

領域略称名：新ハドロン
領域番号：2104

平成23年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

「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」

(領域設定期間)
平成21年度～平成25年度

平成23年6月

領域代表者 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

研究領域の目的及び概要	3
研究の進展状況	4
研究を推進する上での問題点と今後の対応策	5
主な研究成果(発明及び特許を含む).....	6
研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等)	22
研究組織と各研究項目の連携状況	29
研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む)	33
今後の研究領域の推進方策	34
総括班評価者による評価の状況	35

研究領域の目的及び概要

研究領域名 : 「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」
研究期間 : 平成21年度～平成25年度
領域代表者 : 名古屋大学・現象解析研究センター・教授・飯嶋 徹
補助金交付額 : H21:172,200千円, H22:239,200千円, H23:239,100千円, H24:236,800千円,
H25:217,300千円, 合計:1,104,600千円

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。

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。

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

研究の進展状況

計画研究A01「Bファクトリー実験におけるエキゾチックハドロンの研究」

ボトモニウム領域のハドロン探索の成果として、 $\Upsilon(5S)$ でのデータを使って h_b 粒子を発見した。さらにこれらの崩壊構造から、 $\Upsilon(nS)$ π および $h_b\pi$ に崩壊する荷電ボトモニウム粒子 $Z_b(10510)^{\pm}$ と $Z_b(10560)^{\pm}$ を発見した。チャーモニウム領域では、二光子反応における $J/\psi \omega$ および $J/\psi \phi$ 生成での新共鳴粒子の発見や、 $X(3872)$ 粒子の電磁崩壊分岐比や角度分布の解析から量子数を特定する成果をあげた。さらに、 $\omega\phi$ や $\phi\phi$ を用いてストレンジクォーク領域への拡張が進んでいる。

これらの解析は、Belleと本領域の研究者と密接な協力により進められているが、当科研費による研究員や計算機・ディスクシステムの増強により解析体制が強化された。また、Belleの原子核研究者グループ(NPC)と定期ミーティングにより解析の議論を深め連携を強化している。

計画研究B01「異状な構造をもつバリオンの存在形態の解明」

LEPS施設で未知のバリオン共鳴を示唆する興味深い結果などを得た。重陽子中の中性子を標的に $\gamma n \rightarrow \Theta K$ による Θ 探索を、2009年に発表した際と同じ解析手法・条件で、3倍の統計データに対し行っている。シグナル領域を排したデータで運動量・エネルギー較正を慎重に進めている。一方、J-PARCで $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Theta$ による Θ 探索を行い予備的ながら生成断面積の上限を得た。生成機構に対する知見を与えるだろう。これはJ-PARCハドロン施設で最初の物理成果である。本領域発足が後押ししLEPS2計画が前進した。理研(仁科セ)により実験室建屋が竣工した。2012年には阪大により新ビームライン建設が始まる。大立体角検出器に利用するBNL-E949検出器の解体・運搬が始まった。検出器開発では飛跡検出器の空間分解能とタイミング検出器の時間分解能を確認した。複数の深紫外レーザーを平行同時入射し光子ビームの高強度化と高エネルギー化を実現した。

計画研究C01「カイラル対称性の破れによる質量生成機構の実験的解明」

電子陽電子対検出用大立体角スペクトロメータをJ-PARCハドロン実験施設に建設し、ベクトル中間子の原子核中での質量変化を系統的に測定する(E16実験)。

このための検出器として、高計数率に耐えるためのGEM Trackerと、電子同定のためのハドロン・ブラインド・チェレンコフ検出器(HBD)を開発している。双方ともGEM(Gas electron multiplier)による電子増幅を使って粒子を測定する。GEMはCERNで開発され販売されているが、世界中からの需要にはこたえられず、国産化がもとめられている。C01では、国内企業と協力して大型GEMの国産化に成功し、両検出器の量産に見通しをつけた。試作機のビームテストにより、Trackerの位置分解能 $100 \mu m$ とHBDによる電子飛跡からの光電子数10個を達成した。

計画研究D01「高輝度実験に向けた先端的測定器の開発」

高輝度Bファクトリー(SuperKEKB/Belle II)実験に向けて、「TOPカウンター」および「エアロジェルRICH」検出器と呼ばれる独自のリングイメージング型粒子識別装置の技術確立を進めた。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、光検出器の量子効率と寿命の改良を行うとともに、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確認した。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た。両検出器ともに、実機デザインや放射線耐性などの実用上の問題点の洗い出しが進み、2010年度までにはSuperKEKB計画の正式な予算化もなされ、いよいよ実機検出器を建設する段階に達した。

計画研究E01「多彩なフレーバーがもたらすクォークハドロン物質の新形態に関する理論研究」

QCDの基礎と最新の実験データに基づいて、分光からハドロン物質までの多様な現象を記述し、背後にある非摂動機構の解明を目指している。ハドロン分光ではマルチクォーク成分の混合と対称性に基づいた議論を展開し、 $X(3872)$ の理解を進め、また新たな重いバリオンの存在を予言した。最近Belleで発見された Z_b 粒子の解明が急務である。軽いクォークの準粒子的な性質を調べるため、物質中におけるハドロンの性質、またクォークの伝導度等の研究がなされた。さらに非摂動グルーオンの性質が格子QCDによって調べられた。今後はこれらをインプットにした現象の研究を図る予定である。

研究を推進する上での問題点と今後の対応策

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の影響があった。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学研究所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転することができるよう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ている。
- 計画研究C01と公募研究のいくつかはJ-PARC加速器を使用する。震災によるビームの停止に影響を受けてはいるが、復旧予定は公表されており、それに基づいてスケジュールを調整していく。
- また、当面の間、J-PARCや東北大電子光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るが、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ている。

その他の問題点とその対応策は以下のとおりである。

- 計画研究-C01では、J-PARCハドロン実験施設の高運動量ビームラインはKEKが建設する予定で、現在H24(2012)年度の予算化にむけて動いている。本研究計画当初にH24(2012)年度に予定していたファーストビームはH25(2013)年度以降になる。研究分担者の小沢がH23年度に東大からKEKに異動して同ライン建設を担当している。また、H22年度にはHBD読出用大型(650mm角)四層基板の製作で、工法に問題があり繰り越しを行った。現在別の企業を交えて新しい工法を試行中であり、9月には製作可能と考えている。(新工法が不調の場合には標準的な300 mm角程度の四層基板の4枚あわせで製作することで対応する。)
- 計画研究D01において、当初の予定では、平成22年6月までに光検出器の開を完了と仕様確定を行い、H23年3月までにTOPカウンターの1モジュールの試作を完了の予定であったが、光検出器の新たな制作方法の導入によって量子効率の改善が可能なことがわかり、開発期間を3ヶ月延長し、試作をH23年度に持ち越すこととした。

主な研究成果(発明及び特許を含む)

計画研究A01「Bファクトリー実験におけるエキゾチックハドロンの研究」

[1] ボトモニウム粒子の領域における新共鳴粒子の発見

Belle実験での $\Upsilon(5S)$ のエネルギーでの大量のデータは、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 クォーク対を含むエキゾチックハドロンの研究の格好の場を与えるものである。Belleでは、 $\Upsilon(5S)$ のエネルギーでの $\Upsilon(nS)\pi\pi$ ($n=1, 2, 3$)の生成率が、他の $\Upsilon(mS)$ での $\Upsilon(nS)\pi\pi$ ($m>n$; $m, n=1-4$)への崩壊に比べて100倍も大きく、反応断面積のエネルギー依存性も異なることを発見し、通常の b クォークと反 b クォーク対よりなるボトモニウムの $\Upsilon(5S)$ と Y_b と呼ばれるエキゾチック粒子の質量が重なっていることを示した。 Y_b 粒子は、 $Y(4260)$ のチャームクォークを b クォークに置き換えたエキゾチック粒子と考えられている。 $Y(4260)$ が通常のチャームモニウムと異なり、 $J/\psi\pi\pi$ や $h_c\pi\pi$ への崩壊分岐比が大きいことから、 Y_b 粒子でも $h_b\pi\pi$ への崩壊が期待される(h_b 粒子は唯一未発見のボトモニウム粒子であった)。Belleでは $\Upsilon(5S)$ での全データを使って、 $\pi\pi$ 対に対する欠損質量を測定することにより、 $\Upsilon(5S)\rightarrow h_b\pi\pi$ 崩壊の包括的探索を行った。図1に示すようにそれまで知ら

れていた $\Upsilon(1,2,3S)$ 粒子に加えて $h_b(1P)$ [基底状態]と $h_b(2P)$ [励起状態]の二個の新しいボトモニウム粒子を発見した。これらの二つの粒子の質量は、理論による予言値と非常によい一致を示している。また、 $h_b\pi\pi$ の生成率も $\Upsilon(nS)\pi\pi$ と同様に異常に大きいことは、 Y_b 粒子の新たな証拠を示すものである。

さらに、 π に対する欠損質量(これは $h_b\pi$ の不変質量に相当する)の分布を調べることにより Y_b 粒子の崩壊の中間状態を調べることができる。結果は、図2に示すように $h_b(1P)\pi$ と $h_b(2P)\pi$ の両方に質量10510 MeVと10560 MeVの二つのピークが観測された。これらは $Z_b(10510)$ と $Z_b(10560)$ と名付けられ、 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。

また、 $\Upsilon(5S)\rightarrow \Upsilon(nS)\pi\pi$ 崩壊は約1/5のデータの解析ですでに観測されていたが、今回は全データを使ってDalitzプロットの振幅解析により中間状態を詳細に調べることができるようになった。その結果を $M[\Upsilon(nS)\pi]_{\max}$ 軸へ射影した結果を図3に示す。 $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(2S)$ および $\Upsilon(3S)$ の三つのすべての場合で $\Upsilon(nS)\pi$ に崩壊する二つの共鳴粒子を示している。振幅解析によるフィットの結果、どれも $h_b\pi$ の分布に発見された二つの粒子と質量が一致することがわかった。従って、これらの二つのエキゾチック粒子は、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。

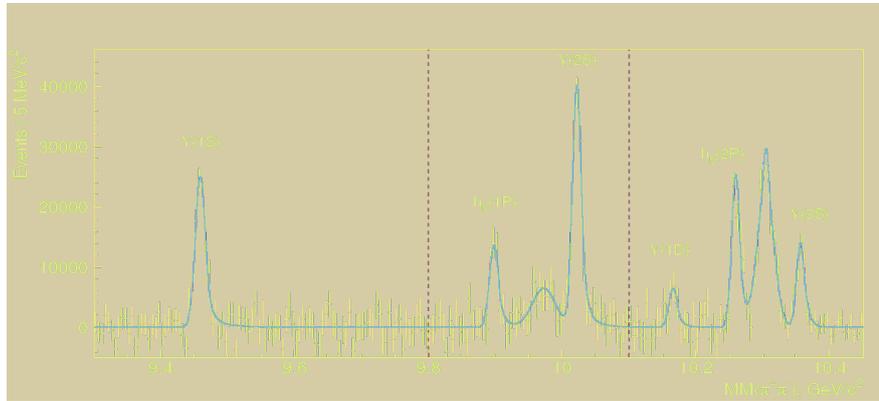


図1: $\pi\pi$ 対に対する欠損質量分布。ラベルのついていないピークは連鎖崩壊によるもの。

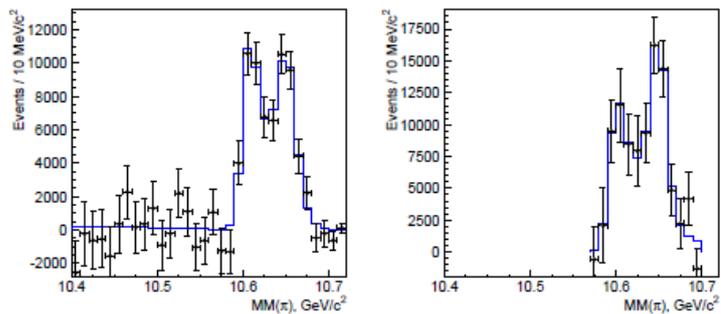


図2: $h_b(1P)\pi\pi$ 崩壊(左)と $h_b(2P)\pi\pi$ 崩壊における π に対する欠損質量分布。ヒストグラムはフィットの結果。

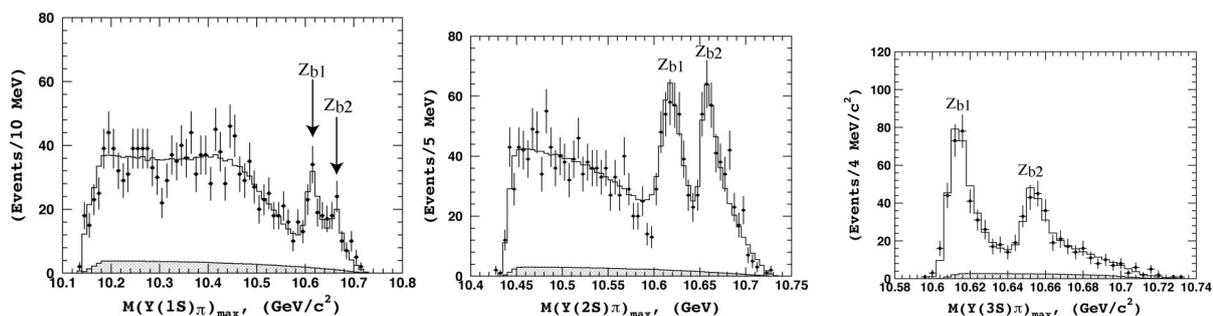


図2: $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S) \pi\pi$ (左)、 $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(2S) \pi\pi$ (中)、 $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(3S) \pi\pi$ (右) の過程における $M[\Upsilon(nS)\pi]_{\max}$ 分布 ($n=1, 2, 3$)。ここで $M[\Upsilon(nS)\pi]_{\max}$ は $\Upsilon(nS)$ と π からなる系の不変質量の当該事象中で大きい方の値を指す。全ての $\Upsilon(nS)$ の場合で二つのピークが同じ質量値にみとめられる。

これらの5つの崩壊モードでの崩壊角度分布を詳しく調べた結果、スピンは1、パリティは+、($J^P = 1^+$)であることが確かになった。また、 $\Upsilon(nS)$ 粒子(アイソスピン0、Gパリティ-)と π^- (アイソスピン1、Gパリティ-)に崩壊することからアイソスピン1、Gパリティ+ ($I^G = 1^+$)であることがわかり、 Z_b 粒子の基本的パラメータが明らかになった。今後は、 Z_b 粒子がB中間子モレキュールなのかテトラクォークなのか、それとも別の構成をもつのかを明らかにすることが課題である。

[2] 光子・光子衝突反応での新共鳴粒子の発見

光子・光子衝突反応は、 $J^{PC}=0^-, 0^{++}, 2^{++}$ の状態の共鳴粒子の探索に適している。Belle では J/ψ 中間子と ω 中間子および J/ψ 中間子と ϕ 中間子の終状態で探索を行い、二個の新共鳴粒子を発見した。 J/ψ 中間子と ω 中間子の場合には質量が 3915 MeV で崩壊幅が 17 MeV の新共鳴粒子を発見した ($Y(3915)$ と名付けられた。図4左)。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)と同一の粒子である可能性があり、今後の詳しい性質の研究が待たれる。 J/ψ 中間子と ϕ 中間子の組み合わせでは質量が 4350 MeV で崩壊幅が 13 MeV の新共鳴粒子を発見した ($X(4350)$ と名付けられた。図4右)。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。

[3] X(3872)の詳細な解析

2003年にBelle実験が $B \rightarrow K X(3872) [\rightarrow J/\psi \pi\pi]$ 崩壊モードでエキゾチックハドロンの最初の候補として $X(3872)$ を発見して以来、Belleや他の実験でその性質を解明するために様々な崩壊モードで $X(3872)$ を探索・測定するなど様々な研究が行われてきた。Belleでは、新たに $X(3872) \rightarrow J/\psi \gamma$ 、 $J/\psi \omega$ 、 $D^0 \bar{D}^0 \pi^0$ への崩壊モードを発見してきた。これらにより $X(3872)$ の荷電パリティは $+(C=+)$ であることを確定し、種々の崩壊への相対的な分岐比などから通常のチャーモニウムとしては説明できないこ

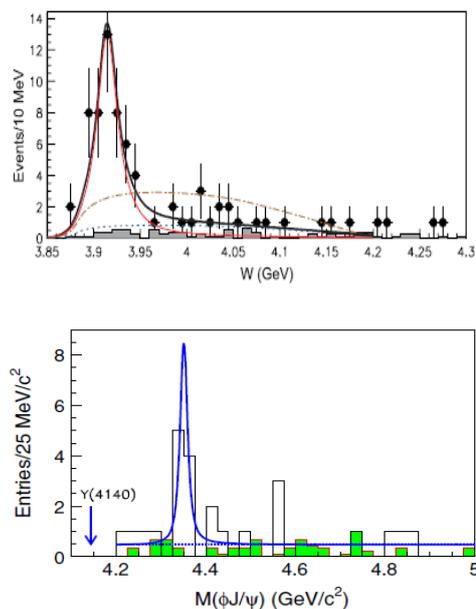


図4: (上) 光子・光子衝突反応で生成された J/ψ 中間子と ω 中間子の不変質量 (W) のデータ分布とフィット。(下) 生成された J/ψ 中間子と ϕ 中間子の不変質量のデータ分布(ヒストグラム)とフィット。塗りつぶしヒストグラムはバックグラウンド。

とが明らかになった。今回、Belle実験では、収集した全データ(7.7億のB中間子対)を使って、さらに詳細なX(3872)の解析を行った。B→J/ψ(ψ')γK崩壊モードによりX(3872)の電磁崩壊の詳細研究を行った。初めて5σ以上のX(3872)→J/ψγ崩壊の信号を得、分岐比を精密測定した。X(3872)→ψ'γ崩壊では有意な信号は見られず、上限値を得た。また、最も信号数の多いX(3872)→J/ψππ崩壊モードを使って、以下の4つの知見を得た。<1>親が荷電B中間子と中性B中間子の場合でX粒子の質量に差がないことを確立し、クォーク対と反クォーク対の結合状態説を否定した。<2>X(3872)の全幅1.2 MeV以下と制限した。<3>終状態の粒子の角度分布を詳細に分析し、スピン・パリティ(J^{PC})の値が1⁺または2⁺のどちらかであることを結論した(図5)。ただし、2⁺の場合は二つの状態の特殊な割合と位相での重ね合わせのみが許される。<4>ππ対は主にρ中間子を通して生じていることをその質量分布から示した。さらに、荷電を持つパートナーをJ/ψππ崩壊モードで探索したが信号はなく、荷電パートナーをもたないアイソスピン0の粒子であることを確定した。さらに、Υ(1S)およびΥ(2S)でX(3872)への輻射崩壊を探索したが、信号は見られなかった。これらの詳細な研究により、X(3872)の性質に対する理解が格段に深まったと言える。

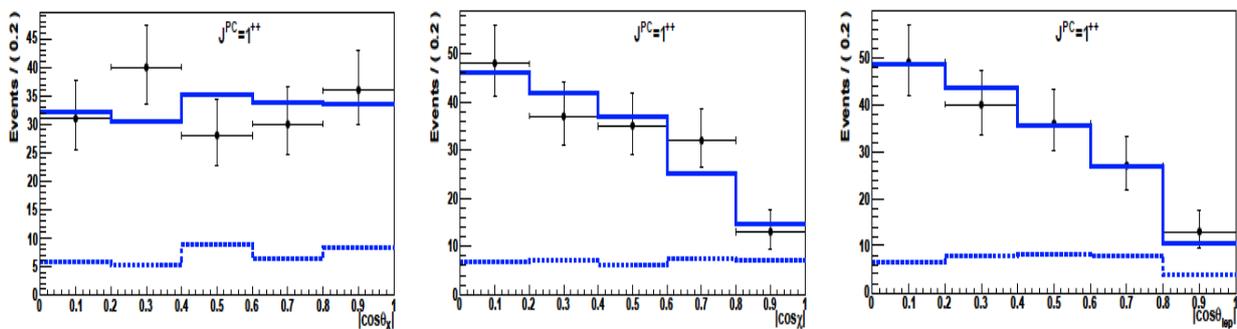


図5：B→K X(3872)[→J/ψ π π]崩壊モードにおける崩壊粒子の角度分布。破線ヒストグラムはバックグラウンド、実線ヒストグラムはJ^{PC}= 1⁺⁺の場合の分布を示す。

[4] 領域の若手の研究活動

当計画研究ではBelleで関連する物理解析を行っている協力研究者と密接に協力しながら研究を進めているが、若手研究員を雇用した他の計画研究に関連しているBelleの原子核研究者や若手研究者および学生とも連携を深めることにより若手による活動を活性化している。上記の成果のなかでも、光子・光子衝突反応におけるX(4350)の発見やX(3872)の電磁崩壊の研究などは、当学術領域で雇用した若手研究者によるものである。これらの若手・原子核研究者および学生は、さらにX(3872)や他のX, Y, Z粒子に関連する詳細研究や、ωφやφφでの共鳴粒子探索などストレンジクォークを含む低エネルギー領域への研究の拡張を進めている。また、チャームクォークを二個含むエキゾチックハドロンの探索や、電子・陽電子衝突におけるハドロンの生成および破砕関数の詳細研究などにより新しいハドロンの構造の解明などを進めている。

[5] 本領域発足後の成果一覧

新粒子を発見したもの(発見の過程)	既発見粒子の性質を明らかにしたもの
Υ(3915) (γγ→J/ψ ω)	X(3872)→J/ψ γ の確認とX(3872)→ψ' γ の探索
X(4350) (γγ→J/ψ φ)	X(3872)→D ^{*0} D ⁰ の崩壊分岐比・質量・幅の測定
h _b (1P) (Υ(5S)でのππ欠損質量)	B [±] とB ⁰ の崩壊で生じるX(3872)質量差測定
h _b (2P) (Υ(5S)でのππ欠損質量)	B [±] とB ⁰ の間でのX(3872)への崩壊分岐比測定
Z _b (10610) (Υ(nS)π [±] , n=1,2,3およびh _b (1P,2P) π [±])	X(3872)→J/ψππ崩壊角度分布による量子数決定
Z _b (10650) (Υ(nS)π [±] , n=1,2,3およびh _b (1P,2P) π [±])	

計画研究B01「異状な構造をもつバリオンの存在形態の解明」

[1]LEPS施設におけるハドロン物理研究の進展

LEPS施設において逆コンプトンレーザー電子光ビームを用いたハドロン実験を継続して実施しデータ収集および解析を進めた。論文として公表された成果について以下に報告する。

(1) 未知のバリオン共鳴状態を示唆する成果

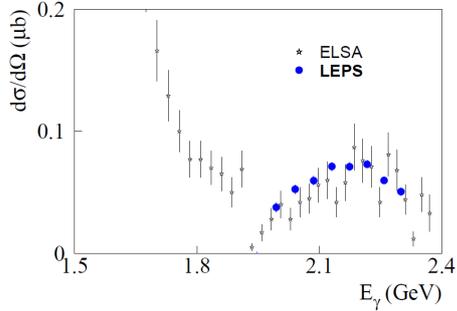


図1: $\gamma p \rightarrow p\eta$ 反応微分断面積

LEPSから新しい共鳴状態の可能性を示すデータが得られた。まず、 η 中間子光生成断面積のエネルギー依存性から、入射エネルギーで2GeVより上にBump構造が観測された(図1)。このような構造は ω 、 π^0 、 η' 中間子生成では観測されず、ストレンジクォーク・反ストレンジクォーク対を含むバリオン共鳴と考えられる。また、 $\gamma p \rightarrow K^+\Lambda(1520)$ 反応断面積を精度の良い測定から質量2.11GeV、幅140MeVのBump構造を $E_\gamma=2.0$ GeVに発見した(図2)。核子共鳴を入れた理論計算(実線)によりLEPSのデータを再現できる。

(2) 閾値領域でのハドロンの光生成機構の研究

エキゾチックハドロンの生成機構はその内部構造を探る重要な手掛かりを与える。 $\Lambda(1520)$ の前方への光生成反応では陽子標的に比べ中性子標的からの光生成が強く抑制されていることを観測した(図3)。これは、 t チャンネルの K^* 交換反応に比べて K 交換反応とコンタクト項の寄与が

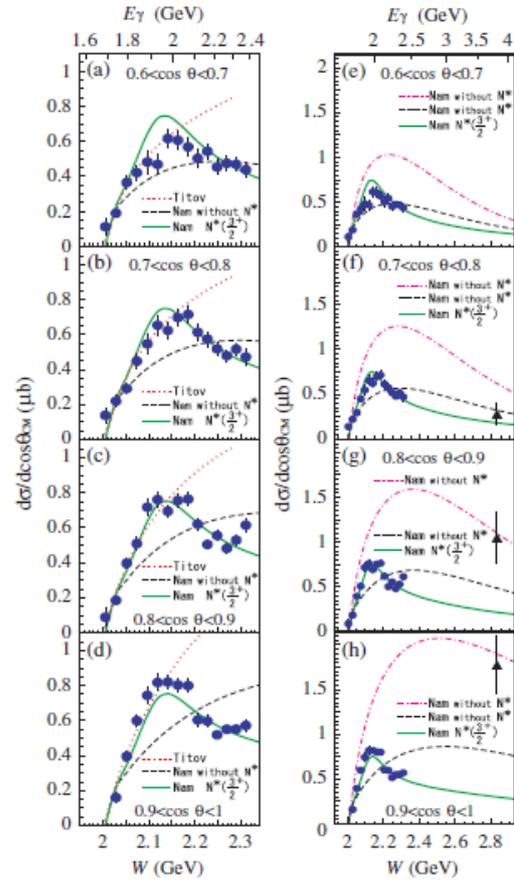


図2: $\gamma p \rightarrow K^+\Lambda(1520)$ 反応の微分断面積。横軸は重心系での全エネルギー。

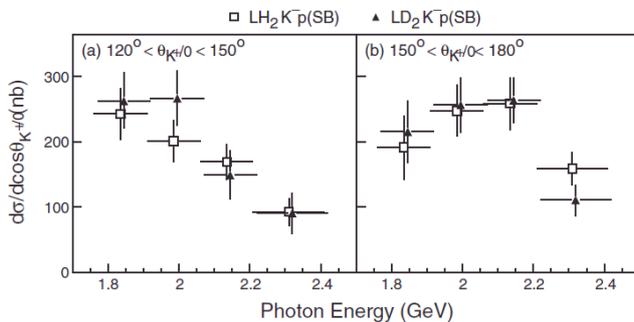


図3: 陽子(左)と重陽子(右)からの $\Lambda(1520)$ の前方への光生成反応断面積

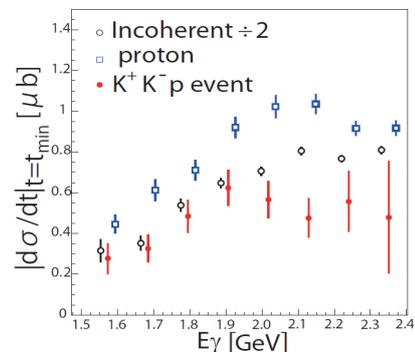


図4: 重陽子での ϕ 中間子生成微分断面積

大きいことを示す。 $\Lambda(1520)$ の後方生成における微分断面積やphoton beam asymmetry、decay asymmetryを調べ、上記の解釈と一致する結果を得た。ペンタクォーク Θ^+ の光生成においても同じ生成機構が働いている可能性があり、中性子標的のみでその光生成が観測されている現状を理解するヒントとなっている。

(3) ベクトル中間子と核媒質の大きな相互作用を示唆する結果

重水素標的を用いた 0° での ϕ 中間子生成微分断面積測定(図4)から、核子あたりの断面積(図中○)が真空中の陽子のそれ(○)に比べて30%以上小さいことが分かった。終状態にK中間子2個(ϕ)と陽子を捉えた場合も同様であるからこの現象は核子によらない。核媒質効果が小さいと考えられていた重陽子での興味深い結果であり、ベクトル中間子と核媒質の相互作用に関する重要な情報である。

(4) ペンタクォーク Θ^+ の研究

Θ^+ 粒子はレーザー電子光ビームを原子核に照射した実験で初めて実験的に存在の可能性が示された5クォーク粒子である。2002年のLEPSでの観測に続き、10近くの研究グループから、その存在を支持する結果が発表された。2004年以降、 Θ^+ 粒子の生成が確認出来ないという報告が相次いだ。以来、実験的には非常に混沌とした状況が続いている。これは Θ の崩壊過程の逆反応である $K\cdot n \rightarrow \Theta$ 反応以外は生成断面積の理論的予想が難しく異なる実験結果を比べる際に大きなモデル依存性が生じることも理由の一つである。一方、 Θ の存在が確立すれば、反応過程による生成率の違いは、 Θ の構造に対し大きな手がかりを与える。LEPSでは、 Θ^+ の存在を検証するため重陽子を標的とする $\gamma n \rightarrow \Theta \cdot K$ の探索を目的とする再実験を2002-2003年と、2006-2007年の2回にかけて行なった。2009年には、2002-2003年データの解析が終了し、 Θ^+ 粒子生成を強く示唆する実験結果が得られ論文に発表した。2009年に解析されたデータの3倍量の高統計データを用いて行っている進行中の解析では、人為的バイアスを極力避けるため、2009年の論文に詳細に記された解析手法・解析条件を全く変えずに用いるblind analysisという手法をとっている。現在、シグナル領域を排除したデータのみを用い、運動量及びエネルギー較正をしているが、 $d(\gamma, K^+K^-)X$ 反応の欠損質量スペクトル中で、Coherent ϕ 生成に対応する重陽子ピークの分解能が十分でないことが明らかになった。原因の究明と問題の解決に全力で取り組んでいる。

[2] J-PARCにおけるエキゾチックハドロンの研究

J-PARC E19実験は、 $p(\pi^-, K^-)$ 反応におけるペンタクォーク Θ^+ 探索を目的とした実験である。J-PARCハドロン実験施設K1.8ビームラインにおいて、 π^- 中間子ビームを液体水素標的に照射し、散乱された K^- 中間子を超伝導スペクトロメータ(SKS)で測定する(図5)。2009年10月に実験機器が完成し、翌2月にかけて断続的に検出器の調整を進めてきた。2010年10月から11月にかけて初めての物理データ収集を行い、目標の16%の統計を蓄積した。2010年秋に得られたデータから、ビーム粒子および散乱粒子測定のためのスペクトロメータ全系の性能評価を行い、期待された性能を満たしていることを確認した。較正用に取得した Σ^+ 生成データを解析し、 Θ^+ 生成反応では1.4MeV(FWHM)という当初期待以上の高い質量分解能を達成していることが確認できた。図6に、 $p(\pi^-, K^-)$ 反応での欠損質量分布を示す。予備的な結果ながら、期待される Θ^+ の質量1.53GeV付近に有意なピークは見つかっておらず、断面積の上限値として $0.3 \mu\text{b/sr}$ が得られた。なお、これはJ-PARCハドロン実験施設における最初の物理成果である。この値は、崩壊幅が1MeVであると仮定した理論計算と同程度である。前述した理論の不定性もあり、この結果がLEPSの結果や0.36MeVという崩

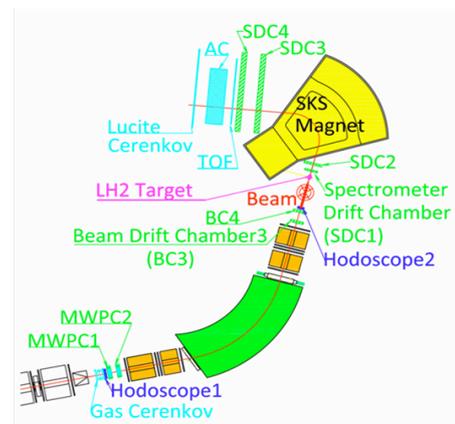


図5: K1.8 ビームラインスペクトロメータおよびSKS

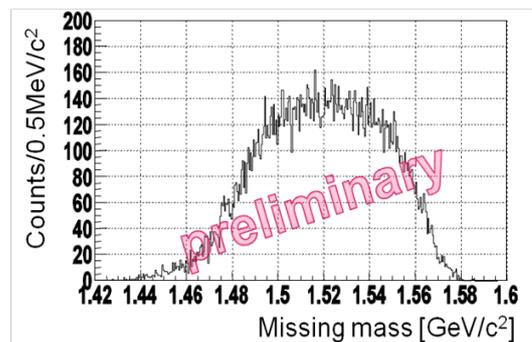


図6: $p(\pi^-, K^-)$ 反応の欠損質量分布

壊幅を発表したDIANA実験の結果を直接否定するものではないが、今後統計をあげて当初目標である75nb/srの感度を達成するべく実験を続ける予定である。

[3] 検出器開発の成果

LEPS2施設で用いるTPC(Time Projection Chamber)検出器とRPC(Resistive Plate Chamber)検出器の開発について進捗があったので成果を報告する。

標的側方に散乱される粒子の飛跡を検出するためにTPCを用いる。読み出し部にGEM(ガス電子増幅器)かマルチワイヤーを用いるかを決定するため、読み出し部試験機(図7)を用いて位置分解能の評価を行った。試験はLEPSビームラインで生成した陽電子を用いた。マルチワイヤー読みだしを用いて、**132 μm** と十分な位置分解能が得られた(図8)。

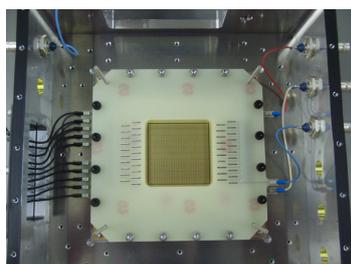


図7：TPC読み出し部試験機

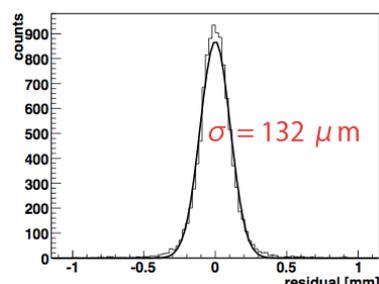


図8：TPCの飛跡残差分布

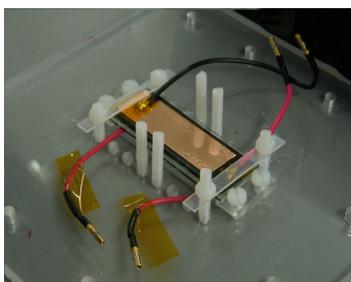


図9：RPCの試験機

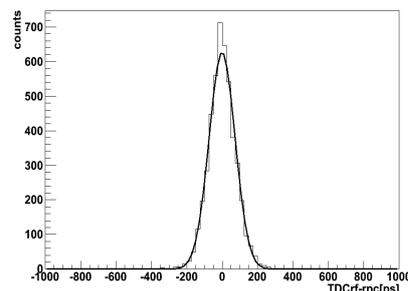


図10：RPCの時間分解能

粒子の飛行時間を測定し運動量と合わせて粒子識別を行うためにRPCを用いる。LEPSでの陽電子を用いて評価し試験機(図9)について**70psの時間分解能を得た(図10)**。読み出し回路の改善を行い50psの分解能を目指す。

[4] 大立体角検出器の建設とLEPS2計画の進展

光ビームの直線偏光面と終状態の中間子の放出方向や崩壊面との相関を見ることにより、通常はコントロールできない交換粒子のスピン・パリティに強い制限を加えることができる。従って縦偏光光ビームを用い生成と崩壊を同時に測定することにより、エキゾチックハドロンや分子共鳴状態の構造の重要な手がかりを得ることが出来る。このような研究のためには、あらゆる方向と運動量を持った様々な粒子を捉える大立体角検出器と大強度ビームが不可欠である。

本新学術領域の発足が後押しとなってSPring-8の長尺ビームラインを用いたLEPS2計画が前進した。2012年には大阪大学により、LEPS2ビームラインの建設が始まり、また共同研究を行う理研・仁科加速器センターにより実験室建屋が建設された(図11)。大立体角検出器の開発のためには、Brookhaven National Laboratory (BNL)のE949検出器を再利用する。このため、BNLと覚書を交わし、検出器の解体が行われた(図12)。

本学学術領域での研究で有効性と安定性が確かめられた複数レーザーの平行同時入射方式は、LEPS2でも採用され従来の約10倍のビーム強度が得られる見込みである。



図11：LEPS2実験室建屋



図12：E949検出器解体

計画研究C01「カイラル対称性の破れによる質量生成機構の実験的説明」

本計画研究では 電子陽電子対検出用大立体角スペクトロメータをJ-PARCハドロン実験施設に建設し、ベクトル中間子の原子核中での質量変化を系統的に測定する。E16実験としてJ-PARC PACよりscientific approvalを受けている。この実験では、前実験であるKEK-PS E325実験の10倍の強度である $10^{10}/\text{sec}$ の 30GeV 一次陽子ビームを用いて、標的において $10^7/\text{sec}$ の反応率でデータ取得を行う。検出器アクセプタンスの向上と入射エネルギーの増大により、前実験の100倍、およそ20万個の ϕ 中間子データを蓄積し、前実験で測定された質量変化(質量減少、崩壊幅増大)の標的核依存性や運動量依存性を詳細かつ系統的に測定して、この変化がカイラル対称性によるものか否かを確定する。理論研究との連携では、分散強度関数のように運動学的に決まった領域での理論予想を進め、データとの比較の精度を上げることを図る。

以下、スペクトロメータとビームラインの建設準備状況について述べる。

[1] スペクトロメータ

大型双極電磁石の中央に原子核標的を置き、トラッカーおよび二段の電子同定検出器(前段ハドロン・ブラインド・チェレンコフ検出器、後段電磁カロリメータ)で標的の周りを取り囲んで、中間子崩壊からの電子陽電子対を検出する。概念図を図1に示した。

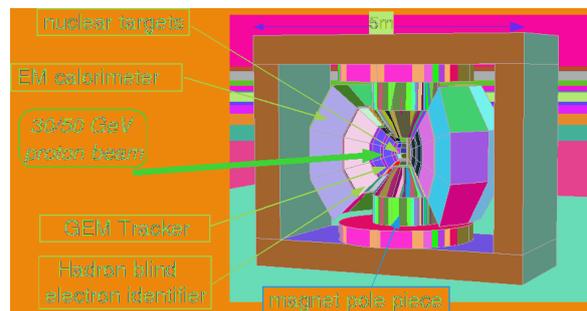


図1：E16スペクトロメータ概念図

(1) GEM Tracker

トラッカーには低物質量であることと高計数率($5\text{kHz}/\text{mm}^2$)に耐えることが要求され、COMPASS実験で使用実績のあるGEM Trackerを開発している。次節で述べるハドロン・ブラインド・チェレンコフ検出器(HBD)とともにGEM (Gas electron multiplier)による電子増幅を使って粒子を測定する。GEMはCERNで開発され販売されているが、世界中からの需要にはこたえられず、国産化がもとめられている。われわれの検出器は完成時点で世界最大級のGEM面積を必要とする(標準的な100 mm角のGEM換算で1800枚)ため、CERNからの供給は追い付かないと考えられた。

本研究では 国内企業と協力して有効面積300mm角の大型カプトン製GEMの国産化に成功し、国内での安価な入手を可能にした。これはCERN製GEMと同じ材質であり、同様に wet etching方式

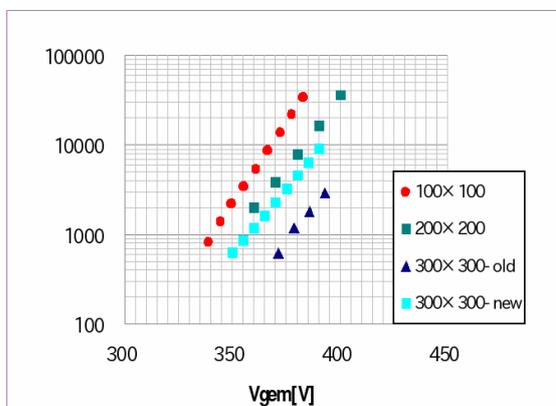


図2：100 mm角, 200 mm角, 300 mm角GEMの3枚スタック時の増幅度

によって直径 $70\mu\text{m}$ の微細な穴をあけて製作する。CERNのetching方式に関する基本特許をもつ国内企業との協力によりこの製作が可能になった。まず標準的な有効面積100mm角のGEMの製作に成功した後、200 mm角, 300 mm角を製作したが、大きくするにつれ穴径コントロールが困難になって増幅度が劣化した。試作をくりかえした末、最終的には露光マスクの工夫による表裏のetching位置合わせ精度の向上が決め手となって十分小さな貫通穴を開けることを可能とし、必要な増幅度を得ることに成功した(図2)。目標増幅度は3枚スタック時に10000倍である。

一方 Tracker読み出しのため、携帯電話やノートパソコンに使用されているフレキシブル回路基板技術を用いて 25 μ m厚の低物質質量二次元読出両面ストリップ基板を製作した(図3)。これも上述企業との協力による。同基板と上述GEMの組合せで 有効面積100 mm角、200 mm角、300 mm角のGEM Chamberを製作し、ビームテストをおこない、垂直入射粒子について目標である位置分解能100 μ mを達成した。使用したガスは Ar+CO₂(70:30)である。

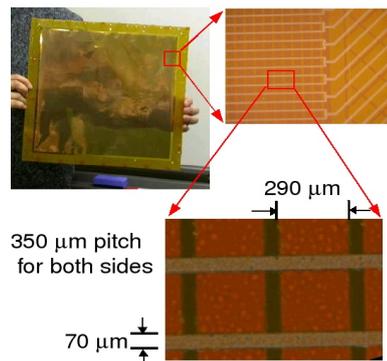


図3：300 mm角の二次元読出両面基板

初期のテストによって斜め入射粒子の飛跡については電荷情報のみを用いては位置分解能が大きく劣化することが判明し、ストリップピッチを700 μ mから350 μ mに変更し、かつ電荷情報とともに、信号となる電子が読出電極に到達する時間の情報を用いることで 入射角度0度、15度、30度の飛跡に対してそれぞれ80 μ m、110 μ m、140 μ mの分解能を達成した。シミュレーションの結果、この位置分解能で、目標とする質量分解能5 MeV(ϕ 中間子について)を達成することができる。

また、両面ストリップによる二次元読み出しであるから、読出基板表面をx方向とした場合、裏面ストリップに誘起される電荷情報を用いてy方向の位置情報を得る。こちらの要求分解能は表面100 μ mの10倍程度であるため、ストリップピッチは 1400 μ m程度で十分であることが測定結果の解析により確認された。この結果にもとづき、実機用読出基板のストリップピッチを決定した。

このTrackerの読出回路については Belle II CDCの読出回路の利用を検討している。今後共同開発を進めていきたい。

(2) ハドロン・ブラインド・チェレンコフ検出器(HBD)

HBDはもともとシャルパッカーらによって提案されたチェレンコフ光利用電子トラッカーであるが、RHIC/PHENIX 実験ではチェレンコフ紫外光読み出しにGEMを用い、電子同定検出器として実装された。われわれのグループではこれを建設したワイツマン研究所(イスラエル)およびストーニーブルック大(アメリカ)に技術を学びつつ開発を開始した。われわれの実験では電子同定・トリガーのための検出器であるが、大アクセプタンスを覆い、磁場中で動作し、かつトリガーセグメントを十分細かくするために必要となった。

この検出器はチェレンコフ光放射体であるCF₄ガスを同時に増幅ガスに用いることで、紫外光透過窓を省略できる。ただし同じ増幅度を得るための動作電圧が他のガスよりも高いため、安定動作が困難な傾向にある。われわれの試作機でも、上述wet etching GEMでの動作は不安定であった。一方日本では 液晶ポリマー(LCP)を基材とした100 μ m厚の 30mm角および100mm角の高増幅度GEMが 東大CNSおよび理研宇宙放射線研グループと共同で(上とは別の)国内企業によって開発されてきていた。ただしlaser etching法によるため高価であり、また大型化に難航していた。今回われわれのグループでは、同企業との協力により、比較的安定な300mm角の100 μ m厚LCP-GEMを開発した。CF₄中で1枚の増幅度が500倍から800倍を達成している。HBD(有効面積600mm角)は、これを4枚正方形にならべ、

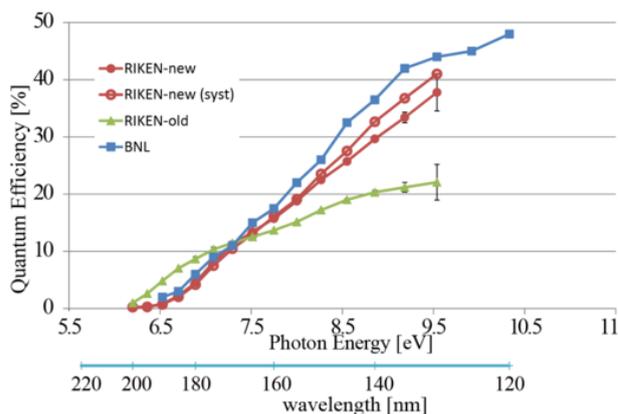


図4：CsI光電面の量子効率。緑が古いもの、赤が改善したもの。青は参考(PEHNIX実験)。

2枚スタックで増幅度8000程度で動作させる予定である。一方HBDの試作機のビームテストは 初期から主として100mm角のLCP-GEMを用いて行っている。CsI光電面は浜松ホトニクスに依頼してLCP-GEMの表面に蒸着していたが、量子効率がPHENIX実験のものに比べ低かった。H22年度には理研でも蒸着を行い、浜松ホトニクスと協力して改善に成功(図4)、ビームテストにおいて電子からのチェレンコフ光として10光電子を得た(図5)。さらなる向上が可能であると考えている。

(3) スペクトロメータ磁石および電磁カロリメータ
 スペクトロメータ磁石の改造計画を進めている。KEK-PS E325実験で使われたFM電磁石をスペクトロメータ磁石として使用する予定で、同磁石はすでにKEK-PSからJ-PARCに運搬されている。GEM面積の制限からトラックを小型化するため、ポールピースを追加して中心付近の磁場をあげる必要がある。H23(2011)年度にはポールピースなど改造のための部品を調達し、H24年度に組み立てる。(図6)

電磁カロリメータはTOPAZ実験で用いられ、KEKに保管されている鉛ガラス検出器を転用する。H23年度からフレーム設計等を開始している。

[2] ビームライン

E16実験に使用するJ-PARCハドロン実験施設の高運動量ビームラインはKEKが建設する。H24(2012)年の予算化にむけて概算要求が行われる。そのため本研究計画当初にH24年度に予定していたファーストビームはH25年度以降になる。ビームラインの設計は既に進めている(図7)。

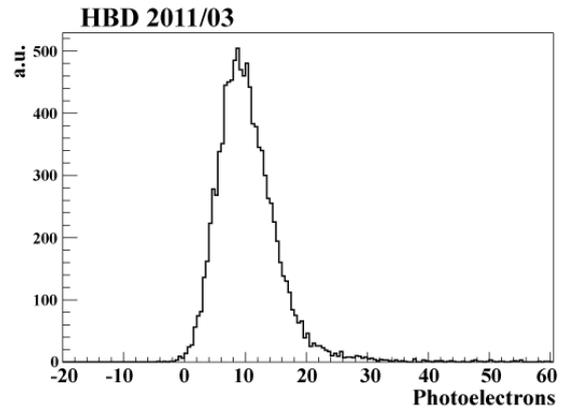


図5：HBDで測定された、電子飛跡からの光電子数。

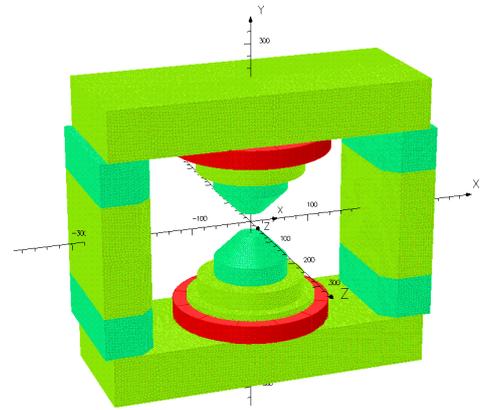


図6：スペクトロメータ磁石改造計画。濃い緑の部分が追加部品

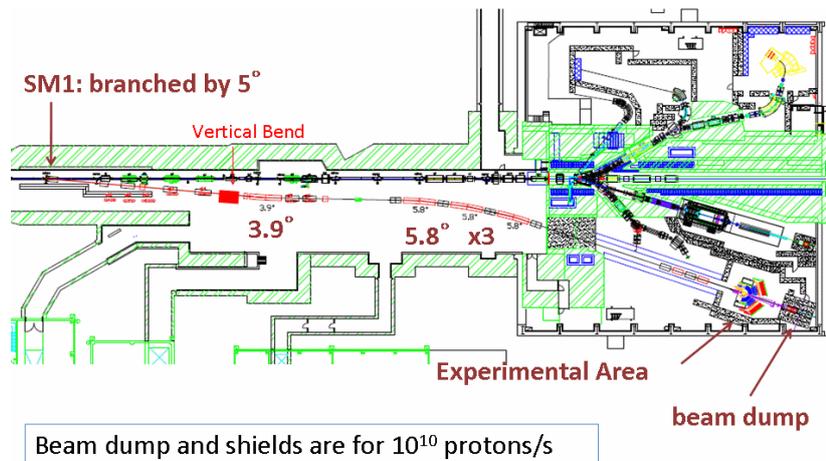


図7：J-PARCハドロン実験施設の既存部分と新設される高運動量ビームライン。毎秒 10^{10} 個の陽子を取り出せるよう設計している。

計画研究 D01 「高輝度実験に向けた先端的測定器の開発」

本計画研究では、三実験プロジェクト（Bファクトリー実験、LEPS実験、KEK-E325/J-PARC-E16実験）に関連して、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いる。平成21、22年度においては、特に、高輝度Bファクトリー実験で用いる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を進め、今後の研究期間の後半にはいよいよ実機の製作を始める段階に達した。また、高輝度実験に向けた読み出し技術の開発として、測定器の前段回路と後段回路（COPPERシステム）の間の標準データリンクの開発を進めた。これらの研究は、公募研究とも連携して進められている。

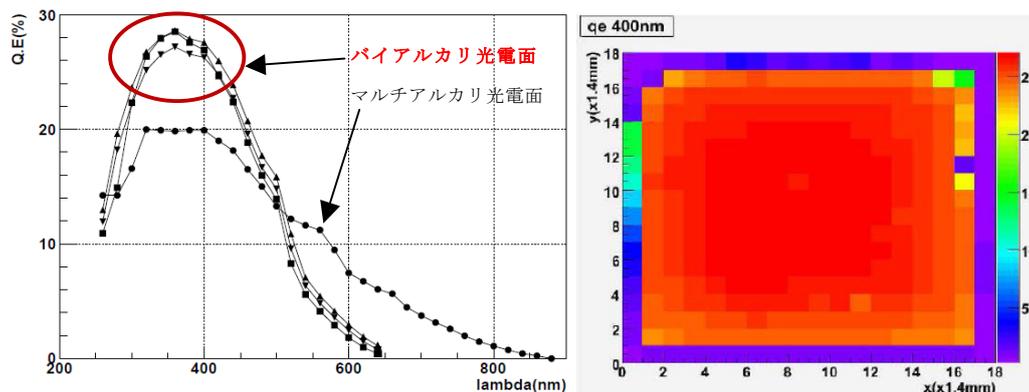
[1]TOPカウンター開発研究

領域発足後、Belle-II実験で使用する新型の粒子識別装置TOPカウンターの開発、建設にむけた研究として、主に以下の2つの課題に取り組んできた。

光検出器MCP-PMTの光電面の量子効率改良、および寿命評価

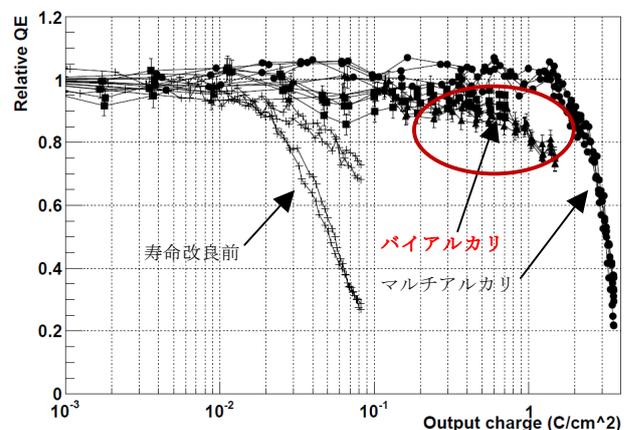
TOPカウンターに使用する光検出器として、微弱なチェレンコフ光を高い時間分解能で検出できる、角型MCP-PMTを浜松ホトニクスと共同開発してきた。微弱な光を効率よく検出するため、光電面の量子効率の改良を進めてきた。角型MCP-PMTは、実績のあったマルチアルカリ光電面をベースに開発を進めてきたが、通常の光電子増倍管で実用化に成功したスーパーバイアルカリ光電面を採用したMCP-PMTの開発・性能評価を行った。

MCP-PMTへの技術導入は始めてであったが、真空製造装置の改良などにより、下図のように400nmの波長で28%程度の量子効率を得られるMCP-PMTが製造可能となった。また、量子効率の面一様性も均一なものもできた。この光電面を採用することによって、マルチアルカリ光電面の場合と比較して、チェレンコフ光の検出数を20%向上させることが可能となっている。



図：量子効率の波長依存性(左)。■、▲、▼はバイアルカリ光電面、●はマルチアルカリ光電面MCP-PMT試作品による結果。右はバイアルカリ光電面試作品の量子効率の面一様性。

その後、光電面の寿命測定を行った。Belle-II実験環境下では、ビームバックグラウンドガンマ線と石英輻射体が相互作用することで電子・陽電子を生成、チェレンコフ光を発光するために、MCP-PMTに多くのバックグラウンド信号を生み出し、長期的な劣化を起こしうる。開発したバイアルカリ光電面MCP-PMTについて寿命測定を行い、図に示すとおり、 1 C/cm^2 以上の出力電荷までの寿命があることを確認した。これは、Belle-II実験で7年以上の寿命があることに対応している。今後、生産を行いながらMCPの改良を進め、さらなる寿命向上



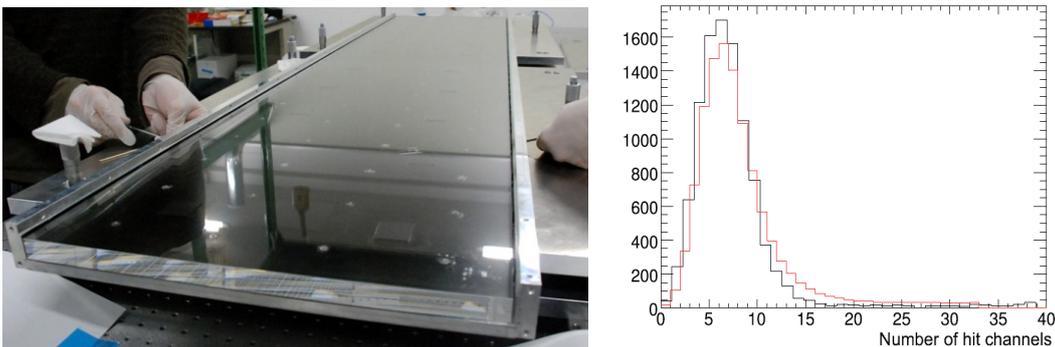
図：量子効率の出力電荷依存性。十字が寿命改良前の測定結果。●は寿命改良後のマルチアルカリ光電面の結果、■、▲は寿命改良後のバイアルカリ光電面の測定結果

を目指す。

TOPカウンター試作機の開発・性能評価

TOPカウンターの基本動作原理検証のため、プロトタイプ検出器(下図(左))を製作しビームテストなどで性能評価を行った。本研究では、実機大に近い40cm幅の石英輻射体と角型MCP-PMTを用いたプロトタイプを製作し、それを用い、波長分散効果の抑制について動作を検証するためのビームテストをヨーロッパCERN研究所において行った。

テストで得られた検出光子数を下図(右)に示す。シミュレーションと比較して予想通りの光子数が得られていることが分かった。また、チェレンコフ光の代表的な検出時間分解能は95psと得られ、シミュレーションの予想分解能103psと同程度であった。光の伝播距離は約2.9mであるが、波長分解無しで伝播させた場合の時間分解能は過去の結果より約170psである。このことから、波長分解をさせることで時間分解能が大きく向上することを検証できた。



図：(左)製作したプロトタイプ検出器(右)ビームテストで得られた検出光子数(赤がデータ、黒がシミュレーション)

[2] エアロジェルRICH検出器の開発

本研究においては、Belle II 実験のエンドジャップ部にインストール予定のエアロジェルRICH検出器のために、チェレンコフ輻射体として高透明度シリカエアロジェルの開発、及び光検出器として、浜松ホトニクスと共同で開発しているマルチアノード型ハイブリッドアバランシェ光検出器(HAPD)の開発に取り組んでいる。

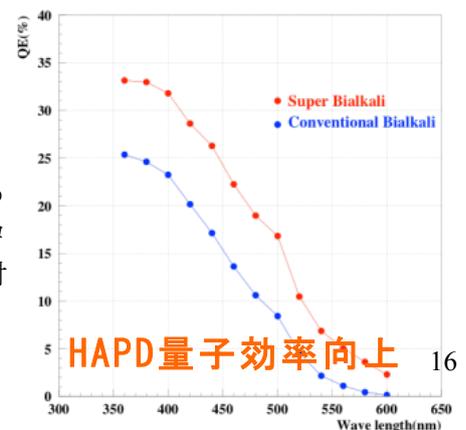
高透明度シリカエアロジェルの開発

我々の興味がある屈折率 $n=1.05\sim 1.06$ 領域での透明度向上のため、ピンホール乾燥法という新製法を用いて作成した。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んでおり、今回初めて $180\times 180\times 20\text{mm}^3$ (今までは $110\times 110\times 20\text{mm}^3$)という大型エアロジェルの製造(右図)を行った。この開発は、公募研究「広範な屈折率領域における高透明度シリカエアロゲルの開発」(代表者：千葉大学 河合秀幸)との連携で大きく進んだ。



HAPDの開発

磁場中でも高い単光子検出効率を持つHAPDの性能向上として、“Super bi-alkali”フォトカソードをHAPDの光電面に適用し、量子効率を約20%から30%以上にまで改善した(右図)。また、中性子放射線耐性試験として、原子炉からの中性子を照射して、性能劣化について調べた。10年間に予想される照射量に対してS/N良く単光子を検出するため、APDのシリコン層の構造を改良し、漏れ電流軽減を達成した。ガンマ線に対する放射線損傷についての改善は現在進行中で、100kradまで

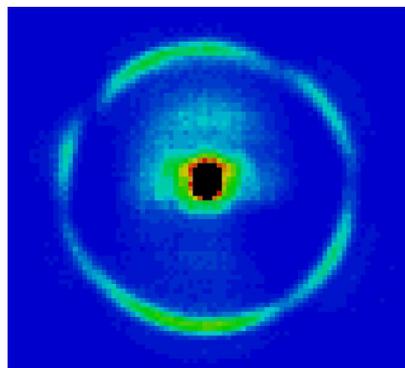


HAPD量子効率向上

の照射について対策を考慮中である。

RICH プロトタイプの性能試験

上記のシリカエアロジェルとHAPDを用いてRICHプロトタイプを作成し、KEKB加速器に設置された富士テストビームラインで総合的な性能評価を実施した。この時に観測したチェレンコフリングイメージを右下に示す。解析結果より、光電子数13.5個で単光子分解能14.2mradを得た。これは、運動量4GeV/cにおいて検出器が5 σ 以上の π /K中間子識別能力を有することを示す。



図：エアロジェルRICHビームテストのセットアップ（左）および得られたチェレンコフ・リングイメージ（右図）。

[3] 高輝度実験に向けた測定器読み出し回路の開発

次世代の高輝度加速器実験での高いヒットレートに対応するために、検出単位を細密化し読み出し回路で信号をデジタル変換し多重化して送出する必要がある。この実現のために読み出し回路からCOPPERに光ファイバーで高速にデータを転送するシステムの開発を行っている。初年度は転送システムのプロトタイプの開発をおこなった。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の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データリンクを通して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。このテストの様子を下図に示す。今年度はトリガータイミングシステムとの協調動作やslow control機構のテストを行った後、受信カードを10セット程度テストバッチ生産し、Belle IIで使用する種々の検出器の読み出し回路との整合性を確認する予定である。なお、この研究は、公募研究「離れた測定器読みだし回路とを結ぶ標準データ転送リンクの開発」（代表者：KEK 伊藤領介）との連携で進んでいる。

図：Belle II実験の中央飛跡検出器のテストベンチを用いた、読み出しエレクトロニクスの検証の様子。



計画研究E01「多彩なフレーバーがもたらすクォークハドロン物質の新形態に関する理論研究」

計画研究E01は本領域研究の理論的考察を担う。QCDに基づいて、散乱・生成崩壊等の動的過程を含めた分光学、少数系からマクロスケールにわたるハドロン物質の性質等、多様な現象の記述とともに、その背後にある非摂動機構の解明を目指している。数百MeVの Λ_{QCD} スケールを境にその動力学的性質は変わり、エネルギーやフレーバー領域に対応した考察が要求される。まずはそれぞれの領域で重要となる非摂動効果を考慮し、本領域の計画研究班で得られる最新のデータを含めて、現象との比較を進めていくことが、本研究の第一の目的である。

ハドロン分光では共鳴領域で新発見が相次いでいる。そこではマルチクォーク成分の混合によって、エキゾチックな量子数とともにクラスターのように空間的に局在した構造が形成されると考えられる。マルチクォーク生成は軽いクォークでおこり、カイラル対称性とその動力学が重要となる一方、重いクォークを含んだところでは重いクォーク対称性が良くなる。

こうした考察もとに、まずX(3872)の構造とチャームバリオンの理論研究が進められた(1、2)。これらの成果に基づいて、最近Belleで発見された2つのZb粒子との関連を現在調べている。反応との関連で、重イオン衝突反応の生成量から異なる構造を調べる方法が提案された(3)。マルチクォーク成分はクォークの破砕関数によっても調べられる。Belleのデータを用いた研究が進行中である。

軽いクォークの準粒子的な性質は、質量生成機構と関連し真空の性質に依存している。関連研究として、まずカラーSU(2)QCDを用いて有限密度における相構造とハドロンの性質の変化について議論された(4)。また、プラズマ中におけるクォーク伝導率の研究がなされた(5)。後者ではホログラフィックQCDを採用する有効性が示された。第一原理に基づいた方法として格子QCDを用いた研究では、非摂動グルーオンの伝播関数が計算され非摂動領域における特異な性質が示された(6)。今後は分光学への応用を図る。

以上の研究は、5名の(代表を含む)分担者と本領域科研費で雇用する5名の研究員(うち2名が外国人)を中心に行なっている。実施にあたっては、セミナーミーティング「ハドロンスクエア」、領域研究会、国際会議、個別のグループミーティングなどを利用して、理論研究者はもとより実験研究者とも連絡・連携を密にし、最新の情報を共有している。また得られた成果は若手サマースクール等でも解説し、若手育成にも努めている。今後はより広く人的交流を図りながら研究を推進する為、他の研究領域、例えば、計算科学領域との連携も模索していく。

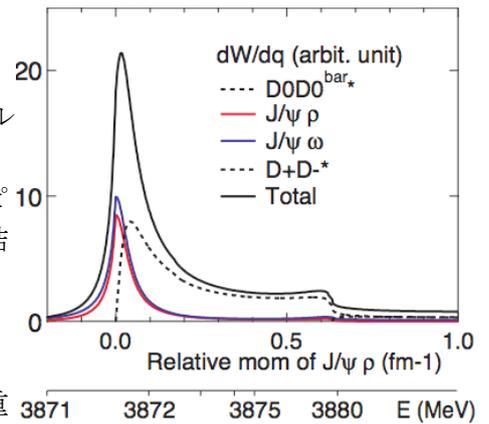
最後に公募研究との関連について述べる。理論関係では7件の研究が採択されている。そのうち3件が重いクォークを含むハドロン分光を主にしたもの、2件がQCD有効理論に基づいた真空とハドロン構造の研究、2件が格子QCDに基づいた研究となっている。ハドロン分光の研究では、重いクォークハドロンのエキゾチックな構造、ハドロン分子の構造、それらを作り上げる相互作用の研究が実施され、それぞれ成果が報告されている。特に重いクォークを含む状態と、分子構造の研究は本領域研究の主題でもあり、それぞれの研究代表者とは連絡・連携を密にとりながらお互いの研究を進めている。有効理論に基づいた研究はハドロン相互作用の基礎と、質量生成機構と関連している。また、格子QCDの研究は本研究で目指す現象の理解全体の理解を進める上でQCDに立脚したガイドラインを与える上で、領域研究の重要な一翼を担っている。以上の成果は領域研究会で報告され、情報の共有に努めている。

以下5名の研究分担者(代表を含む)によって実施された研究の概略を示す。

(1) マルチクォーク成分混合によるX(3872)の理解

X(3872)を (cqbar)(qbar)と(ccbar)とが結合した状態とすると isospin 0と1が強く混合した状態となる事を示した。また(ccbar)芯と結合した2中間子とすると、質量スペクトルが実験と無矛盾となること、更に ρ, ω の幅を考慮して(ccbar)からの崩壊強度関数を計算すると、3872MeV近傍にピーク質量を持ち、 2π と 3π への崩壊比がほぼ1という実験結果を説明し得る事を示した(右図)。

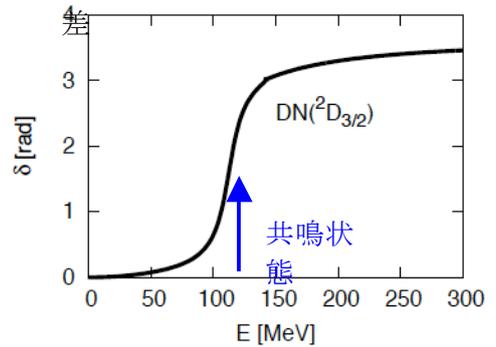
X(3872)の崩壊強度関



(2) 重いクォークを含んだエキゾチック粒子

カイラル対称性の自発的破れによるパイオン交換力が、重いクォークを含む、特に反D中間子と核子の系で、緩く束縛した状態と共鳴状態が存在することを予言した(下の表と図)。現在は類似の系として、Belleで発見されたボトムニウム粒子との関連を調べている。このような複合系はこれまでない新しい存在形態であり、その確立と理解が急務である。

反D中間子と核子散乱の位相差

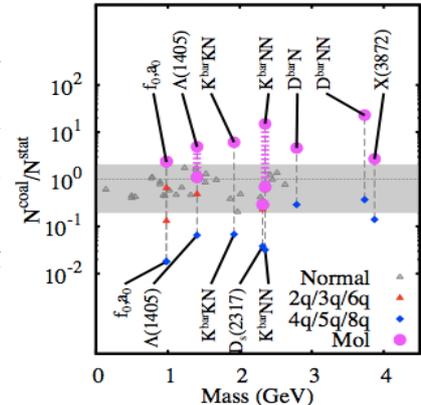


束縛状態の性質	$\bar{D}N(\pi)$	$\bar{D}N(\pi\rho\omega)$	$BN(\pi)$	$BN(\pi\rho\omega)$
E_B [MeV]	1.60	2.14	19.50	23.04
$\langle r^2 \rangle^{1/2}$ [fm]	3.5	3.2	1.3	1.2

(3) 重イオン衝突におけるハドロン生成

重イオン衝突の多重発生反応で、マルチクォークあるいは分子状態を持つハドロンの生成率をquark coalescenceモデルと統計モデルを用いて評価した。その結果ハドロン分子的な構造を持つ状態の生成率がマルチクォーク状態より大きいことがわかった(右の図上方、ピンクの点)。今後はBelleにおけるe+e-実験でもこの考え方が適用できるかどうかの検討を進める。

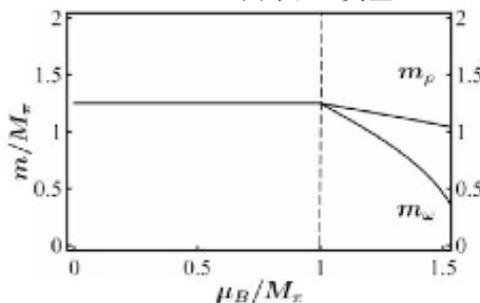
Coal. / Stat. ratio at RHIC



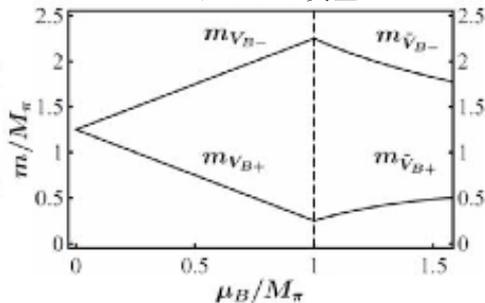
(4) 有限密度物質中におけるハドロンの性質変化

カラーSU(2)QCDによって有限密度中でベクトル中間子とベクトルqqバリオンと反バリオンの質量を計算した(下の図)。有限密度における軽いフレーバーからなるハドロンの性質は質量生成機構と密接に関係している。今後はカラーSU(3)への拡張を図るとともにJPARCで予定される実験との関連を調べる。

ベクトル中間子の質量

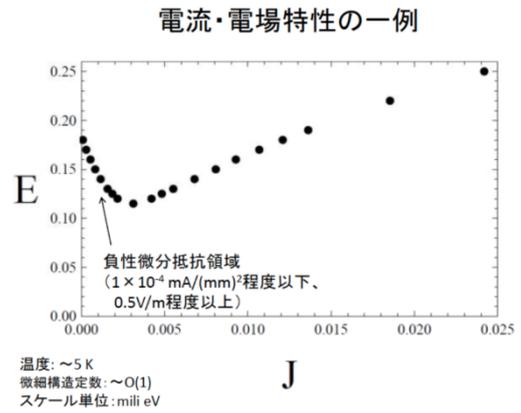


バリオンの質量



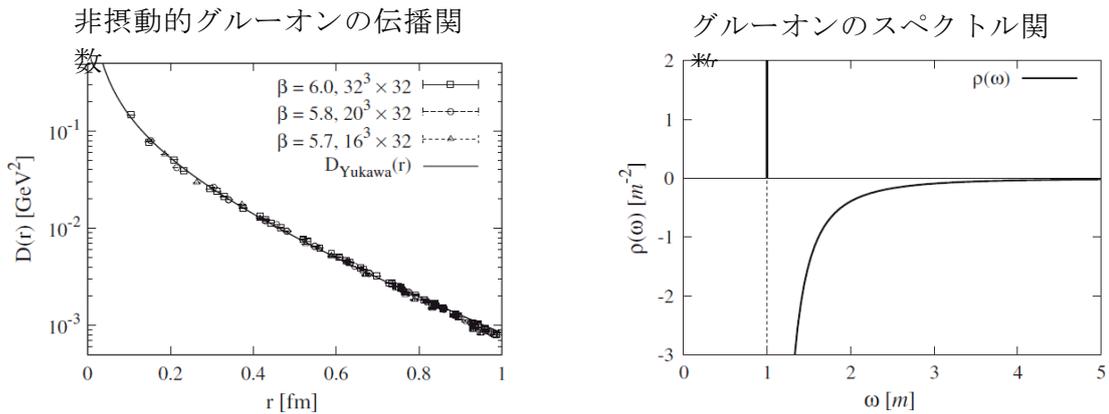
(5) プラズマ中のクォークの非線形伝導度

強い相互作用をする物質中では、線形応答を超えた非平衡過程の記述が要求される。本研究では AdS/CFT 対応の方法によって、クォーク・グルーオン系のクォーク電荷の非線形伝導を調べた。その結果、物性系の強相関絶縁体にもみられる負性微分抵抗を、3+1次元微視的理論に立脚して初めて理論的に説明した (右図)。非平衡過程の記述は近代物理学が抱える未解決問題の一つであり、本研究はこの未解決問題に新たな手法を提供するものである。



(6) 格子QCDによるグルーオンの非摂動的性質

強い相互作用の非摂動的性質のほとんどは、グルーオン動力学に由来する。本研究では格子QCDにより非摂動的グルーオンの伝播関数を解析し、グルーオン伝播関数 (ランダウ・ゲージ) が、ハドロン物理で重要になる領域 (0.1~1fm) で、4次元の湯川関数 $\exp(-mr)/r$ (r は4次元ユークリッド距離) で表されることを見出した (下図左)。これを基に“グルーオンのスペクトル関数”の解析的な関数形を世界で初めて導出し、それが“ ∞ の留数を持つ正の極”と“負の値をとる領域”を持つ極めて特異なものである事を指摘した (下図右)。今後は非摂動グルーオンが関与するハイブリッド粒子への分光学的応用等を図るとともに、領域理論研究の基盤を築く。



計画研究 X00: 「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」 (総括班)

総括班は、「新ハドロン」領域内の研究の進捗状況を正確に把握し、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が有機的に進められるよう、また研究成果をタイムリーに広く発信するため、様々な活動を行っている。

1) 領域研究会の開催

2009年11月27-28日は、領域発足のキックオフ会議を開催し、領域の全体像や各計画研究の内容の紹介を行うとともに今後の活動の方針策定を行った。

さらに、2011年2月28日から3月1日にかけては、各計画及び公募研究の間の情報交換、領域外の人々との研究交流による新たな研究の芽の発掘を目的とした研究会

(参加者数:92名)を理研仁科センターで開催した。

また、2011年6月23-24日には、新学術領域「素核宇宙融合」と合同で、それぞれの分野の研究者(参加者数:54名)が神戸の計算科学研究機構(RIKEN AICS)に会し、ハドロンの実態にせまる現状を報告しながら、今後の進展と共同研究の手がかりを議論することを目的とした研究会(新学術領域「素核宇宙融合」x「新ハドロン」クロスオーバー研究会—多様な手法でせまるハドロン物理への挑戦—)を開催した。

2) 領域セミナーシリーズ「ハドロン・スクエア」の開催

「新ハドロン」領域での研究に関連する話題を全国の大学・機関でセミナーの形で提供する「ハドロン・スクエア」を随時開催している。セミナー内容は、Bファクトリーでの最新の発見の紹介から、ホログラフィックQCDの解説に及び、幅広い聴衆から好評を得ている。

3) Belle 解析スクールの開催

Bファクトリーの大量データを使ったデータ解析の手法を若手が継承し、より活発な物理解析を進めることを目的として、Belle解析スクールをこれまでに3回実施している。解析手法について、チュートリアルを使ったより実践的な解説を行い、毎回40-60名の参加者があった。

4) サマースクールの開催

2010年8月18-20日に、大学院生等の若手を対象にしたサマースクールを開催した。3つの実践コース(クォーク模型によるマルチクォークハドロンの計算、高エネルギーハドロン物理学入門、ホログラフィック・ゲージ理論入門)を用意し、36名の若手が各実践コースに分かれ、それぞれのテーマを学ぶとともに、4つのセミナー講演を交えて基本事項から最新の進展内容を議論した。第2回サマースクールを2011年8月9-12日に計画している。

5) 検出器ワークショップの開催

実験研究で共通に必要な技術開発に関する交流・連携を目的として、2010年6月13日には、「TOPカウンターのLEPS実験への応用に関するミニ研究会」、2010年12月17日に「次世代光センサーに関するワークショップ」を開催した(共催)。

以上のようなセミナーや研究会の企画・開催に加え、総括班は、メーリングリストや領域WEBページの整備や運用を行い、「新ハドロン」領域内での円滑な研究の推進と領域外への情報発信という役割を果たしている。



理研仁科センターにて 領域研究会参加者
2011年2月28日



サマースクールの様子

研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等)

(1) 主な論文等一覧について

研究領域全体の発表論文数：59編（うち査読あり37編）

計画研究A01：

“Study of the $K^+ \pi^+ \pi^-$ Final State in $B^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^+ \pi^-$ and $B^+ \rightarrow \psi\text{-prime} K^+ \pi^+ \pi^-$ ”, *H.Guler, , Y. Sakai(84番目), K.Miyabayashi (61番目), Y.Watanabe (103番目), K.Trabelsi(96番目), S.Uehara(97番目), 他108名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 83, 032005 (2011) 査読あり

“Measurement of $\eta \eta$ production in two-photon collisions”, *S. Uehara (1番目), Y. Watanabe (2番目), K. Miyabayashi (70番目), E. Nakano (76番目), Y. Sakai (95番目) 他全127名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 82, 114031 (2010) 査読あり

“Search for charmonium and charmonium-like states in $\Upsilon(1S)$ radiative decays”, *C.P.Shen, K. Miyabayashi (58番目), E. Nakano (63番目), Y. Sakai (78番目) 他全109名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 82, 051504 (2010) 査読あり

“Measurement of the $e^+ e^- \rightarrow D_s(*) + D_s(*)$ -cross sections near threshold using initial-state radiation”, *G.Pakhlova, K. Miyabayashi (78番目), E. Nakano (85番目), Y. Sakai (109番目), Y. Watanabe (142番目) 他全153名 (The Belle collaboration), Phys Rev. D 83, 011101 (2010) 査読あり

“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(102番目), K.Miyabayashi (67番目), E.Nakano(72番目), Y.Watanabe (113番目), K.Trabelsi(102番目), S.Uehara(103番目), 他121名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 112004 (2010) 査読あり

“Observation of a charmonium-like enhancement in the $\gamma \gamma \rightarrow \omega J/\psi$ process”, *S.Uehara, Y. Sakai(91番目), K.Miyabayashi (69番目), E.Nakano(83番目), Y.Watanabe (101番目), K.Trabelsi(91番目), 他109名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 092001 (2010) 査読あり

“Study of the $B \rightarrow X(3872) (\rightarrow D^* \bar{D}^0) K$ decay”, *T.Aushev, Y. Sakai(87番目), K.Miyabayashi (58番目), E.Nakano(82番目), Y.Watanabe (122番目), K.Trabelsi(112番目), S.Uehara(113番目), 他127名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 81, 031103 (2010) 査読あり

“Measurement of the $e^+ e^- \rightarrow D^0 D^{*-} \pi^+$ cross section using initial-state radiation”, *G.Pakhlova, Y. Sakai(102番目), K.Miyabayashi (81番目), E.Nakano(87番目), Y.Watanabe (135番目), K.Trabelsi(121番目), S.Uehara(122番目), 他142名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 80, 091101 (2009) 査読あり

“Observation of an enhancement in $e^+ e^-$ to $Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$, $Upsilon(2S)\pi^+\pi^-$, and $Upsilon(3S)\pi^+\pi^-$ production around $\sqrt{s}=10.89$ GeV at Belle”, *K.-F.Chen, , Y. Sakai(75番目), K.Miyabayashi (66番目), E.Nakano(71番目), Y.Watanabe (120番目), K.Trabelsi(105番目), S.Uehara(106番目), 他119名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 82, 091106 (2009) 査読あり

“High-statistics study of $\eta \pi^0$ production in two-photon collisions”, *S.Uehara, Y.Watanabe, Y. Sakai(81番目), K.Miyabayashi (61番目), E.Nakano(67番目), 他100名 (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 80, 032001 (2009) 査読あり

計画研究B01 :

"Polarized HD Target for Future LEPS Experiment at Spring-8 in Japan", *H. Kohri, T. Hotta (4番目), M. Yosoi (12番目), 他全17名, Int. J. Mod. Phys. E 19, 903-914 (2010) 査読あり

"Near-threshold Lambda(1520) production by the gamma p \rightarrow K Λ (1520) reaction at forward K Λ angles", *H. Kohri, A. Hosaka (14番目), T. Hotta (15番目), K. Imai (16番目), T. Nakano (32番目), T. Yorita (56番目), M. Yosoi (58番目) 他全59名, Phys. Rev. Lett. 104, 172001/1-4 (2010) 査読あり

"Measurement of spin-density matrix elements for phi Λ -meson photoproduction from protons and deuterons near threshold", *W.C. Chang, T. Hotta (14番目), K. Imai (15番目), T. Nakano (32番目), T. Yorita (53番目), M. Yosoi (55番目) 他全56名, Phys. Rev. C 82, 015205/1-11 (2010) 査読あり

"Experimental Program at J-PARC", *K. Tanida, Nucl. Phys. A 835, 75-80 (2010) 査読なし

"Development of portable NMR polarimeter system for polarized HD target", *T. Ohta, M. Yosoi (16番目) 他全16名, Nucl. Instr. and Meth. A 633, 46-51 (2011) 査読あり

"Hadron Physics with Meson Photoproduction at LEPS/Spring-8", *T. Hotta, Int. J. Mod. Phys. A 26, 456-460 (2011) 査読なし

"Backward-angle eta photoproduction from protons at E γ =1.6-2.4 GeV" *M. Sumihama, T. Hotta (13番目), N. Muramatsu (27番目), T. Nakano (28番目), M. Yosoi (50番目) 他全51名, Phys. Rev. C80, 052201 (2009) 査読あり

"Near-threshold photoproduction of $\Lambda(1520)$ from protons and deuterons" *N. Muramatsu, T. Hotta (16番目), T. Nakano (32番目), M. Yosoi (54番目) 他全55名, Phys. Rev. Lett. 103, 012001 (2009) 査読あり

"Measurement of the incoherent gamma d \rightarrow phi p n photoproduction near threshold" *W.C. Chang, T. Nakano (3番目), T. Hotta (16番目), N. Muramatsu (31番目), M. Yosoi (54番目) 他全55名, Phys. Lett. B684, 6 (2010) 査読あり

"Hadron physics at J-PARC: Current status and future prospects", *M. Naruki, Int. J. Mod. Phys. A 26, 533-538 (2011) 査読なし

"Search for pentaquark Theta $^+$ " *M. Naruki, Lecture Notes in Physics 781, 139 (2009) 査読あり

計画研究C01 :

"A development of HBD for the J-PARC E16 experiment", *K. Aoki, H. En'yo, T. Gunji, H. Hamagaki, J. Kanaya, Y. Komatsu, S. Masumoto, K. Ozawa, T. Sato, M. Sekimoto, T. Tsuji, K. Utsunomiya, Y. Watanabe and S. Yokkaichi, Nucl. Instr. and Meth. A 628, 300-303 (2011) 査読あり

"In-medium mass modification of vector mesons" *Satoshi Yokkaichi, Lecture notes in physics 781, 161 (2009) 査読あり

計画研究D01 :

"Lifetime-Extended MCP-PMT", T. Jinno, *T. Mori, K. Inami (5番目) 他全8名, Nucl. Instr. and Meth. A 629, 111-117 (2011) 査読あり

"Study of 144-channel hybrid avalanche photo-detector for Belle II RICH counter", S. Shiizuka, I. Adachi (2番目), K. Hara (4番目), *T. Iijima (5番目) 他全19名, Nucl. Instr. and Meth. A 628, 315-318 (2011) 査読なし

"Study of 144-channel multi-anode hybrid avalanche photo-detector for the Belle RICH counter", *I. Adachi (1番目), K. Hara (3番目), T. Iijima (4番目) 他全20名, Nucl. Instr. and Meth. A 623, 285-287 (2010) 査読なし

"Recent topics of particle identification and photodetection", *Toru Iijima, Nucl. Instr. and Meth. A 623, 48-56 (2010) 査読なし

"R&D of particle identification devices with high-precision timing", *Kenji Inami, Nucl. Instr. and Meth. A 623, 273-275 (2010) 査読なし

"Measurement of Cherenkov photons by SiPMs with light guides", *S. Korpar, K. Hara(4番目), T. Iijima (5番目) 他全10名, Nucl. Instr. and Meth. A610, pp. 427-430, (2009) 査読あり

"Study of an HAPD with 144 channels for the Aerogel RICH of the Belle upgrade", *S. Nishida, I. Adachi(2番目), K. Hara(4番目), T. Iijima(5番目) 他全20名, Nucl. Instr. and Meth. A610, pp. 65-67, (2009) 査読あり

計画研究E01 :

"Light Scalar Meson sigma(600) in QCD Sum Rule with Continuum", *Hua-Xing Chen, Atsushi Hosaka, Hiroshi Toki and Shi-Lin ZHU, Phys. Rev. D 81, 114034 (2010) 査読あり

"Baryon fields with U(L)(3) X U(R)(3) chiral symmetry II: Axial currents of nucleons and hyperons", *Hua-Xing Chen, V. Dmitrasinovic and Atsushi Hosaka, Phys. Rev. D 83, 054002 (2010) 査読あり

"Charged K* Photoproduction in a Regge model", *Sho Ozaki, Hideko Nagahiro and Atsushi Hosaka, Phys. Rev. C 81, 035206 (2010) 査読あり

"A Lagrangian for the Chiral (1/2, 0) + (0, 1/2) Quartet Nucleon Resonances", *V. Dmitrasinovic, Atsushi Hosaka and Keitaro Nagata, Int. J. Mod. Phys. E 19, 91-112 (2010) 査読あり

"Holographic QCD Integrated back to Hidden Local Symmetry", *Masayasu Harada, S. Matuzaki and K. Yamawaki, Phys. Rev. D 82, 076010:1-27 (2010) 査読あり

"Masses of vector bosons in two-color dense QCD based on the hidden local symmetry", *Masayasu Harada, C. Nonaka and T. Yamaoka, Phys. Rev. D 81, 096003:1-12 (2010) 査読あり

"Instantaneous interquark potential in generalized Landau gauge in SU(3) lattice QCD: A linkage between the Landau and the Coulomb gauges", *T. Iritani and H. Suganuma, Phys. Rev. D 83, 054502:1-14 (2011) 査読あり

"D Dbar production and their interactions", *Y.-R. Liu, M. Oka, M. Takizawa, X. Liu, W.-Z. Deng and S.-L. Zhu, Phys. Rev. D 82, 014011:1-18 (2010) 査読あり

"Heavy Mesons and Hadron Scattering — Structure of the Exotic Hadron X(3872) —", *M. Takizawa and S. Takeuchi, Prog. Theor. Phys. Suppl. 186, 160-165 (2010) 査読なし

"Majorana meets Coxeter: non-Abelian Majorana fermions and novel non-Abelian statistics", *S. Yasui, K. Itakura and M. Nitta, Phys. Rev. B 83, 134518:1-6 (2011) 査読あり

"Multi-quark hadrons from heavy ion collisions", *S. Cho, T. Furumoto, T. Hyodo, D. Jido, C.-M. Ko, S. H. Lee, M. Nielsen, A. Ohnishi, T. Sekihara, S. Yasui and K. Yazaki, Phys. Rev. Lett. 106, 212001 (2011) 査読あり

"Algebraic aspects of chiral symmetry", *Atsushi Hosaka, AIP Conf. Proc. 1322, 134-142 (2010) 査読なし

"Compositeness of bound states in chiral unitary approach", *Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido and Atsushi Hosaka, AIP Conf. Proc. 1322, 374-378 (2010) 査読なし

"Integrating out Holographic QCD back to Hidden Local Symmetry", *Masayasu Harada, S. Matuzaki and K. Yamawaki, In Strong coupling gauge theories in LHC era (World Scientific Publication, Singapore, 2010) 査読なし

"Effect of vector-axial-vector mixing to dilepton spectrum", *Masayasu Harada and C. Sasaki, In Strong coupling gauge theories in LHC era (World Scientific Publication, Singapore, 2010) 査読なし

"Thermodynamics with Unbroken Center Symmetry in Two-Flavor QCD", *S. Takemoto, Masayasu Harada and C. Sasaki, In Strong coupling gauge theories in LHC era (World Scientific Publication, Singapore, 2010) 査読なし

"Masses of Vector Bosons in Two-Color QCD Based on the Hidden Local Symmetry", *T. Yamaoka, Masayasu Harada and C. Nonaka, In Strong coupling gauge theories in LHC era (World Scientific Publication, Singapore, 2010) 査読なし

"Lattice QCD Study for Gluon Propagator and Gluon Spectral Function", *H. Suganuma, T. Iritani, A. Yamamoto and H. Iida, Proceedings of Science, LAT2010, 289, 1-7, (2010) 査読なし

"Relevant Momentum Components of Gluons for Confinement and Chiral Symmetry Breaking", *A. Yamamoto and H. Suganuma, Proceedings of Science, LAT2010, 294, 1-7 (2010) 査読なし

"Lattice QCD Analysis for Instantaneous Interquark Potential in Generalized Landau Gauge", *T. Iritani and H. Suganuma, Proceedings of Science, LAT2010, 277, 1-7 (2010) 査読なし

"Lattice QCD Study for Confinement in Hadrons", *H. Suganuma, T. Iritani, F. Okiharu, T. T. Takahashi and A. Yamamoto, AIP Conf. Proc. 7 pages (2011) 査読なし

"Fast Vacuum Decay into Quark Pairs in Strong Color Electric and Magnetic Fields", *Y. Hidaka, T. Iritani and H. Suganuma, AIP Conf. Proc. 4 pages (2011) 査読なし

"Fast Vacuum Decay into Particle Pairs in Strong Electric and Magnetic Fields", *Y. Hidaka, T. Iritani and H. Suganuma, KEK Proceedings, 3 pages (2011) 査読なし

"Isospin Symmetry breaking in the X(3872)", *Sachiko Takeuchi, Bled Workshops in Physics, 11, 44-48 (2010) 査読なし

"X(3872): a charmonium-molecule hybrid with isospin symmetry breaking", *Makoto Takizawa, Proceedings of the international workshop "Hadron and Nuclear Physics 09", 12-18 (2010) 査読なし

"Hadron resonances with a quark core embedded in the continuum", *Kiyotaka Shimizu, Sachiko Takeuchi, and Makoto Takizawa, AIP Conf. Proc. 1355, 109-114 (2011) 査読なし

"Properties of X(3872) as a hadronic molecule with a negative parity", *Masayasu Harada and Yong-Liang Ma, e-Print: arXiv:1012.3639 [hep-ph]. To appear in the Proceeding of Charm 10, J. Mod. Phys.: Conference Series 査読なし

"Open and hidden charm hadronic molecules", *Masayasu Harada and Yong-Liang Ma, Proceedings of international conference on the structure of baryons (BARYONS' 10) (2011) 査読なし

"Nucleon axial couplings and $[(1/2, 0) + (0, 1/2)] - [(1, 1/2) + (1/2, 1)]$ chiral multiplet mixing" V. Dmitrasinovic, A. Hosaka and K. Nagata Mod. Phys. Lett. A25, 233 (2010) 査読あり

(2) ホームページについて

領域採択後に迅速にホームページを立ち上げ、研究概要、研究組織や研究成果を掲載して情報発信を行っている。また、研究会、セミナー、スクール等の開催情報の周知、文書サーバーへのリンクによって研究情報の共有にも活用している。研究期間の後半を迎えより多くの成果が期待される今後は、ニュース発信や一般社会への情報発信も行う予定である。

ホームページアドレス：

http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/

(3) 公開発表について

・国内外でのシンポジウムやセミナーの開催状況(開催日時・場所、参加者数等)

以下の会議を主催または共催した。

1. Workshop on Hadron and Nuclear Physics (HNP09) : 2009年11月16-19日、大阪大学荒田記念館、参加者75名[共催]
2. 領域研究会 (キックオフミーティング) : 2009年11月27-29日、名古屋大学野依学術交流館、参加者65名[主催]
3. Flavor Physics Workshop 2009: 2009年 12月1日(火)~4日(金)、岐阜県下呂市下呂温泉、参加者45名。[共催]
4. 科研費特定領域と新学術領域による研究会「ストレンジネスから新ハドロンへ」: 2009年12月11-12日、大阪大学荒田記念館、参加者40名[共催]

5. B Workshop 2010: 2010年 10月12日(火)~15日(金)、静岡県熱海市熱海温泉、参加者49名。[共催]
6. BARYONS2010会議: 2010年12月7-11日、大阪大学コンベンションセンター、参加者176名 [共催]
7. 第3回次世代光センサーに関するワークショップ: 2010年12月17-18日、名古屋大学環境総合館一階レクチャーホール、参加者65名 [共催]
8. 領域研究会: 2011年2月28-29日、理化学研究所仁科ホール、参加者92名 [主催]
9. 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、参加者54名 [共催]

特に、5のBARYONS2010会議では、バリオンの構造と相互作用に関する理論・実験研究の第一人者が集まり、QCDに関する重要な問題として、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の自発的な破れによって、物質が形成される力学機構に関する未解決の問題解明に関して活発な議論をおこなった。南部陽一郎先生を迎え、“From BCS to NJL, An Old Story Retold” というタイトルで講演を行って頂いた。ProceedingsをAIPから出版予定である。また8では、研究上の繋がりが強く、格子QCD計算によるハドロン研究を推進している「素核宇宙融合」領域との共催研究会を開いた。



BARYONS 2010 国際会議での写真

・ 国内外の会議等での招待講演による発表の状況

A01

1. S.Uehara, “Review of recent results on XYZ from Belle and BaBar”, 13th International Conference on Hadron Spectroscopy (HADRON 2009), 2009年12月3日, Tallahassee, Florida, U. S. A.
2. 渡辺 靖志, “Two-photon Collisions at Belle”, Hadron Structure and Interactions 2009. 2009年8月24日, 東京家政大学
3. 宮林 謙吉, “Heavy flavored exotic hadrons at Belle”, Hadron Structure and Interactions 2009. 2009年8月25日, 東京家政大学
4. 宮林 謙吉, “Belle 実験におけるエキゾチックハドロン研究～B 中間子崩壊”, 科研費特定領域と新学術領域による研究会「ストレンジネスから新ハドロンへ」. 2009年12月12日, 大阪大学吹田キャンパス
5. S.Uehara, “Meson spectroscopy”, 11th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON 2010), 2010年6月11日, Krakow, Poland
6. K. Miyabayashi, “Other charmonium and charmonium-like results at Belle”, 7th International Workshop on Heavy Quarkonium (QWG7), 2010年5月19日, Fermilab, U.S.A.
7. K.Trabelsi, “Hadron physics and spectroscopy”, 50 Cracow School of Theoretical Physics, 2010年6月10日, Zakopane, Poland
8. S.Uehara, “Recent Belle results on two-photon annihilation into pairs of hadrons”, Workshop on Hard Meson and Photon Production, 2010年10月11-15日, Trento, Italy
9. T.Iijima, “Hadron Physics from Belle”, International Conference on the Structure of Baryons (BARYONS'10), 2010年12月7-11日, Osaka, Japan

B01

10. “Penta-quark”, T. Nakano, 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 2009年9月17日 リコッティ (東海村)
11. “Experimental Program at J-PARC”, K. Tanida, 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 2009年9月17日 リコッティ (東海村)

12. “Theta+”, T. Nakano, 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, Hilton Waikoloa Village (Hawaii)
13. “Probing Dense Matter via Hadron Properties”, M. Naruki, 3rd Joint Meeting of the APS and JPS, 2009年10月17日, Hilton Waikoloa Village (Hawaii)
14. “Recent Results from LEPS and Future Prospects at LEPS2”, T. Nakano, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, 2009年11月9日, つくば (日本)
15. “Hadron physics at J-PARC: Current status and future prospects”, M. Naruki, 11th Int. Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON 2010), 2010年6月15日, Cracow,(Poland)
16. “Spin Physics at Spring-8 – Recent Results”, H. Kohri, International symposium SPIN2010, 2010年10月2日, Julich(Germany)
17. “Highlights and Prospects from LEPS and LEPS2”, T. Nakano, International Conference on the structure of baryons (BARYONS’10), 2010年12月9日, 大阪 (日本)
18. “Status Report of the J-PARC E19”, M. Naruki, International Conference on the structure of baryons (BARYONS’10), 2010年12月10日, 大阪 (日本)
19. “LEPS2: the second Laser-Electron Photon facility at SPring-8”, M. Yosoi, International Conference on the structure of baryons (BARYONS’10), 2010年12月11日, 大阪 (日本)
20. “Korean activities in nuclear and hadron physics at J-PARC”, K. Tanida, The 3rd Science web GCOE International Symposium on Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy, 2011年2月17日, 仙台 (日本)

C01

21. Ryotaro 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, U. S. A.
22. Satoshi Yokkaichi, “核物質中の中間子質量測定とカイラル対称性”, GCOEシンポジウム 対称性の破れと量子現象 2010/2/16 京都大学 京都
23. Satoshi 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
24. Satoshi 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)
25. Satoshi Yokkaichi, “Vector meson measurements through the dilepton at KEK and J-PARC”, Heavy Ion Meeting 2010-12@Yonsei Univ., 2010/12/11, Yonsei Univ. (Seoul, Korea)

D01

26. Toru Iijima, “Status and perspectives of vacuum-based photon detectors”, 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2010), May 2-7, 2010, Cassis, France
27. T. Iijima “Particle Identification at Belle II & Development of New Photodetectors”, International Workshop on Probing Strangeness in Hard Processes - PSHP2010, Frascati, Italy, Oct. 2010

E01

28. Atsushi Hosaka, “Algebraic aspects of chiral symmetry”, YITP molecule workshop, YITP, Kyoto, May 27, 2010
29. Atsushi Hosaka, “Algebraic aspects of chiral symmetry”, International workshop “Chiral10”, Valencia University, Spain, June 21-24, 2010
30. Atsushi Hosaka, “Structure of resonances in hadron scattering”, WS on “Bound states from QCD”, ECT*, Italy, August 2, 2010
31. Atsushi Hosaka, “Structure of resonances, single particle vs collective (cluster)”, International Symposium “Nuclear Physics in Asia”, October 14, 2010, Beihang Univ, China
32. Atsushi Hosaka, “Hadron structure with coexistence of single particle and collective states”, International workshop “HNP11”, Pohang, Korea, February 21, 2010

33. Atsushi Hosaka, "Hadronic Composites and Their Mixture with Elementary Components", THIRD INTERNATIONAL WORKSHOP ON "NON PERTURBATIVE ASPECTS OF FIELD THEORY", Morelia, Mexico, April 4-8, 2011
34. Atsushi Hosaka, "Dynamically generated vs elementary components - their mixing in hadron resonances", International workshop on "Pion-Nucleon partial wave analysis and the interpretation of baryon resonances (PWA2011)", Washington DC, May 23-27, 2011
35. Masayasu Harada, "New approaches to in-medium spectral functions", International Workshop on "Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy" (September 13-17, 2010, ECT*, Trento, Italy)
36. Masayasu Harada, "Effects of vector - axial-vector mixing to dilepton spectrum in hot and/or dense matter", Heavy Ion Meeting 2010-12 (December 10-11, 2010, Yonsei Univ., Korea)
37. 菅沼 秀夫, 閉じ込めとカイラル対称性: 有効理論と格子QCDでの諸研究, 日本物理学会 2010 秋季大会, 理論核物理・素粒子論 合同シンポジウム(招待講演), 2010年9月12日, 九州工業大学
38. H. Suganuma, "Lattice QCD Study for Confinement in Hadrons", International Conference on "Structure of Baryons": Baryons' 10, December 7-11, 2010, Osaka University
39. Shin Nakamura, "Non-linear quark-charge transport in quark-gluon plasma from AdS/CFT," International Conference on "Structure of Baryons": Baryons' 10, December 7-11, 2010, Osaka University
40. Shin Nakamura, "Negative Differential Resistivity in Holography — A New Approach to Non-equilibrium Physics? —", Dec. 29th. 2010, Non-perturbative approaches to quantum chromodynamics (QCD), Jeongseon Korea.

(4) 「国民との科学・技術対話」について

下記の一般公開や講演会において、一般市民への啓蒙活動を行った。

・理化学研究所一般公開： 方位磁石をもちいた「対称性の自発的破れ」の演示模型を製作し、J-PARC E16 実験ポスターとともに展示、説明した。

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



・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。

また、以下の講演会を行った。

1. 「Bファクトリー実験における三つの発見」飯嶋 徹、名古屋大学高等研究院セミナー、2010年3月19日。
2. 「素粒子研究の最先端」飯嶋 徹、東海高校中学「サタデープログラム17th」、2010年6月26日。
3. 「物理学の『見えない』ものを『見る』工夫」宮林 謙吉、奈良県立畝傍高校SFU講義、2011年2月3日。

研究組織と各研究項目の連携状況

研究組織

X00 総括班		
役割	氏名	所属
研究代表者	飯嶋 徹	名古屋大学 現象解析センター・教授
連携研究者	堺井 義秀	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授
連携研究者	野海 博之	大阪大学核物理研究センター・教授
連携研究者	延與 秀人	理化学研究所 延與放射線研究室・主任研究員
連携研究者	保坂 淳	大阪大学核物理研究センター・教授
連携研究者	中野 貴志	大阪大学核物理研究センター・教授
連携研究者	四日市 悟	理化学研究所 延與放射線研究室・専任研究員
連携研究者	宮林 謙吉	奈良女子大学理学部・准教授
計画研究 A01 B ファクトリー実験におけるエキゾチックハドロンの研究		
役割	氏名	所属
研究代表者	堺井 義秀	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授
研究分担者	宮林 謙吉	奈良女子大学理学部・准教授
研究分担者	中野 英一	大阪市立大学理学研究科・准教授
研究分担者	渡辺 靖志	神奈川大学工学部・教授
連携研究者	上原 貞治	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・講師
連携研究者	Trabelsi Karim	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
連携研究者	今井 憲一	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター・グループリーダー
計画研究 B01 異質な構造をもつバリオンの存在形態の解明		
役割	氏名	所属
研究代表者	野海 博之	大阪大学核物理研究センター・教授
研究分担者	堀田 智明	大阪大学核物理研究センター・助教
連携研究者	澤田 真也	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
連携研究者	村松 憲仁	大阪大学核物理研究センター・特任助教
連携研究者	成木 恵	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助教
連携研究者	谷田 聖	ソウル大学・教授
連携研究者	與曾井 優	大阪大学核物理研究センター・准教授
連携研究者	中野 貴志	大阪大学核物理研究センター・教授
連携研究者	依田 哲彦	大阪大学核物理研究センター・助教
計画研究 C01 カイラル対称性の破れによる質量生成機構の実験的解明		
役割	氏名	所属
研究代表者	延與 秀人	理化学研究所 延與放射線研究室・主任研究員
研究分担者	四日市 悟	理化学研究所 延與放射線研究室・専任研究員
研究分担者	小沢 恭一郎	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
研究分担者	武藤 亮太郎	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助教
連携研究者	佐久間 史典	理化学研究所 岩崎先端中間子研究室・研究員
連携研究者	清道 明男	高輝度光科学研究センター 制御・情報部門・研究員
計画研究 D01 高輝度実験に向けた先端的測定器の開発		
役割	氏名	所属
研究代表者	飯嶋 徹	名古屋大学 現象解析センター・教授
研究分担者	足立 一郎	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
連携研究者	原 康二	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助教

連携研究者	坪山 透	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・講師
連携研究者	青木 和也	理化学研究所 延與放射線研究室・基礎科学特別研究員
連携研究者	味村 周平	大阪大学核物理研究センター・准教授
連携研究者	内田 誠	東京工業大学理工学研究科・助教
連携研究者	居波 賢二	名古屋大学理学研究科・准教授
計画研究 E01 多彩なフレーバーがもたらすクォークハドロン物質の新形態に関する理論研究		
役割	氏名	所属
研究代表者	保坂 淳	大阪大学核物理研究センター・教授
研究分担者	竹内 幸子	日本社会事業大学社会福祉学部・教授
研究分担者	原田 正康	名古屋大学理学研究科・教授
研究分担者	菅沼 秀夫	京都大学理学研究科・准教授
研究分担者	森松 治	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授
連携研究者	国広 梯二	京都大学理学研究科・教授
連携研究者	岡 真	東京工業大学理工学研究科・教授
連携研究者	熊野 俊三	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授
連携研究者	齊藤 晃一	東京理科大学工学部・教授
連携研究者	滝澤 誠	昭和薬科大学薬学部・講師
連携研究者	慈道 大介	京都大学基礎物理学研究所・助教
連携研究者	土手 昭伸	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助教

公募研究		
課題名	研究代表者 所属・職	氏名
原子核乾板検出器によるチャームペンタクォーク探索	名古屋大学理学研究科・助教	佐藤 修
B 中間子崩壊による軽クォーク中間子の研究	宮崎大学工学部・教授	松田 達郎
J-PARCにおける π 中間子ビームを用いたK中間子原子核の探索	京都大学理学研究科・助教	藤岡 宏之
ペンタクォーク Θ^+ のスピンのためのレンジカウンターの開発	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・助教	成木 恵
高輝度 γ 線と大立体角検出器を用いたペンタクォークバリオンの研究	京都大学理学研究科・助教	新山 雅之
通常原子核密度下における ϕ パズル解明に向けた、エアロゲル検出器の開発	理化学研究所・研究員	佐久間 史典
錫 $122-\pi$ 中間子原子分光実験	理化学研究所・専任研究員	板橋 健太
広範囲屈折率領域における高透明度シリカエアロゲルの開発	千葉大学理学研究科・教授	河合 秀幸
LHC最前方での放射線環境測定とGSO輝度モニタの実証	名古屋大学 太陽地球環境研究所・助教	さこ 隆志
離れた測定器読みだし回路とCOPPERを結ぶ標準データ転送リンクの開発	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・准教授	伊藤 領介
格子量子色力学によるエキゾチックハドロンの数値的研究	筑波大学 計算科学研究センター・研究員	滑川 裕介
ヘビークォークバリオンのスペクトルと相互作用	東京工業大学理工学研究科・教授	岡 真
ハドロン分子状態としてのハドロン励起状態	京都大学 基礎物理学研究所・助教	慈道 大介
格子QCDを用いたハドロン相互作用及びマルチクォーク系の研究	群馬工業高等専門学校・講師	高橋 徹
超弦理論を用いたハドロン物理学の研究	大阪大学 核物理研究センター・特任研究員	名和 要武
有限密度でのUA(1)量子異常とカイラル対称性回復の検証に関する理論研究	奈良女子大学理学部・助教	永廣 秀子
QCD有効理論による重いフレーバーを含むエキゾチック原子核の研究	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・研究員	安井 繁宏

各研究項目の連携状況

本領域で目指す研究目標の達成には、実験計画研究と理論計画研究の連携が重要である。領域立ち上げ後の2年の間には以下のような連携がえられた。実験研究者と理論研究者合同によるセミナー会「ハドロンスクエア」を21年度から持ち回りで6回開催した。国際会議BARYONS' 10では各国の関連研究者を迎え、最新の理論・実験研究で情報交換した。領域として若手を育成するサマースクールを実施し、理論の基礎とともに実験研究の議論の充実にも配慮し、若手実験研究者の参加を促した。今後も毎年開催し講義録を出版する。Belleの原子核研究者グループ(NPC)には理論研究者も加わり、解析を進めている。

個別の研究課題では、 $\Lambda(1405)$ の生成崩壊、 ϕ の光生成、 $\Lambda(1520)$ の光生成、 $X(3872)$ の構造崩壊、クォークの破砕関数等で理論(E01)と実験(A01, B01)研究の連携が進められている。物質中のハドロンの性質・質量の起源に関しては、カイラル有効理論に基づいた解析が進められ、対象となる粒子の強度関数等の解析を目指す(E01-C01)。今後は重いクォークを含むバリオンの研究、荷電ボトムニウムの新発見等で、更なる連携を図る。

公募研究との連携

- 「B中間子崩壊による軽クォーク中間子の研究」(代表者:宮崎大学工学部 松田達郎)では、高統計高精度のBelle実験データを用いて中間子スペクトルをあらためて見直すことを目的としており、まずB中間子崩壊データを用いて、 $B \rightarrow D^* a_1$ 、 $a_1 \rightarrow 3\pi$ 反応を部分波解析することによって a_1 中間子の研究を行っている。Belleの通常の解析グループでの議論に加えて、本領域研究とBelleの原子核研究者グループ(NPC)との連携をはかるための定期ミーティングでも議論している。
- 「通常原子核密度における ϕ パズル解明にむけたエアロゲル検出器の開発」(代表者:理化学研究所 佐久間史典)はC01で建設予定のスペクトロメータに新しく検出器を付加して異なる崩壊channelを測定することで、不変質量スペクトルだけでなく、分岐比の変化からも質量変化を研究する提案である。C01で行うJ-PARC E16実験の月例会合に参加してもらい、実験計画を共同で検討、推進している。
- 「広範な屈折率領域における高透明度シリカエアロゲルの開発」(代表者:千葉大学 河合秀幸)では、ピンホール乾燥法という新しい制作方法によって、 $n=1.2$ までの屈折率領域でエアロジェルの透過率の向上に成功している。計画研究D01で進めているBelle II 実験用のエアロジェル輻射体($n=1.05-1.06$)にも同方法を適用することによって性能改善が得られ、大型化についても協力しながら開発を進めている。
- 「離れた測定器読みだし回路とCOPPERを結ぶ標準データ転送リンクの開発」(代表者:KEK 伊藤領介)では、読み出し回路から、KEK開発のパイプライン式汎用読出モジュールシステムCOPPERに光ファイバーで高速にデータを転送するシステムの開発を行っている。このシステムは、B01, C01, D01計画研究で進めるLEPS, J-PARC, Bファクトリーの各実験に共用可能なシステムである。
- 理論関係では7件の研究が採択されている。そのうち3件が重いクォークを含むハドロン分光を主にしたもの、2件がQCD有効理論に基づいた真空とハドロン構造の研究、2件が格子QCDに基づいた研究である。それぞれの研究代表者とは研究会、個別ミーティング、その他適宜会合の機会を設け、連絡・連携を密にとりながら情報の共有を進めるとともに共同研究も進めている。

また、こうした領域内外の連携を促進するしくみとして、以下の施策を行った。

- 領域セミナーシリーズ「ハドロンスクエア」の開催 (p. 21 参照)
- サマースクールの実施 (p. 21 参照)

- Belle 解析スクールの開催 (p. 21 参照)

- 理論ミーティング

数名による「クォークモデルによるエキゾチックハドロン検討会」を年に5回程度開催し、情報交換とともに、共同研究を進めている。最近阪大の大学院生2名も参加し、重いクォークを含んだエキゾチックハドロンの理解に向けて議論している。

- 検出器開発における協力

TOPカウンターはLEPS 2 実験でも有用と考えられるため、B01とD01計画研究者に参画する研究者が協力して研究会を開くなどして、TOPカウンターの導入によるメリットを具体的に評価し、LEPS2用の開発を議論中である。また、C01計画研究においては、GEM Trackerの読出回路に BelleII CDCの読出回路の利用を検討中である。

- Belle NPC (Nuclear Physics Consortium) の活動

Belle実験のデータ解析への核物理研究者の参加を進めるために、Belle NPC (Nuclear Physics Consortium)」を組織した。現在、9機関から21人 (内博士課程学生が2名) の参加があり、以下のような活動を行っている。

- Belleデータの解析

- $B \rightarrow X(3872) K$, $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^0 \pi^0$ による $X(3872)$ 粒子のアイソスピン決定 [村松 (RCNP)]
- ハドロン間相互作用の解析 ($\pi\pi/K\pi/KK$ scattering length の測定) [新山(京都大学)]
- 高エネルギー $e+e-$ 衝突における $\Lambda(1405)$ の生成率計測 [内田 (東工大)]
- scalar & axial vector メソンの解析 [松田、元田 (宮崎大学)]
- チャームを含んだダイバリオン状態の探索 瀧澤 (昭和薬科大学)

- Belle II CDCの開発

Belle IIに対する検出器開発についてはCDC (Central Drift Chamber)の制作に参加している。プロトタイプチェンバーのパフォーマンス評価のためのビームテストをSPring-8 LEPS 施設で行う事を予定している。

- 計算機環境の整備

大阪大学核物理研究センター (RCNP) のメインコンピューターシステムに、Belle解析環境をインストールし、300TBのディスク容量を確保してBelle実験の実データとモンテカルロデータをすべて保存できるようにした。計算機ノードについては約20 jobs/userを確保し、関西におけるデータ解析センターとして十分な環境が整備された。

- 解析ミーティングの開催

Belleデータを使ったハドロン解析に関する議論を行うために、領域に参画する奈良女子大学、名古屋大学、大阪市立大学、KEK等のBelle研究者とNPCメンバーによる隔週の定例ミーティングを立ち上げた。若手に対する解析手法のインストラクションの場としても活用し、ハドロン解析を行う研究者チームの底辺拡大にもつながっている。

研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む)

計画研究A01:

初年度には、本研究の物理解析を効率的に進めるための設備投資として、拠点の一つである奈良女子大学に、専用のデータ解析用計算サーバーを導入した。また、もう一つの拠点であるKEKに既存のシステムに加え、さら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。さらにデータ解析用計算サーバーを有効に活用するため、ディスクアレイシステムを増強した。KEKでは2009年10月から、奈良女子大学では2011年5月より研究員を雇用し、より集中的に効率のよい解析の促進に努めた。国内外の協力研究員を短期・中期にわたり招待し、密接に議論し研究の連携を進めた。ワークショップや解析スクールなどを積極的にサポートし、広く関連する物理について議論を行った。

計画研究B01:

研究費の約65%を投じ、LEPS施設にクラス最高出力(連続1W)の深紫外固体レーザーを複数台導入し安定的に高強度光ビームを供給可能にした。レーザー電子光のエネルギーの上限が2.4GeVから3GeVに上がり、 K^* を伴うハイペロン励起状態生成反応チャンネルが開き、高励起共鳴状態の探索範囲や各種ハドロンの光生成反応のエネルギー依存性をみる範囲も広がった。とくに、ペンタクォーク Θ^+ や分子共鳴状態候補 $\Lambda(1405)$ の生成において、それぞれK中間子、反K中間子との結合を選択的に抽出できるデータが得られるようになった。

残りは、大立体角検出器の建設に係る経費(E949検出器移設(解体作業を行うための渡航費)、飛跡検出器(TPC)やタイミング検出器(RPC)の開発、専任の研究員1名の雇用)とハドロンのビームを用いた実験に係る経費(崩壊陽子検出器や標的装置の開発など)に支出した。前者の進展は「主な研究成果」に記載した。後者に係る実験はJ-PARCの被災により1年程度の遅延が見込まれているが関係者の努力で鋭意復興中であり引き続き早期の実験実施を目指す。

計画研究C01:

研究費は主として検出器開発のために使用しているが、発表旅費の他、海外研究者のもとでのHBD技術研修のための旅費としても支出した。主たる開発要素である、カプトン製およびLCP製大型GEM、トラックー読出用低物質質量二次元読出両面ストリップ基板、HBD読出用大型四層基板の試作をおこなひ、それらをテストするためのガスチェンバーを製作した。備品として高圧電源、チェンバーガス混合・計測装置、GEM保管用ドライキャビネットなどを購入・製作したが、これは今後本実験でも使用する。CsI蒸着は浜松ホトニクスに依頼していたが、テスト蒸着用装置を購入して自ら蒸着を行うことによりCsI光電面の量子効率の改善が進展した。量子効率測定用の分光装置は東大CNSより借用しているが、測定用の紫外光用PMTはこの研究費で購入した。

計画研究D01:

H21, 22年度においては、光検出器の試作に経費の約50%を使用した。これにより量子効率が20%増加し、検出器の性能改善につながった。また、光検出器の性能試験を行うテストベンチの整備を進めたが、このテストベンチは、今後Belle II実機用に購入する数百本の光検出器の納入時の性能テストに有効に活用できるよう設計されている。

計画研究E01:

E01の全体予算の大部分は研究員の雇用費に充てられている。全体で5名採用し関係研究機関に配置し関係研究機関に配置され、本計画研究で最も重要な研究テーマを遂行している。Khemchandaniはベクトル中間子と核子の相互作用として現実的なものを構成するとともに、擬スカラーを含めたチャンネル結合の問題を扱いより現実的なモデルの構築に成功した。MaはX(3872)のDD*構造を扱い、崩壊における役割を分析した。中村と安井の研究成果は主な研究成果の項目E01の節、(2, 3, 5)の通り。川村は破砕関数の分析を進め、Belleデータとの比較検討中である。

その他研究値合わせ等の旅費、サマースクール若手参加者旅費補助等の他、昨年度は国際会議BARYONS' 10共催に使われた。

今後の研究領域の推進方策

本新学術領域研究の目的は、世界的にユニークな日本の高輝度ビーム施設であるBファクトリーの電子・陽電子ビーム、Spring-8の光子ビーム、J-PARCのハドロンビームを駆使して、多彩なクォークフレーバーや密度を自由度とした豊富なデータを網羅し、これを統一的に理解する理論研究を強力に推進し、クォークがどのように質量を獲得し、どのような形態でハドロンに閉じ込められるのかを探求することにある。また、現行実験によって確実に成果を出しながら、3実験研究の連携による検出器開発を進め、将来の増強加速器によるハドロン研究につなげる。そして、これまで独立に研究を進めていた素粒子・原子核物理学研究者が「ハドロン物理」という共通のキーワードを得て結集し、その境界領域に新しい学術領域を創成することを目指している。

本領域の研究は、この当初の構想どおりに、また計画どおりに順調に進んでいると言ってよい。Bファクトリー実験では、本領域スタート後も新しいハドロン共鳴の発見が続き、特にボトムモニウム領域では、“ Z_b ”と表記されるテトラクォーク候補を発見した。また、 $\phi\phi$, $\phi\omega$ などのストレンジ・クォーク領域にも研究が展開されている。一方、LEPS実験からは未知のバリオン共鳴を示唆する結果が得られ、J-PARCにおいても π ビームによる Θ^+ 生成上限値の予備結果がJ-PARCハドロン実験施設の第一物理成果として得られた。このように構想どおりに、多彩なフレーバーを有するハドロン分光研究が展開され、理論計画研究によるデータの分析や検討が進められている。

今後もこれらの研究から継続的に物理成果を発信し続ける。Bファクトリーの大量データの解析を精力的に進め、エキゾチックハドロンの構成形態を明らかにする。特に、理論研究から予言されているチャームやボトムを含んだ安定なエキゾチックメソンやバリオンの探索や、新しい解析手法の開発を進め物理解析の幅を広げる。LEPS実験においても、高エネルギー化されたレーザー電子光による実験を継続し、進行中の重水素標的による $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ の高統計データ解析を進め Θ^+ の再確認を目指す。一方、J-PARCにおいても、 $\pi^- p \rightarrow \Theta^+ K^-$ による Θ^+ 探索を継続し75nb/srまで感度向上を狙う。さらに、 $K^- d \rightarrow \Lambda(1405) n$ による分子共鳴状態候補 $\Lambda(1405)$ の生成崩壊分光実験を行い、 $\Lambda(1405)$ の2極構造を検証する。

このように着実に物理成果をあげながら、次世代の高輝度実験への準備を進める。幸いにして、本領域採択後に、Bファクトリーの高輝度化(SuperKEKB計画)が予算化され、Spring-8においてもLEPS2ビームラインの建設が始まっており、本領域研究によって新実験で使用する検出器の製作等を進める。J-PARCではビームラインの建設に若干の遅れがあるが、その状況によらず、H25年度までにE16実験の検出器の製作を可能な限り進め、ファーストビームに備える。

上記のように豊富な実験データが得られるなかで、これまで以上に理論と実験、そして理論研究間の連携を強める。採択時の審査所見にあるとおり、「この研究を単なる粒子の博物学に終わらせず、より基本的な原理・法則の解明を進めるための鍵を握る」のが理論研究であるとの認識のもと、領域が開催した研究会やセミナーにおいても活発な議論を行ってきた。領域発足時の研究課題を確実に進める一方で、新しいデータの理解に向けたブレインストーミングも進めていく。最近進展の著しい格子QCD計算や弦理論研究者との連携を強めて、定性的かつ定量的な議論を深めることで、より本質的な理解に迫りたい。

本領域研究を契機として、素粒子-原子核研究者の交流が確実に進んだと自己評価している。これが新しい学術領域として定着するには、上記のようにハドロン研究のサイエンス上の意義を明確化するとともに、この研究に興味を持つ若手研究者の育成、国際的な研究成果の発信、情報発信によって広く一般社会で認知されることが肝要と考えている。特に、これまでの研究交流は、国内専門家に限定されていた。今後は、より国際的な情報発信や研究交流を強化するために、海外研究者の招聘や国際研究会の開催などを積極的に進めてゆく。本研究領域の最終年度となる2013年に、第15回ハドロン分光国際会議(Hadron2013)を日本に招致して主催することとなった。この国際会議を本領域の総括の場として研究の推進を図りたいと考えている。

総括班評価者による評価の状況

総括班評価者として、以下の各氏に領域の評価・助言を依頼している。領域の申請時にメンバーであった土岐、山内、Olsenの三氏に加え、新たに、徳宿、永江、中村の三氏を評価者として加えた。これにより、素粒子-原子核物理学の両分野、理論-実験の双方の立場からの評価・助言を得ることが可能になった。また、中村氏からは、ハドロン物理の重要なツールである格子QCD計算の立場から助言を得ることも期待している。

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

平成23年8月には、下記プログラム案で、領域評価委員会を開催する予定である。

「新ハドロン」新学術領域 第1回評価委員会プログラム案

1. 領域の概要 飯嶋 徹 (15分)
2. 各計画研究の報告
 - A01: Bファクトリー 堺井 義秀 (20分)
 - B01: LEPS 野海 博之 (20分)
 - C01: J-PARC E16 延與 秀人 (20分)
 - D01: 検出器開発 飯嶋 徹 (20分)
 - E01: 理論研究 保坂 淳 (20分)
 - X00: 総括班 飯嶋 徹 (20分)
3. Belle NPC の活動 中野 貴志 (20分)
- (昼食)
4. 若手研究報告 (2件) ポスドク (20分x2)
5. 公募研究報告 (2件) 公募研究代表者 (20分x2)
6. 議論、質疑応答 全員 (30分)
7. 委員による議論 (クローズドセッション) 委員 (30分)
8. 評価コメント