

■ 会議報告

Hadron2013 報告

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構

飯嶋 徹

ijijima@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

大阪大学 核物理研究センター

鎌野 寛之 野海 博之

kamano@rcnp.osaka-u.ac.jp noumi@rcnp.osaka-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

堺井 義秀

Yoshihide.Sakai@kek.jp

東北大学大学院 理学研究科

佐々木 勝一

ssasaki@nucl.phys.tohoku.ac.jp

奈良女子大学 研究院 自然科学系

宮林 謙吉

miyabaya@cc.nara-wu.ac.jp

東京工業大学 大学院理工学研究科

安井 繁宏

yasuis@th.phys.titech.ac.jp

理化学研究所

四日市 悟

yokkaich@riken.jp

Hadron 2013 Local Organizing Committee

2014年3月6日

1 会議の概要

2013年11月4-8日の5日間にわたり、“XVth International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2013)”が、奈良県新公会堂において開催された。この国際会議は、1985年に第1回が米国メリーランド州のCollege Parkで開催されて以来隔年で開催されており、日本の主催は、第2回会議(1987年、つくば市)以来2回目となる。15回目となる本会議は、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」(略称「新ハドロン」)総括班の主催で開催し、200人を超える研究者が世界中から集まった。“Hadron Spectroscopy”という特定のテーマに関するこの国際会議に、第1回会議から30年が過ぎてなおこれだけの参加者が集まることは、最近の分野の盛り上がり象徴していると感じる。その端緒となったの

が、2003年のSpring-8 LEPS実験によるペンタクォーク Θ^+ と、Belleによる $X(3872)$ の報告である。J-PARCの運転開始もあり、この分野は日本がリードしているといつてよい。

2 会議の組織・運営

今回の日本主催は、前回のHadron 2011(ミュンヘン)で決定され、開催地は奈良、開催時期を秋とすることがアドバイザリー委員会の支持を得た。プログラムは、プレナリー招待講演と、4本のパラレルセッション; 1) Heavy Hadrons, 2) Light Hadrons, 3) Hadron Interactions, 4) Hadrons in Mediumにおける口頭発表よりなる。また、大学院生やポスドクなどの若手の発表を促すために、ポスターセッションを設けた。



図1：能楽堂ホールでのプレナリーセッション

会場となった奈良県新公会堂はメインが能楽ホールで、能舞台の上にスクリーンを設置し、講演者は能舞台に靴を脱いで上がる、という粋な趣向となった(図1)。公会堂には能楽ホールのほかにもいくつかの大小会議室があり、4本のパラレルセッション、ポスターセッションやレセプションを開催するのに十分な施設である。ほかの国際会議も頻繁に開催されているため場慣れした職員がいて、色々と苦勞せずに済んだのはありがたかった。気になる会場使用料であるが、登録料の1/4から1/3に何とか収めることができた。場所は、奈良公園の中という絶好のロケーションであり、LOCの側ではエクスカッションを用意せず、バンケットのある日の午後を自由時間とした。天候にも恵まれ、各々お目当ての場所まで足を運んで自由な遠足を満喫したようであった。また、昼食は弁当を配布したが、参加者は数人ずつ連れ立って奈良公園でピクニックを楽しんでいた(図2)。

参加登録については、受付締切後の10月初めに、アメリカ政府機関の資金がショートしたために来日できなくなる講演者が多数出た。多くの実験グループが、急遽代打の講演者を連絡してきたため、10月中旬に参加登録システムを再オープン、それでも収容しきれないケースが判明して10月下旬に再々オープンするはめになった。ビザ申請に関しては、阪大RCNPの秘書の方に多大な尽力をいただいてこなすことができ、真に頭が下がる思いである。

レセプションとバンケットはJR奈良駅そばのホテル日航奈良で行った。ポスターセッションでの料理調達、休憩時間のコーヒーサービスの茶菓も含めて「消えもの(=飲み食い関連)」の選定と手配ではLOCの女性メンバーの尽力が光り、質と量の両面で参加者にも好評であった。

会議期間中の運営は、奈良女大、阪大、京大、名大から合計34名の学生およびポスドクの皆さんに、受付デスクの業務、会場設営、セッション進行の補助、昼食の弁当配布など多方面に活躍してもらって乗り切ることができた。会議期間中を通して、運営サイドにも参加者にも急病やけが



図2：昼休みの一コマ。昼食は弁当を配った。

などのトラブルがまったく出なかったことは真に幸いであった。

3 講演トピックス

本会議の講演内容全体については、会議のホームページ(<http://hadron2013.kek.jp>)をご覧いただきたい。以下では、特に印象に残った講演をまとめる。

3.1 Heavy Hadrons

今回の会議では、Bファクトリー実験(Belle, BaBar)やBESIII実験により、エキゾチック粒子を含むチャーモニウムとボトモニウム関連の新結果が多数報告された。LHC実験(LHCb, ATLAS, CMS)からもheavy hadronの生成やスペクトロスコーピーに関する高統計の新しい結果が数多く報告され、この分野の新しいページを開いたといえる。

エキゾチック粒子の研究は、 $X(3872)$ の発見が契機であったが、今も $X(3872)$ は中心的な話題である。今会議ではLHCbが 5σ 以上の有意性で $J^{PC} = 1^{++}$ の確立を報告、Belleも $\chi_{c1}\gamma$ や $J/\psi\eta$ などへの新しい崩壊モードの探索結果を報告した。さらにBESIIIからは、 $e^+e^- \rightarrow X(3872)\gamma$ 反応による $X(3872)$ 生成の報告があった。荷電をもつチャーモニウム様エキゾチック粒子 $Z(3900)^+$ の発見は、今回の一大トピックである。BESIIIは $E_{CM} = 4.26\text{ GeV}$ での $e^+e^- \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ の解析、BelleはISR (Initial State Radiation) e^+e^- 反応での $Y(4260) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ の解析で $J/\psi\pi^+$ の質量分布中に $Z(3900)^+$ を発見し、CLEO-cの解析でも追認されたことが報告された。さらにBESIIIは、 $Z_c(3885)^+(\rightarrow D^*\bar{D}^0)$ 、 $Z_c(4025)^+(\rightarrow D^*\bar{D}^0)$ 、 $Z_c(4020)^+(\rightarrow h_c\pi^+)$ の新チャーモニウム様粒子の発見を報告した。エキゾチック粒子群を体系的に理解する上で大きな前進といえる。

ボトモニウム関連では、BelleとBaBarから $h_b(1P)$ 、 $\eta_b(2S)$ 、 $\eta_b(1S)$ 、 $\Upsilon(1D)$ 粒子の発見が報告された。これによりクォークモデルが予言する状態のかなりの部分が埋まったことに

なる。また、LHC/ATLAS 実験により $\chi_b(3P)$ が $\Upsilon(1/2S) \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ の質量分布から発見され、D0 と LHCb でも確認された。Belle では $\Upsilon(5S)$ のデータの解析で $Z_b(10510)^+$ および $Z_b(10560)^+$ が既に見つかっていたが、今回はその中性パートナーである $Z_b(10510)^0$ が $\Upsilon(1/2S)\pi^0\pi^0$ モードで発見された。さらに、 $Z_b(10510)^+ \rightarrow B^{*+}\bar{B}^0$ および $Z_b(10560)^+ \rightarrow B^{*+}\bar{B}^{*0}$ 崩壊モードが発見され、これらが主要崩壊モードであることから、 Z_b^+ 粒子が $B^*\bar{B}^{(*)}$ の中間子分子である可能性が高まった。

LHC実験の結果の多さも今回印象深かったことの一つであり、この分野での今後の貢献が期待される。LHC では、クォークoniumが大量に生成されるので、 J/ψ , ψ' , $\Upsilon(nS)$, χ_c , χ_b などの生成断面積の精度のよい測定や偏極度の測定が進んでいる。生成断面積は、高次項を考慮した理論予想とだいたい合うが、高い横運動量領域や偏極度では理論からのずれが指摘されている。今後は、クォークoniumに付随した粒子も測定することで、生成のメカニズムの理解やスペクトロスコーピーへの展開が期待される。また、チャームハドロンやボトムハドロン生成、 B_c やその励起状態、 B バリオン測定が、Tevatron や LHC(特に LHCb) で詳細に行われており、多くの新結果が報告された。

LHCでの重イオン衝突は、クォーク・グルーオンプラズマ相を探求する最高の環境であるが、hard scattering で生成される重クォークは高温媒質の状態を探るのに適している。ALICE では、チャーム粒子、 J/ψ , ψ' , $\Upsilon(1S)$ などの生成を測定し、 p - p , Pb-Pb, および p -Pb 衝突で比較した。Pb-Pb 衝突では、大きな横運動量領域で heavy hadron および J/ψ や $\Upsilon(1S)$ の生成が抑制されていることが分かった。ただし J/ψ の抑制は RHIC に比べて小さく、低い横運動量領域で再結合が起こっていることが示された。

一方、エキゾチックハドロンの構造について多くの理論的研究が発表された。 $X(3872)$ や $Z_b(10510)$, $Z_b(10560)$ の質量や崩壊プロセスはハドロン分子描像でよく説明できることが QCD 和則やハドロン分子モデルで示され、この可能性が一段と高まった。さらに Z_b から $\Upsilon(h_b) + \pi$ への崩壊について、重いクォークのスピンの対称性に基づいた一般的な説明がなされ、重いハドロンにおいてスピンの対称性が本質的な役割を果たすことが示された。しかしながら、コンパクトなマルチクォーク状態である可能性も残されており、より詳細な研究が今後の課題として残された。最近の研究として格子 QCD によるハドロン質量およびハドロン間相互作用の研究の報告がなされ、ハドロン物理をゲージ理論から理解する重要性が示された。

3.2 Light Hadrons

軽クォークハドロンの励起状態については、多チャンネル反応理論に基づく研究により、共鳴現象の観点から軽

クォークハドロン分光を再考する必要性が近年広く認識されており、本国際会議でもこの方向性に則ったプログラム構成とした。当該セッションでは、従来のハドロン構造モデルでは想定されない、共鳴特有の現象に起因する軽クォークハドロンの性質（質量や結合定数の複素数性、multiple pole 構造など）をいかに解釈するかについて、新しい理論的試みが報告された。軽クォークハドロン“共鳴”の本格的な研究は始まったばかりであり、多くの課題も提示された。また、軽クォークメソンセクターでのエキゾチック中間子の候補であるグルーボールを実験的にいかに同定するかについての理論的検証が行われ、 B , B_s や χ_c 中間子崩壊を介した同定法が提案された。軽クォークハドロンスペクトルや位相のずれを介したハドロン共鳴パラメータの決定に関する格子 QCD 計算の最新成果も複数のグループから報告された。

一方実験については、電子陽電子コライダー実験がもたらす膨大なデータは、新しい共鳴状態発見を含むハドロン物理研究の宝庫である。なかでも、BESIII による、 J/ψ やほかのチャームoniumのハドロンへ崩壊チャンネルを通じた多彩な共鳴状態の報告は目を引いた。グルーボールや未知の共鳴状態を示唆するデータなど、今後の進展が気になる。コライダー実験の高統計データは基礎物理の精密な検証に役立つ。 μ 粒子の異常磁気能率では量子補正における QCD の効果が大きな不定性を与えるが、これを実験的に決めるために、 e^+e^- から ISR を通して軽いハドロンを生成する断面積の詳細なデータが BaBar 実験から報告された。

高エネルギーハドロンビームによる特徴的な運動学を利用したハドロン共鳴状態のデータが COMPASS 実験から報告された。特に、Primakoff 効果による光子との散乱過程の解析による π や中間子共鳴状態の電磁氣的分布に関する測定結果が紹介された。

スピン偏極を持ちうる光子ビームと核子の散乱データはバリオン共鳴状態の深い理解をもたらす。ELPH, ELSA および JLAB における実験グループから広いエネルギー領域にわたる π や η 生成データが報告された。バリオン共鳴に関する研究においては、多重 π 生成やストレンジ粒子の生成を伴う新しい詳細なデータが必要とされる。JLAB から K^* , Σ^* や Ξ^* の光子生成に関する報告があった。これらのデータは、多チャンネル反応理論に基づく理論的解析によって、バリオン励起状態のスペクトル構造を明らかにすると期待される。

3.3 Hadron Interactions

Hadron Interactions のセッションは核子構造に関する 2 つの平行セッションを含み、ハドロンの構造やハドロン間相互作用を広くカバーした。そのため、ほかのセッションに比べ取り扱う話題が、非常に広い範囲（使っているエ

エネルギー領域の異なる実験や、多種多様な理論的アプローチなどに分散しており、パラレルセッションのプログラム構成には悩まされた。

核子構造では、依然クォーク・グルーオンレベルで見た核子スピンの起源の理解が最大のテーマである。グルーオンの核子スピンへの寄与に関しては、偏極レプトン・核子散乱を用いた HERMES, COMPASS による仮想光子とグルーオンが融合(PDG)してクォーク対を作るプロセスを利用した直接測定や、偏極陽子衝突実験による中性 π 粒子生成(PHENIX)とシングルジェット(STAR)のダブルスピン非対称度の測定結果などから、少なくともグルーオンの担う運動量の割合 x が 0.05 から 0.2 程度の領域ではグルーオンのヘリシティ分布関数が小さい事実が確定しつつある。PDG がより支配的な open charm のデータを用いた COMPASS の最新の実験結果もエラーはまだ大きいものグルーオン偏極が非常に小さいという結果を踏襲している。今後は small x 領域でのグルーオン偏極を測定することが求められている。

クォークの種類別偏極については、特に反クォークのヘリシティ分布のフレーバー依存性についてはまだ詳細は明らかになっていない。最近の SIDIS(Semi-Inclusive Deep Inelastic Scattering)のデータを取り入れた解析では、クォークと反クォークの寄与が常に和の形でしか現れない DIS のデータのみを使いフレーバーSU(3)対称性を仮定した昔ながらの解析とは異なる振る舞いを示す点が報告された。今後の STAR や PHENIX による、 W ボソンを使った反クォークの種類別偏極測定の最終結果が期待される。また、理論的な進展としてインパクトがあったのは、核子スピンの完全分解の問題が解決の方向にあるという報告である。

ハドロン間相互作用に関しては、昨今の格子ゲージ理論による強い相互作用の第一原理計算(格子 QCD 計算)を利用したクォーク・グルーオンのレベルでの原子核の理解に関するいくつかの挑戦がある。特に HALQCD collaboration によるハイペロンを含むバリオン間相互作用への取り組みでは、QCD に基づく理論計算の精密化に伴って、今後ハドロン間相互作用をクォーク・グルーオンから定量的に理解する道筋が示され、それを応用して H-dibaryon の存在可能性を示すなど、理論と実験とのより緊密な連携が期待される分野となりつつある印象を受けた。

また、パラレルセッションで特に興味を惹いた内容としては遅い粒子崩壊におけるフェルミの黄金律の補正の可能性を指摘している報告で、ハドロン間相互作用に限らず、物理の多くの事象に関連する重要な指摘の可能性が高いと感じた。

3.4 Hadrons in Medium

Hadrons in Medium のセッションでは、ストレンジネス核物理、中間子原子および原子核、核物質中のハドロンスペクトルについての活発な議論があった。

ストレンジネス核物理では、KEK から J-PARC にいたるハイパー核実験の報告があった。J-PARC E10 実験では neutron-rich Λ ハイパー核についての報告があったが、先行する FINUDA 実験の結果と一見矛盾する結果が出ており、理論的解釈が待たれる。また、 Ξ ハイパー核の発見に向けて準備中の E05 実験、Mainz での電子ビームを用いた Λ ハイパー核精密測定実験の報告もあった。KN 相互作用については、SIDDHARTA 実験の最終結果の報告があり、 K 中間子水素原子を用いて $K-p$ 散乱長が高精度で決定された。また、 $K-NN$ 束縛状態探索の報告が、国内外 (J-PARC, LEPS, KLOE, HADES) から 5 件あり、J-PARC E27 実験からは、preliminary ながら存在の兆候ありと発表された。

中間子原子核では、 π, η, η' 原子核について理論と実験双方からの多くの報告があった。とくに、WASA-at-COSY 実験からは $\eta-^3\text{He}$ 束縛状態の存在が preliminary ながら初めて報告された。 η' 原子核については、ELSA および GSI で探索実験が準備中であり、有限密度での $U_A(1)$ 対称性やカイラル対称性への手がかりとして期待されている。一方、 π 中間子原子を使って原子核中のカイラル凝縮を測定する実験は、GSI から 理研 RIBF に拠点を移し、日本の実験家・理論家の密接な協力のもと、測定の精密化・系統化へと進んでいる。

核物質中でのハドロンスペクトルについては、SPS や RHIC での高エネルギー重イオン衝突でみつかっている、いわゆる low-mass di-lepton enhancement 現象が、有限温度におけるベクトル中間子の mass modification の結果と考えられているが、その物理的起源、すなわちカイラル対称性の回復の証拠か否かという問題についての統一的解釈はまだない。この現象は、GSI の HADES 実験が低エネルギー重イオン衝突でも確認していたが、さらに陽子-原子核衝突 ($p+A$) でも最近観測したと同実験より今回報告された。しかしその起源については、baryonic resonance の効果を慎重に評価するべきであるとして、パイオンビームを使った実験でそれらの EM form factor を直接測定する計画を進めているとのことであった。Elementary process の解明については、CLAS 実験での $\gamma+p/A$ 反応による di-lepton スペクトルの $\rho-\omega$ 干渉を用いた解析の報告もあった。また、 $p+A$ 実験では ϕ 中間子の mass modification 測定の高精度化を目指して J-PARC E16 実験が準備中である。これらの実験に関連して、有限密度での ω, ϕ, D 中間子のスペクトルについての理論研究の報告も活発であった。

4 おわりに

以上のように、盛況のうちに無事会議を終えることができた。図3は、奈良県新公会堂の庭で撮影した会議参加者の集合写真である。会議開催に協力頂いた皆さん、**International Advisory Committee** と **Local Organizing Committee** のメンバー、事務や秘書の方々、運営を手伝ってくれた学生諸君、奈良県新公会堂の方々、旅行者の方々などすべての関係者に感謝申し上げたい。

本会議は、文部科学省新学術領域科学研究費補助金「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」の支援を受けて開催された。本会議は、本年度が最終年度となる「新ハドロン」新学術領域の成果発信の舞台でもあった。会議の開催はもちろんであるが、新学術領域科研費による支援を受けて研究が進み、分野の発展に貢献することができたと自負している。この場をかりて感謝申し上げたい。

次回は、2015年に **Jefferson lab.** の主催によりバージニア州で開催される。



図3：奈良県新公会堂の庭で撮影した参加者集合写真