7)
2012. 1. 11	毎日新聞	新種の粒子発見 質量陽子の 11 倍 高エネ研など (24 面)
2012. 1. 11	日刊工業新聞	新種のハドロン粒子 重いボトム・クォーク含む 高エネ機構発見 (19 面)
2012. 1. 20	科学新聞	KEK 重いクォークを含む新たなエキゾチックハドロン発見 (4 面)
2012. 2. 5	読売新聞	重いクォーク含む新粒子発見 高エネ機構 (25 面)
2014. 5. 14	電気新聞	新粒子検証成功 LHC で再発見(2 面)
2014. 5. 13	時事通信	新粒子、7 年越しで確認 = LHC で追試成功 - 高エネ研
2014. 5. 23	サイエンスポータル	4 クォーク荷電粒子発見は正しかった

アウトリーチ活動

(1) 一般むけ講演

1. 飯嶋 徹, 「素粒子物世界への誘い」明和高校講演会, 2014/6/10 (名古屋市)
2. 飯嶋 徹, 「目には見えない“素粒子”達の世界」多治見北高校講演会, 2014/2/22 (多治見市)
3. 延與 秀人, 「私たちはなぜ重いか - 宇宙誕生・天地創造・万物創生、ヒッグス粒子から超重元素まで -」ONSA 25周年記念講演会, 2014/1/27、大阪大学中之島センター(大阪市)
4. 飯嶋 徹, 「新素粒子を探る」NHK-名古屋大学 連携講座, 2013/10/16 (名古屋市)

5. 延與 秀人、「私たちはなぜ重いのかーヒッグス粒子から超重元素までー」、知的刺激週間スペシャル講演会、2012/10/29、西武学園文理中学・高等学校（埼玉県 狭山市）
6. 飯嶋 徹、「高エネルギー加速器を用いた実験の紹介」、高校生のための素粒子サイエンスキャンプ（Belle Plus 2012）、2012年8月7日
7. 延與 秀人、「宇宙誕生 100万分の1秒後の謎」、埼玉県民の日 特別講演、2011/11/14、埼玉県立総合教育センター（埼玉県 行田市）
8. 宮林 謙吉、「物理学の『見えない』ものを『見る』工夫」奈良県立畝傍高校SFU講義、2011年2月3日。
9. 飯嶋 徹、「Bファクトリー実験における三つの発見」名古屋大学高等研究院セミナー、2010年3月19日。
10. 飯嶋 徹、「素粒子研究の最先端」東海高校中学“サタデープログラム17th”、2010年6月26日。

(2)その他

1. 理化学研究所一般公開で、方位磁石を用いた「対称性の自発的破れ」の演示模型（写真）を製作し（2011年4月）、J-PARC E16 実験ポスターとともに展示、説明した



写真 「対称性の自発的破れ」の演示模型：磁石で外乱を与えたあと緩和を待つと磁区構造(右)ができる。

2. 大阪大学核物理研究センター公開・見学：高校生から一般市民を対象に随時希望に応じて加速器施設の公開を行なうとともに、本領域研究に関連する原子核・素粒子物理に関する最新の成果と、講義等を通して紹介している。2010年は701名が訪れた。
3. KEKにて行われる高校生のための素粒子サイエンスキャンプ（Belle Plus 2014）、2014年8月6-9日を共催し、講演や生徒の実習指導を行う予定である。

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

「新ハドロン」新学術領域の創設によって、これまで独立に研究を進めてきた素粒子-原子核分野の研究者の本格的な連携が始まったことは、「2. 研究組織と各研究項目の連携状況」や「3. 研究領域の設定目的の達成度」の欄に記したとおりである。こうした本領域の研究活動や総括班の取り組みによって、関連学問分野に以下のような貢献ができたと考える。

● 学術上の貢献：

本領域の開始後、「XYZ」と総称されるエキゾチックハドロンの研究は目覚ましく進展した。領域開始後の5年弱の期間に、Bファクトリー実験において11種類もの新しいハドロン粒子が見つかり、エキゾチック状態の候補は以前に見つけていたものも含めて20種類に達した。これにより、クォーク・ハドロン物理がこれまで考えられていたよりはるかに豊富な内容を含むことを示した。その中にはボトムクォークを構成粒子とする粒子もあり、特に、電荷を持ちボトム・反ボトムクォーク対を含む $Z_b(10610)$ と $Z_b(10650)$ の発見は特筆すべき成果である。理論研究によって、これらの新粒子が各々 $B\text{-}B^*$ と $B^*\text{-}B^*$ の分子状態と解釈できることが確実となり、さらに、 Z_b が発見されたのと同じ反応パターンで $Z(3895)^+$ が見つかったことや、 $X(3872)$ に関する理論的考察の深まりにより、これらもまた $D\text{-}D^*$ の分子状態である可能性が高まった。本領域開始以前には混沌としていた XYZ 粒子の解釈に対して、まさに「多彩なフレーバー」によりエキゾチック状態の本質を系統的に探る本領域のアプローチで切り込むことができた。こうしたBファクトリーにおける重クォーク (c, b クォーク) 領域を中心とした成果に加え、SPRING-8 や J-PARC においても軽クォーク (u, d, s クォーク) 領域での新しいデータが得られ、軽クォークから重クォーク領域の広いエネルギースケールでハドロン分光学を系統的に捉え直す道が開けた。

● 技術開発上の貢献：

本領域における分野間連携による研究は実験技術開発上も大きなインパクトがあった。特にスーパーBファクトリー実験に向けて名古屋大学を中心に開発してきた次世代粒子識別装置 (TOP カウンター) の技術が確立し、LEPS2 実験への応用検討も始まっている。さらに、公募研究とも連携して、従来は不可能であった $n=1.1$ 以上の超高屈折率エアロジェル輻射体を製作する新技術の開発や、ポータブルなデータ収集システムの開発、J-PARC E16 実験の飛跡検出のために開発された国産大型 GEM フォイルなど、Bファクトリー、SPRING-8、J-PARC の三施設で広く活用できる技術開発が進んだ。これらの中には、TOP 用高次間分解能光検出器の PET 装置への応用や、エアロジェルによる宇宙塵捕獲、GEM フォイルの中性子検出器への応用など、他分野への波及効果が期待できるものもある。

● 人材育成上の貢献：

本領域によって、素粒子-原子核の境界領域で活躍できる人材育成も進んだ。本科研費で5年間の間に雇用した21名の若手研究者 (特任助教や研究員) のうち18名が転出し、特に3名が教授となって研究グループを率いる立場に昇進した。また、本領域の関連する研究により26名が博士号、56名が修士号を取得した。毎年夏に実施した若手スクールをはじめとする総括班の人材育成施策が、大学院生を動機付けエンカレッジすることに繋がったと考える。

● 今後の学問発展への貢献：

本領域研究によって、Bファクトリー、SPRING-8、J-PARC の三施設の高輝度化に向けた準備が強力に進んだ。スーパーBファクトリー実験で用いる TOP カウンターやエアロジェル RICH 検出器の準備が進み、SPRING-8 の LEPS2 実験用の検出器の準備、J-PARC E16 実験の検出器生産体制が整った。さらに、本領域による研究活性化か後押しする形で、LEPS2 ビームラインの建設や J-PARC の高運動量ビームラインの建設が、本領域期間中に始まった (LEPS2 ビームラインは既に運用開始)。本領域に参画する研究者が中心となって、J-PARC における新しい実験の提案も進んでいる。

● 国際的な貢献：

スーパーBファクトリー、SPRING-8/LEPS2、J-PARC の三施設は、高輝度の電子-陽電子衝突や高強度のフォトンビーム、ハドロンビームを提供する日本のユニークな加速器施設である。一方、LHC の運転開始によって、ATLAS、CMS、LHCb 実験からもハドロン分光データが出始め、LHCb 実験によって Belle 実験が発見した $Z(4430)^+$ が再確認された例にあるように、今後 LHC 実験、中国高能物理研究所の BESIII 実験や、米国の J-Lab、RHIC 加速器における実験など、当領域が進めたハドロン物理が世界的広がりを呈している。

以上のとおり、本領域研究の創設によって、素粒子-原子核分野の本格的連携が進み、軽クォークから重クォークまでの多彩なフレーバー自由度を駆使した新しいハドロン物理学を開拓し、日本主導の基礎科学への貢献になったと自負している。このことは総括班が主催した領域評価委員会においても高く評価されている。