

J-PARC で展開されるハドロン物理

大西 明 (京都大学 基礎物理学研究所)

Abstract

J-PARC で展開されるハドロン物理では、多くの新しい粒子・状態の発見が期待されるとともに、多彩で高強度のビームを用いた研究を系統的に行うことにより、高密度物質を含むクォーク・ハドロン多体系を QCD から理解するために重要なデータを提供する実験が行われます。ここでは Day-1 実験のいくつかの課題 (ハイパー核、中間子核、エキゾチックハドロン) を中心にして、J-PARC のハドロン物理について概観します。

1 Introduction

待望の加速器施設 — Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) — が完成しつつあります。J-PARC は KEK の「大型ハドロン計画」と JAERI (現 JAEA) の「中性子科学研究計画」を統合して提案された計画であり、原子核・素粒子物理学を中心とする理学と原子力工学・中性子線科学を中心とする工学・応用科学が協力して建設が進められています。



Figure 1: J-PARC 施設配置図。J-PARC ホームページ <http://j-parc.jp/> より。

Figure 1 に示すように、J-PARC は 3 つの加速器の複合施設です。リニアック (線形加速器) では原子力発電でできる長寿命放射性核を短寿命の原子核に変換するとともに発電を行う加速器駆動炉開発に向けた基礎研究が行われる予定です (二期計画にて建設予定)。3 GeV シンクロトロンでは世界最高強度のパルス型中性子・ミュオンビームを用いて物質科学・生命科学の研究が行われます。50 GeV シンクロトロンではハドロン実験施設においてハイパー核、中間子核、核内中間子、エキゾチック・ハドロン、核子構造、稀崩壊による対称性の破れなどの研究が行われます。またニュートリノ・ビームラインでの ν 振動実験も行われます。

2008 年 8 月 7-9 日の 3 日間、KEK において研究会「J-PARC の物理：ハドロン・原子核研究の新しい局面」が行われました。この研究会では、J-PARC 稼働を来年に控えるこの時期に、ハドロン実験施設で展開される物理全般に関して、現状を把握するとともに今後の可能性等を議論することにより、J-PARC での研究を成功に導くことを目的としました。この稿では、この研究会で筆者が発表した内容に基づいて、J-PARC での物理を展望していきたいと思えます。

2 Physics of Dense QCD at J-PARC

50 GeV 陽子ビームを用いた原子核素粒子実験施設での実験では 26 の実験プロポーザル (LoI (Letter of Intent) を含む) が提案されています (http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal_e.html)。これらの計画には、ハイパー核物理 (10 件)、中間子核物理 (中間子原子核・原子、核内中間子) (7 件)、エキゾチックハドロン (3 件)、構造関数 (4 件)、稀崩壊による対称性の破れ (3 件)、ニュートリノ物理 (2 件) と原子核・ハドロン・素粒子物理学の広い範囲をカバーするものです。

ハドロン実験施設での研究の一つの特徴は、 Ξ ハイパー核、ペンタ・クォーク、深く束縛された K 中間子核等の様々な粒子・状態の発見の可能性があることです。クォーク・ハドロン多体系には多くの未発見の (準) 束縛系があると考えられており、J-PARC では、 $^{12}_{\Xi}$ Be を始めとする様々な Ξ ハイパー核やダブル Λ ハイパー核、 $\Theta^+(1530)$ に加えて反 10 重項に属するバリオン共鳴 (特に Ξ^{*-} や Ξ^+)、大きな原子核に K^- , η , ω 等の様々な中間子が (準) 束縛された状態などの多くの新しい粒子・状態が発見できるかも知れません。

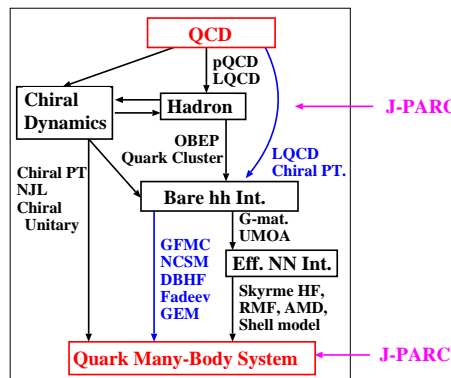


Figure 2: QCD から原子核を記述する上で必要な段階。

また J-PARC での物理では QCD からクォーク・ハドロン多体系への系統的な研究を行えることが 2 つ目の特徴です。QCD から原子核や核物質を含むクォーク・ハドロン多体系を記述することは原子核・ハドロン物理学の最大の目標の一つですが、これには Fig. 2 に示すように多くの段階があります。近年にはいくつかの “Short Cut” (QCD \rightarrow 核力、核力 \rightarrow 原子核)[8] も開発されていますが、QCD から直接原子核の束縛エネルギーや波動関数を説明することはまだまだ困難であり、段階を踏んだ理解が不可欠です。J-PARC 実験では、高強度ビームの特徴から多彩な 2 次ビーム (および 1 次ビーム) が利用可能であり、QCD \rightarrow ハドロン (核子の構造関数、エキゾチック・ハドロン)、ハドロン間相互作用 (YN 散乱、ハドロン共鳴)、クォーク・ハドロン多体系 (ハイパー核、中間子核) のそれぞれの段階に対して敏感な実験が行えます。

J-PARC ハドロン研究施設での物理の 3 つ目の特徴は、中性子星の内部等で実現している高密度物質の実験データに基づく理解に決定的な役割を期待できることです。中性子星コアではバリオン密度が標準核物質密度の数倍にも達すると考えられており、Fig. 3 の左図 [9] に示すような様々な「クォーク・ハドロン物質相」— ハイペロン混合、中間子凝縮 (π^- , K^- 凝縮)、Quarkyonic 物質 [7]、クォーク対凝縮 (Color SuperConductor; CSC) — が提案されてきました。しかしながら、実験室で低温・高密度物質を作り出すことは困難であり、多くの提案は理論的示唆にとどまっています。J-PARC でも低温・高密度状態を直接作り出すことは出来ませんが、高密度で現れる粒子・状態の核物質中での振る舞いを実験データに基づいて明らかに出来ます。J-PARC で得られるこうした知見を他の実験施設での成果を組み合わせ、理論的な枠組に基づいて外挿を行うことにより、これまでよりもはるかに高い信頼性をもって高密度で現れる物質の状態について議論することが可能となります。

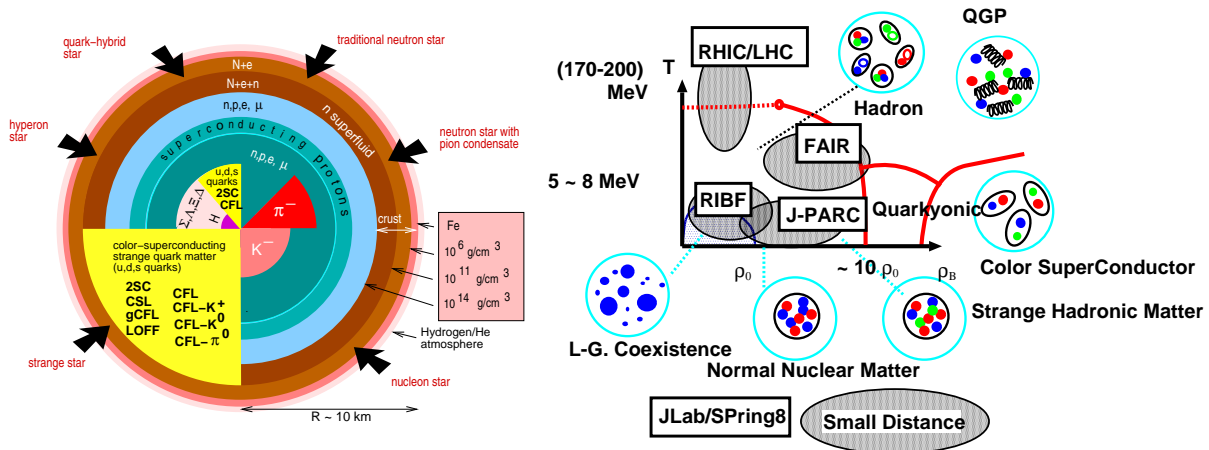


Figure 3: (左) 中性子星内部の様子 (参考文献 [9] より)。(右) 期待される核物質の相図。

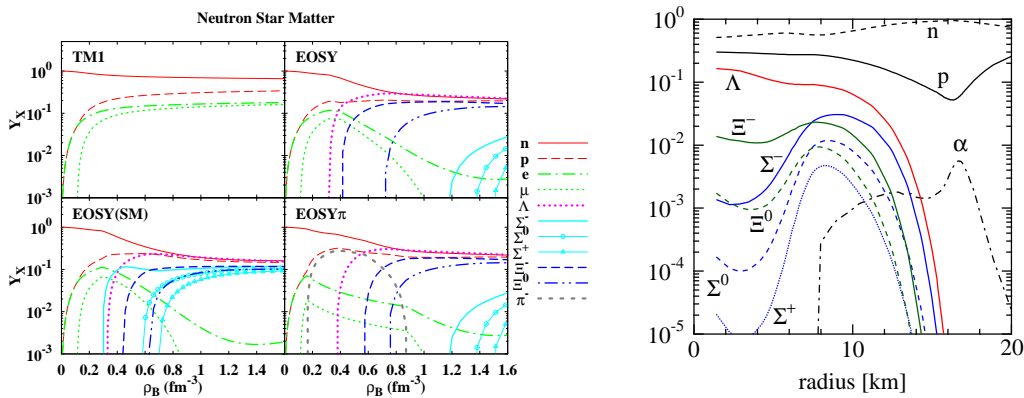


Figure 4: (左) 中性子星内部の粒子数組成比 (参考文献 [10] より)。引力的 (EOSY(SM)、および斥力的 (EOSY [10]) なハイペロンポテンシャルの結果を比較している。(右) ブラックホール形成直前の粒子数組成比 (参考文献 [11] より)。

例として、中性子星やブラックホール生成過程でのハイペロン混合について議論します。 Λ -原子核のポテンシャル ($V_\Lambda \simeq -30$ MeV) に加えて他のハイペロン (Σ, Ξ) と原子核間のポテンシャルの深さの理解が進んできたのは最近のことです。 Ξ 粒子についてはツイン・ハイパー核生成時の Ξ 原子の束縛エネルギーの推定、および (K^-, K^+) 反応スペクトルの分析 [12] から、以前の conjecture ($V_\Xi \sim -(24 - 30)$ MeV) よりも浅い ($V_\Xi \sim -(12 - 15)$ MeV) ことが分かってきました。 Σ 粒子についても、核内での Σ^- 生成 (π^-, K^+) 反応スペクトルから、以前の conjecture ($V_\Sigma \sim -30$ MeV) と比べて斥力的 ($V_\Sigma \sim +(10 - 30)$ MeV) であることが了解されつつあります [13]。中性子星中での粒子組成は、引力的なポテンシャル (EOSY(SM)) では最も軽い負電荷バリオンの Σ^- が Λ より低い密度で現れますが、斥力的 (EOSY) であれば高密度で Σ^- の代わりに Ξ^- が比較的低い密度で現れます [10]。ブラックホール形成時にも、ホライズン形成の直前には中心付近で $\rho_B \sim (3 - 4)\rho_0$ もの高密度に達し、ハイペロンが 20% 近くの割合を占めるようになります [11]。

ここで示した結果は、ある一組のパラメータを用いた RMF での結果です。この時点では $\rho_B \simeq \rho_0$ 付近の対称核物質におけるハイペロン・ポテンシャルを fit していますが、この決め方は一意ではなく、カイラル対称性をとりいれた RMF [14] でもありません。J-PARC での研究で、発見と系統的研究を通じて、高密度物質を含む様々な系に適用可能な「クォーク・ハドロン多体系の密度汎関数」を作り上げること (Dense QCD [15]) は魅力的な目標ではないでしょうか？

3 Physics at Hadron Hall on the Day-1

3.1 ハイパー核物理

J-PARC の第 I 期で大きな成果が期待されている分野としてハイパー核物理があります。J-PARC の大きな目標は、中性子数・陽子数で通常表記される核図表にストレンジネスの軸を付け加えた 3 次元の「ハイパー核図表」を広げることです。前節で述べたように、中性子星の中ではストレンジクォークを含むハドロン (あるいはストレンジクォークを含む超電導状態) が混在していると考えられており、核図表を 3 次元化することによって、通常の原子核は多ストレンジ核 (strangelet) を通って中性子星へと連続的につながっているかもしれません [16]。こうした多ストレンジ系の可能性を追求するための出発点は $S = -2$ の原子核、すなわち Ξ ハイパー核とダブル Λ ハイパー核の探索です。

3.1.1 Ξ ハイパー核

Ξ 核は (K^-, K^+) 反応で最初に作られる原子核であり、多ストレンジ系の入り口です。 Ξ^- 粒子は中性子星中で最も低密度で現れる負電荷バリオンですが、 ΞN 相互作用は模型依存性が大きく、ハイペロンの発現の順序や密度はまだ未確定です。J-PARC E05 実験 [1] では $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応によって Ξ 核 ($^{12}_{\Xi}\text{Be}$) を生成・観測することを目的としており、Day-1 実験として採択されています。また J-PARC E03 実験 [2] では Ξ^- 原子からの X 線を観測し、原子核表面付近での Ξ -核ポテンシャルを探ることを目的としています。これらの実験により、原子核の表面から内側までの Ξ -核ポテンシャルがこれまでよりもずっと正確に定められるでしょう。

これまでも Ξ の束縛エネルギー領域での (K^-, K^+) 反応分光は行われていましたが、分解能が低い ($\Delta E \sim 12$ MeV) ため束縛状態のピークを同定するには至っていません。J-PARC では高分解能 ($\Delta E \simeq (1 - 3)$ MeV) の反応分光が可能であり、Fig. 5 に示すように、少なくともポテンシャル模型の範囲内では Ξ 核をピークとして観測することが可能と期待されます。より微視的な研究も進んでおり、 $U_{\Xi} \simeq -14$ MeV のポテンシャルを導く ΞN 相互作用から作った g-matrix を用いた Shell 模型計算 [18]、AMD 計算 [19] 等が行われています。生成スペクトルの絶対値や強度の分散の仕方等に模型依存性がありますが、 $\Lambda\Lambda$ への転換幅の見積り (1 ~ 2 MeV) [20] が正しければ、 Ξ 核束縛状態ピークは観測可能です。Day-1 実験を心して待ちましょう。

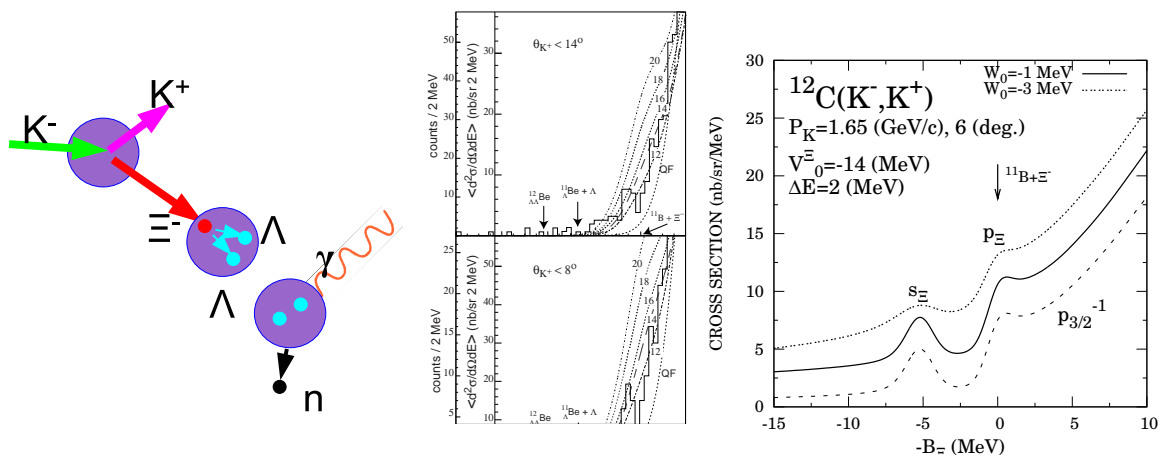


Figure 5: (左) (K^-, K^+) 反応ダブル Λ ハイパー核 γ 分光への道のり。(中) BNL-AGS-E885 実験での (K^-, K^+) スペクトル (参考文献 [12] より)。(右) J-PARC で期待される (K^-, K^+) スペクトル (参考文献 [17] より)。

3.1.2 ダブル Λ ハイパー核

ダブル Λ 核は強い相互作用に対して安定な(つまり弱崩壊する) $S = -2$ の系であり、束縛状態であれば(かつ十分な統計があれば) γ 線分光も可能です。これまでに見付かっているダブル Λ 核生成イベントは5例程度ありますが、解釈がユニークで質量がはっきり決まっているものは、Nagara event [21] で観測された ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ しかありません。J-PARC E07 実験 [3] では、Emulsion と Counter を組み合わせた実験を行うことにより 100 個のダブル Λ ハイパー核を観測する予定です。

Λ は中性子星で最大の組成比率をもつハイペロンであり、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用は極めて重要ですが、現時点では ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ から得られたボンドエネルギー $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20^{+0.18}_{-0.11}$ MeV のみが頼りです。この値を再現する $\Lambda\Lambda$ 相互作用を用いた少数系計算 [22] では $A \leq 10$ の範囲内で $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ は増えていく傾向が見えます。一方で $\Lambda\Lambda$ 相互作用が短距離的であれば、 $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \propto \int d^3r \rho_{\Lambda}^{(1)}(\mathbf{r}) \rho_{\Lambda}^{(2)}(\mathbf{r}) \propto 1/A$ という形で定性的には表せるはずであり、原子核の質量数に反比例することが期待されます。つまり、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用の性質—短距離的・直接的なものなのか、あるいは ΞN のチャンネルとの結合からの寄与が大きいために核依存性が大きいのか—は現時点ではまだ判明していないと言わざるを得ません。「発見から系統性へ」をキーワードとして、複数種のダブル Λ ハイパー核の発見が強く求められます。

3.2 中間子核物理

中間子は「核力を担う」役割とともに、近年の原子核・ハドロン物理の発展の中で「構成粒子」としての重要性も認識されてきました。 p -wave π 凝縮 [23] から始まった中間子凝縮の議論は、K 凝縮 [24] へとつながり、深く束縛された π 中間子原子、深く束縛された K 中間子核、他の様々な中間子を含むエキゾチック核等の研究に大きな動機付けを与えました。さらに、中間子は「QCD 真空の変化」を測る probe としても利用されています。中間子核の一つの面白さは「粒子数が変化する量子系」であることです。一般に中間子は同じ量子数をもつ粒子-空孔状態と結合するため、ループから生成されるポテンシャルの強いエネルギー依存性が重要です。

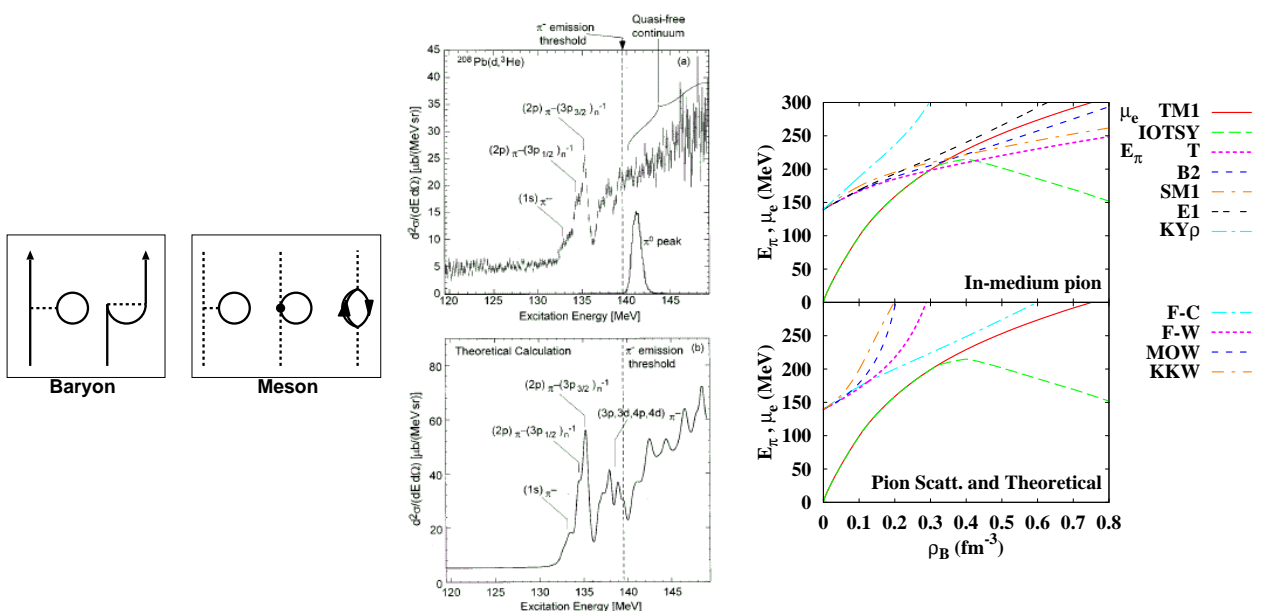


Figure 6: (左) 核物質中のバリオン、中間子のポテンシャルの起源。(中) π 原子生成スペクトル(参考文献 [25] より)。(右) 中性子星物質における π 粒子エネルギー (E_π) と電子化学ポテンシャル (μ_e) の比較(参考文献 [26] より)。

中間子核・原子の情報から高密度物質での中間子凝縮の存否の情報かどのように得られるか、 s -wave π 凝縮を例にとって述べてみます¹。中性子星物質では、粒子の化学ポテンシャルはバリオン数と電荷で決まるため、 $E_{\pi^-} \geq \mu_{\pi^-} = \mu_e$ となれば π^- の Bose-Einstein 凝縮 (s -wave π 凝縮) が起こります。 π -核の s -wave ポテンシャルの理解は、近年の π 原子の研究で大きく進展しました。Pb 標的、Sn アイソトープ標的の (d, ^3He) 反応データから π 原子の束縛エネルギー・生成スペクトルが得られており、理論の予言と見事に対応しています [25]。現在では、これらの精密なデータを説明する上で、核内での f_π の変化や b_1 パラメータの密度依存性まで必要であることが分かっており、カイラル動力学の絶好の試金石と言えるでしょう。さて、中性子星物質中の π 粒子のエネルギーと RMF での μ_e を比較すると (Fig. 6(右))、Pb 標的の pionic atom データを説明するポテンシャル (T, B2, SM1, E1) では、 $E_\pi \sim \mu_e$ ですが、Sn アイソトープ標的データを再現するために導入された b_1 の密度依存性を考慮した場合には $E_\pi > \mu_e$ 、つまり、 π^- 核ポテンシャルにおいて原子核のアイソスピン依存性を最新のデータに基づいて取り入れてやっと s -wave π 凝縮が起こらないことが明らかになったのです。Dense QCD の物理において発見から系統的研究を通じて知見を積み重ねることの重要性を示している例といえます。

3.2.1 深く束縛した K 中間子原子核

Akaishi, Yamazaki が「大きな束縛のために深く束縛した狭い幅の K^- 中間子核が観測できる可能性がある」 [27] と指摘して以来、深く束縛した K 中間子原子核は大きな注目を集めてきました。 $\bar{K}N$ 相互作用は引力的に働く Tomozawa-Weinberg 項、 KN sigma term 等を含みます。真空中ではしきい値より下の s -波共鳴 $\Lambda(1405)$ と強く結合し、これと直交するように散乱波動関数が節をもつため、あたかも斥力が働いているように見えますが、核物質中では本来の強い引力が現れる可能性があります。どの程度の引力が現れるのでしょうか？これまでの研究では、Pauli 原理のみ ($V_{\bar{K}} \sim -80$ MeV [28])、 $\bar{K}N$ 散乱振幅の精密化と \bar{K} ポテンシャル self-consistent な取扱い ($V_{\bar{K}} \sim -140$ MeV) [29]、カイラル摂動の leading term による π, K の self-energy と核子相関 ($V_{\bar{K}} \sim -(40 - 60)$ MeV) [30]、RMF と現象論的なポテンシャルの組み合わせ ($V_{\bar{K}} \sim -180$ MeV) [31]、 $\Lambda(1405)$ と K^- 原子のエネルギーシフトを fit する現象論的なポテンシャルと原子核密度の変化 ($V_{\bar{K}} \sim -200$ MeV) [27] 等、相互作用と多体問題の取扱いによって予言が大きく異なります。結果として出てくる深く束縛された K 核の束縛エネルギーと幅にも大きな不定性があります。これは実験で明らかにするしかありません。

実験的には、 $^{12}\text{C}(K^-, n)$ スペクトルで見られる束縛エネルギー領域で見られるスペクトルの速い立上り [32, 33] や、DAΦNE の FINUDA 実験で見えている K^-pp 束縛状態と思われる Λ_p 不変質量スペクトルの盛り上がり [34] は、 K^- -核のポテンシャルが十分に強い引力であることを示唆しているように見えます。しかしながら深く束縛した \bar{K} 核であることを明確に示す実験データはまだありません。J-PARC E15 実験 [4] では $^3\text{He}(K^-, n)$ 反応によって K^-pp 束縛状態の観測が行われる予定であり、Day-1 実験として採択されています。この実験では、入射チャンネルでの反応分光 [32] と終状態の崩壊チャンネル不変質量分光 [34, 35] という相補的な測定をともに行う予定であり、これまでよりも質の高い測定が行われるでしょう。

実験の進展と並行して、理論的開発ももちろん必要です。中間子・バリオン多体系を正確に記述するには、核子間相関・強くエネルギーに依存する中間子の self-energy・チャンネル結合を全て考慮する必要があります。最近の研究では、エネルギーに依存する中間子・バリオン相互作用を取り入れた結合チャンネルの 3 体問題が解けるという進展がありました [36]。実験と直接比較するには、さらに中間子の多核子吸収、終状態相互作用、構造の情報を取り込んだ反応模型等、多くの面での理論的開発が必要です。今後の発展が期待されます。

¹J-PARC での π 中間子原子観測は予定されていませんが、中間子核・原子の典型的な成功例として、またどこまで調べるのが高密度物質の性質を調べる上で必要とされるかに着目したいと思います。

3.2.2 中間子スペクトル関数の媒質効果

QCD により深くかかわる課題として、中間子の媒質中での質量変化の研究があります。カイラル対称性は QCD の基本的な対称性であり、真空が自発的に対称性を破ることにより構成子クォーク、およびハドロンの質量が生み出されます。カイラル凝縮は核物質内で減少していると考えられており、媒質中ではハドロンの質量が変化することが示唆されています [37, 38]。こうした予言を受けて、高エネルギー重イオン衝突 [39]、陽子-核反応 [40] 等において中間子のスペクトル関数の測定が行われてきました。現時点までに、レプトン対・中間子対の不変質量分布から、核内でベクトル中間子のスペクトル関数が変化していることは広く認められるところとなりました。特に KEK-E325 実験では「大きな標的核において低運動量のベクトル中間子のスペクトル関数」が最も大きな影響を受けることを明らかにしています。しかしながら、その解釈は一意ではありません。問題は大きく分けて、「質量が減少しているのか、幅が広がっているのか?」、「質量が減少しているとして、QCD 真空の変化と解釈できるのか?」の2つです。核内で中間子は一般的に核子との散乱により幅が広がると考えられます。また中間子が結合するバリオン共鳴が核内でポテンシャルを受ける場合には中間子のスペクトル関数も変化しますが、これは直接的には QCD 真空の変化によるとは考えられていません。

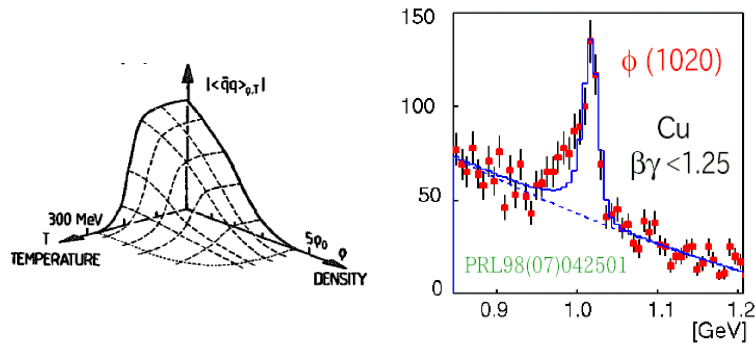


Figure 7: (左) 有限温度・密度におけるカイラル凝縮 (参考文献 [38] より)。(右) KEK-E325 実験で測定された ϕ 中間子のスペクトル関数 (参考文献 [40] より)。

問題を明らかにする上では、まずデータの質を上げることが必要です。J-PARC E16 実験 [5] では、KEK-E325 実験と比較して 100 倍以上の統計を貯めたデータが測定される予定であり、「スペクトル関数の形」は精度よく決められるでしょう。ただし理論的解釈の不定性を取り除くには、統計を上げることに加えて、系統的測定 (標的、運動量領域、中間子の種類) を行うことは非常に大切です。例えば、様々な中間子のスペクトル関数を測定し、かつ traditional な効果を取り除いた上で、Brown-Rho scaling

$$M_N^*/M_N = M_\sigma^*/M_\sigma = M_\rho^*/M_\rho = M_\omega^*/M_\omega = f_\pi^*/f_\pi$$

が成り立っていることが示されれば、QCD 真空の効果であることに大きな説得力を持つことになるでしょう。また、J-PARC 研究会において出されたアイデアの一つは、「カイラルパートナーである ρ 中間子 ($\rho \rightarrow e^+e^-$) と a_1 中間子 ($a_1(1^+) \rightarrow e^-\bar{\nu}$) が近づくことを確かめよ (M. Harada)」というものです²。実験の遂行とともに、理論・実験の協力とアイデアが求められています。

3.3 エキゾチックハドロン

2003 年に大阪で行われた PANIC において Penta Quark 状態の発見 [41] が発表されて以来、エキゾチックハドロンはハドロン物理学の大きな潮流を生み出しました。Penta Quark ($\Theta^+(1530) = uud\bar{s}$)

²測定はきわめて困難です。

以外にも $Z(4430)(= c\bar{c}u\bar{d})$ 等の Tetra Quark 状態が数多く観測されており [42]、今や4つ以上のクォーク・反クォークを含むエキゾチックハドロンの存在は広く認められています。 $\Theta^+(1530)$ については、J-Lab で最初の観測とは別の崩壊チャネルにおいて観測できなかったことが報告されて以来 [43]、その存在を疑問視する声も増えています。しかしながら LEPS による観測結果は、当初のデータよりも明確に Θ^+ の存在を示しており、ピークは消えそうにありません。さらに KEK-E522 実験 $p(\pi^-, K^-)X$ で観測された missing mass スペクトルには、理論家には「ピーク」と見える構造があり、 Θ^+ はあると信じて理論・実験研究を進める価値が十分にあります。J-PARC E19 実験 [6] では $p(\pi^-, K^-)\Theta^+$ 反応において K^- 粒子を SKS にて観測し、統計 (100 倍)・分解能 (5 倍) とともに KEK-E522 実験を上回る観測が行われる予定であり、Day-1 実験として採択されています。

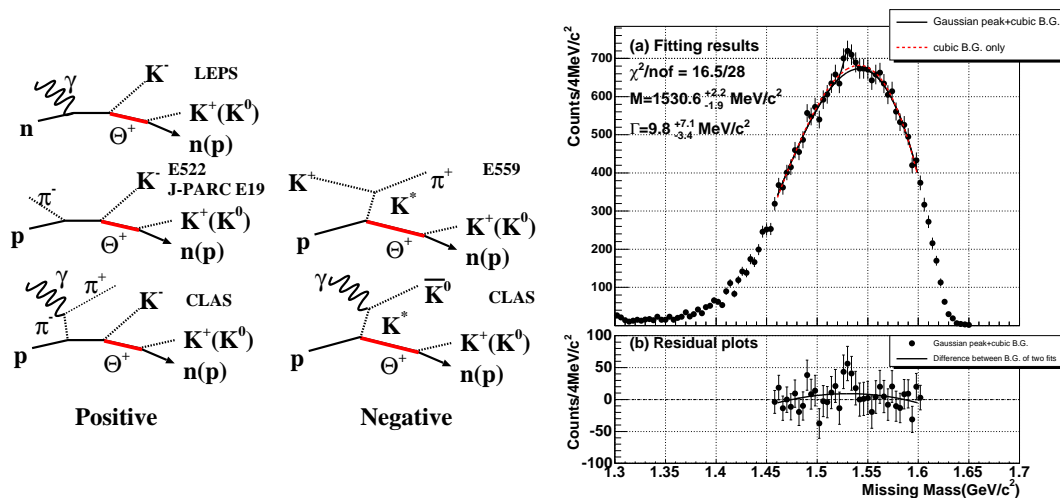


Figure 8: (左) Θ^+ 生成反応。(右) E522 実験 ($\pi^-p \rightarrow K^-X$) での missing mass スペクトル (参考文献 [44] より)。

一方で、「理論的に質量と幅の説明が困難である」という当初からの問題はいまだに解決されていません。Chiral Soliton 模型では軽い質量と狭い幅を予言しましたが、量子数の $J^\pi = 1/2^+$ は格子 QCD の結果からは非常に否定的です。反応機構、格子 QCD での共鳴の取扱い、狭い幅を説明する角運動量効果、 $7q(\pi KN)$ 状態の可能性、... と考えるべき事項は数多くあります。個人的には、演算子・境界条件・格子サイズの全ての面で過去の研究を越える格子 QCD 計算を、実験が始まる前に開始すべきではないかと考えます。

4 まとめ

ここでは J-PARC で展開される物理の内容を、高密度物質の性質との関係に着目して概観しました。クォーク多体系の物理には、多ストレンジネス原子核、エキゾチックハドロンの中間子原子核等、多彩な状態が存在していると期待されますが、これらの多くは未発見であり、J-PARC での多くの発見が期待されます。こうした多彩なクォーク・ハドロンの多体系を QCD から出発して記述することは原子核・ハドロンの物理学の最大の目標の一つです。この目標に向かって正しく理解を進めるには、実験・理論の手法を開発して、「クォーク・グルーオン」、「ハドロンの共鳴ハドロンの」、「ハドロンの多体系」について体系的な研究を展開する必要があります。理論的には中間子核を記述するために使われている Chiral Dynamics の手法とバリオン多体系を解く上で発展してきた粒子相関を統合した理論模型が必要と思われます。多彩なクォーク・ハドロンの多体系の研究は高密度物質の理解にとって決定的です。ハイペロンや中間子を含む原子核の研究のみでなく、ベクトル中間子質量への媒質効果は核内で

斥力を変化させている可能性があり、エキゾチックハドロンの研究はクォーク間の有効相互作用やカラー超電導状態で凝縮しているダイクォークの性質を議論する上で貴重な情報を与えるでしょう。

この稿では J-PARC で提案されている研究の一部しか紹介できませんでした。J-PARC の実験の多彩さを示すものでもあり、ご了承願います。

This work is supported in part by the Ministry of Education, Science, Sports and Culture, Grant-in-Aid for Scientific Research under the grant numbers, 1707005, 19540252, and the Yukawa International Program for Quark-hadron Sciences (YIPQS).

References

- [1] J-PARC Proposal P05: Spectroscopic Study of Ξ -Hypernucleus, ${}^{12}_{\Xi}\text{Be}$, via the ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ Reaction (Spokesperson: T. Nagae).
- [2] J-PARC Proposal P03: Measurement of X rays from Ξ^- Atom (Spokesperson: K. Tanida).
- [3] J-PARC Proposal P07: Systematic Study of Double Strangeness System with an Emulsion-Counter Hybrid Method (K. Imai, K. Nakazawa, H. Tamura).
- [4] J-PARC Proposal P15: A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight ${}^3\text{He}(K^-, n)$ reaction (Spokespersons: M. Iwasaki, T. Nagae).
- [5] J-PARC Proposal P16: Electron pair spectrometer at the J-PARC 50-GeV PS to explore the chiral symmetry in QCD (Spokesperson: S. Yokkaichi).
- [6] J-PARC Proposal P19: High-resolution Search for Θ^+ Pentaquark in $\pi^- p \rightarrow K^- X$ Reactions (Spokesperson: M. Naruki).
- [7] L. McLerran and R. D. Pisarski, Nucl. Phys. A **796** (2007) 83 [arXiv:0706.2191 [hep-ph]]. K. Miura and A. Ohnishi, arXiv:0806.3357 [nucl-th].
- [8] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 022001; H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, arXiv:0806.1094 [nucl-th]; S. C. Pieper et al., Phys. Rev. C **66** (2002) 044310; E. Hiyama, Y. Kino and M. Kamimura, Prog. Part. Nucl. Phys. **51** (2003) 223.
- [9] F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. **54** (2005) 193 [arXiv:astro-ph/0407155].
- [10] C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi and S. Yamada, J. Phys. G **35** (2008) 085201 [arXiv:0802.2318 [nucl-th]].
- [11] K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada, H. Suzuki, submitted to ApJ Letters.
- [12] P. Khaustov *et al.* [AGS E885 Collaboration], Phys. Rev. C **61** (2000) 054603.
- [13] H. Noumi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 072301 [Erratum-ibid. **90** (2003) 049902]; P. K. Saha et. al., Phys. Rev. C **70** (2004), 044613. T. Harada and Y. Hirabayashi, Nucl. Phys. A **759** (2005) 143; M. Kohno et al., Phys. Rev. C **74** (2006) 064613; H. Maekawa, K. Tsubakihara and A. Ohnishi, Eur. Phys. J. A **33** (2007) 269.
- [14] K. Tsubakihara, H. Maekawa and A. Ohnishi, Eur. Phys. J. A **33** (2007) 295; K. Tsubakihara and A. Ohnishi, Prog. Theor. Phys. **117** (2007) 903.
- [15] “Dense QCD” というキーワードは、私の記憶が正しければ 2002 年 5 月に開かれた KEK における 50 GeV LoI workshop で永江さん (KEK, 現在京大) が提案したものです。
- [16] E. Farhi and R. Jaffe, Phys. Rev. D **30** (1984), 2379 ; A. Bodmer, Phys. Rev. D **4** (1971), 1601; E. Witten, Phys. Rev. D **30** (1984), 272.

- [17] H. Maekawa, K. Tsubakihara, H. Matsumiya and A. Ohnishi, arXiv:0704.3929 [nucl-th].
- [18] S. Sugimoto, T. Motoba, Y. Yamamoto, E. Hiyama, 特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会 2007.
- [19] H. Matsumiya, K. Tsubakihara, M. Kimura, A. Dote, A. Ohnishi, in preparation.
- [20] K. Ikeda, T. Fukuda, T. Motoba, M. Takahashi and Y. Yamamoto, *Prog. Theor. Phys.* **91** (1994) 747.
- [21] H. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001), 212502.
- [22] E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, Y. Yamamoto, *Phys. Rev. C* **66** (2002), 024007.
- [23] T. Kunihiro, T. Takatsuka, R. Tamagaki and T. Tatsumi, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **112** (1993), 123, and references therein.
- [24] H. Fujii, T. Maruyama, T. Muto and T. Tatsumi, *Nucl. Phys. A* **597** (1996) 645, and references therein.
- [25] K. Suzuki *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 072302; K. Itahashi *et al.*, *Phys. Rev. C* **62** (2000) 025202; S. Hirenzaki, H. Toki and T. Yamazaki, *Phys. Rev. C* **44** (1991) 2472.
- [26] A. Ohnishi, D. Jido, T. Sekihara, K. Tsubakihara, in preparation.
- [27] Y. Akaishi and T. Yamazaki, *Phys. Rev. C* **65** (2002) 044005; A. Dote, H. Horiuchi, Y. Akaishi and T. Yamazaki, *Phys. Rev. C* **70** (2004) 044313 [arXiv:nucl-th/0309062].
- [28] V. Koch, *Phys. Lett. B* **337** (1994) 7; T. Waas, N. Kaiser and W. Weise, *Phys. Lett. B* **365** (1996) 12; A. Ohnishi, Y. Nara and V. Koch, *Phys. Rev. C* **56** (1997) 2767.
- [29] M. Lutz, *Phys. Lett. B* **426** (1998) 12.
- [30] A. Ramos and E. Oset, *Nucl. Phys. A* **671** (2000) 481.
- [31] E. Friedman, A. Gal and C. J. Batty, *Nucl. Phys. A* **579** (1994) 518.
- [32] T. Kishimoto *et al.*, *Prog. Theor. Phys.* **118** (2007) 181;
- [33] J. Yamagata, H. Nagahiro and S. Hirenzaki, *Phys. Rev. C* **74** (2006) 014604.
- [34] M. Agnello *et al.* [FINUDA Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 212303.
- [35] T. Suzuki *et al.* [KEK-PS E549 Collaboration], *Phys. Rev. C* **76** (2007) 068202.
- [36] Y. Ikeda and T. Sato, *Phys. Rev. C* **76** (2007) 035203.
- [37] G. E. Brown and M. Rho, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991), 2720; T. Hatsuda and T. Kunihiro, *Phys. Rept.* **247** (1994), 221; T. Hatsuda and S. H. Lee, *Phys. Rev. C* **46** (1992), 34.
- [38] W. Weise, *Nucl. Phys. A* **553** (1993) 59c; M. Lutz *et al.*, *Nucl. Phys. A* **542** (1992) 521.
- [39] G. Agakishiev *et al.* [CERES Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995), 1272; S. Afanasiev *et al.* [PHENIX Collaboration], arXiv:0706.3034 [nucl-ex].
- [40] R. Muto *et al.* [KEK-PS-E325 Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 042501.
- [41] T. Nakano *et al.* [LEPS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 012002.
- [42] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 142001.
- [43] V. Kubarovsky *et al.* [CLAS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 032001 [Erratum-ibid. **92** (2004) 049902]; M. Battaglieri *et al.* [CLAS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 042001.
- [44] K. Miwa *et al.* [KEK-PS E522 Collaboration], *Phys. Lett. B* **635** (2006) 72.

Table 1: J-PARC 原子核素粒子実験施設での実験プロポーザル

- ハイパー核
 - P03: Measurement of X rays from Ξ^- Atom (K. Tanida)
 - P05: Spectroscopic Study of Ξ -Hypernucleus, ${}_{\Xi}^{12}\text{Be}$, via the ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ Reaction (T. Nagae)
 - P07: Systematic Study of Double Strangeness System with an Emulsion-Counter Hybrid Method (K. Imai, K. Nakazawa, H. Tamura)
 - P10: Production of Neutron-Rich Λ -Hypernuclei with the Double Charge-Exchange Reactions (A. Sakaguchi)
 - P13: Gamma-ray spectroscopy of light hypernuclei (H. Tamura)
 - P18: Coincidence Measurement of the Weak Decay of ${}_{\Lambda}^{12}\text{C}$ and the three-body weak interaction process (H. Bhang, H. Outa, H. Park)
 - P22: Exclusive Study on the ΛN Weak Interaction in $A = 4$ Λ -Hypernuclei (A. Sakaguchi)
 - LoI: Study of Σ - N interaction using light Σ -nuclear system (H. Tamura)
 - LoI: Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei at K1.1 (H. Tamura)
 - LoI: A Hyperon-Nucleon Scattering Experiment using a SCIFI-MPPC System (K. Miwa)
- 中間子核
 - P08: Pion double charge exchange on oxygen at J-PARC (A.P.Krutenkova)
 - P15: A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight ${}^3\text{He}(K^-, n)$ reaction (M.Iwasaki, T. Nagae)
 - P16: Electron pair spectrometer at the J-PARC 50-GeV PS to explore the chiral symmetry in QCD (S. Yokkaichi)
 - P17: Precision spectroscopy of Kaonic Helium 3 3d -j 2p X-rays (R.S. Hayano)
 - LoI: Combined measurements of nuclear ω bound state and ω mass modification in $p(\pi, n)\omega$ reaction (K. Ozawa)
 - LoI: A new approach to study the in-medium $\phi(1020)$ -meson mass (M. Iwasaki)
 - LoI: Spectroscopy of η Mesic Nuclei by (π^-, n) Reaction at Recoilless Kinematics (K. Itahashi)
- エキゾチックハドロン
 - P19: High-resolution Search for Θ^+ Pentaquark in $\pi^- p \rightarrow K^- X$ Reactions (M. Naruki)
 - P09-LoI: Letter of Intent for Study of Exotic Hadrons with $S = +1$ and Rare Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ with Low-momentum Kaon Beam at J-PARC (T. Nakano)
 - LoI: Search for Θ^+ hypernuclei using (K^+, p) reaction (K. Tanida)
- 構造関数
 - P04: Measurement of High-Mass Dimuon Production at the 50-GeV Proton Synchrotron (J.C. Peng, S. Sawada)
 - P12-LoI: Letter of Intent to J-PARC PAC for Study of Parton Distribution Function of Mesons vis Drell-Yan Process at J-PARC at High-p beamline (S. Choi)
 - P23: Analyzing power A_n and A_{nn} in 30-50 GeV very-high- P_{\perp}^2 proton-proton elastic scattering (A.D. Krisch)
 - P24: Polarized Proton Acceleration at J-PARC (Y. Goto, H. Sato)
- 対称性
 - P06: Measurement of T-violating Transverse Muon Polarization in $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ Decays (J. Imazato)
 - P14: Proposal for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ Experiment at J-PARC (T. Yamanaka)
 - P21: An Experimental Search for lepton Flavor Violating $\mu^- - e^-$ Conversion at Sensitivity of 10^{-16} with a Slow-Extracted Bunched Beam (Y. Kuno)
- ニュートリノ
 - P11: Tokai-to-Kamioka (T2K) Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment Proposal (K. Nishikawa)
 - LoI: A letter of intent to extend T2K with a detector 2 km away from the JPARC neutrino source (T. Kajita)