

量子クラスターで読み解く物質の階層構造

Clustering as a window on the hierarchical structure of quantum systems

領域ニュース

vol.8 2020/5/29 発行



計画研究 B01 班「ストレンジハドロンクラスターで探る物質の階層構造」

研究代表者 田村 裕和 (東北大学理学研究科 教授)

原子核という階層は、なぜできたのだろうか。陽子・中性子（核子）を含むハドロンと、核子の集合体である原子核とは、いずれも低エネルギーの強い相互作用が形作るクォーク多体系であり、核子という特定のハドロンがゆるく束縛して高次構造を作ったものが原子核である。原子核は独特の階層を形成しており、それはハドロン階層からよく“分離”しているように見える。低エネルギーの原子核の現象を記述するには、核子の内部構造を知る必要はなく、点状の核子が、複雑だが現象論的にはよく分かっている核力のもとで相互作用するという描像で、原子核の様々な性質を説明できる。なぜ強い相互作用が作るクォーク束縛系は、原子核という明確な高次構造をもつのだろうか。我々の研究班では、通常原子核を形作る u, d クォークに加えて、原子核に s （ストレンジ）クォークを導入して何が起こるかを調べることで、こうした疑問に答えようと考えている。

我々の研究テーマは以下の2つである。それぞれについて、研究の方針と実験の現状・計画を紹介したい。

(1) 核力（バリオン間力）の起源は何か

原子核という階層が生まれた理由を理解するには、核子（バリオン）から原子核という高次構造を作る役割を担っている核力（バリオン間力）の起源と仕組みを解明する必要がある。バリオン間力は、カラーが白色になって閉じ込められたバリオンとバリオンとの間に働く強い相互作用であり、バリオン内部でクォーク間にはたらくグルーオン交換の強い相互作用に比べると圧倒的に弱い。図1にバリオン間相互作用ポテンシャルの例を模式的に示す。距離の離れたバリオン間では、グルーオンは真空中の qq^{bar} 凝縮によってすぐ遮蔽されるため交換できず、カラー白色の中間子の形でクォークを交換することで力がはたらく。この描像は、遠距離 ($>1.5 \text{ fm}$) ではパイ中間子の交換（湯川の中間子論）として確立している。この考え方を拡張して、中距離 ($\sim 1 \text{ fm}$) 部分を複数のパイ中間子や様々な重い中間子の交換も取り入れて記述するモデルが提案されているが、中間子の種類やパラメータの取り方に不定性が大きく、その明確な処方箋は確立していない。さらにバリオンが重なり合う短距離 ($< 1 \text{ fm}$) では、白色のバリオン2個の間の力としてでなく、6個のクォーク間の力を直接扱う必要がある。クォーククラスターモデルでは、バリオン間の短距離斥力を構成子クォーク間のパウリ排他律の効果とカラー磁気相互作用によって説明しているが、この理論モデルでは、 s クォークを導入して核力をバリオン間力に拡張すると、チャンネルごとに特徴的な大きな違いが現れると予想されている。そのため、ハイペロン (Λ, Σ, Ξ) と核子 (N)、ハイペロンとハイペロンの相互作用を実験で調べ、理論モデルと比較することで、物理的描像に根ざしたバリオン間力の理解を進めることができる。さらに、最近発展した格子 QCD シミュレーションにより、様々なバリオン間力のポテンシャルが QCD から直接計算できるようになってきたが、これを検証するには核力以外のバリオン間力の実験データが不可欠である。

陽子・陽子、中性子・陽子の散乱実験から核力が詳しく調べられたのと同様に、ハイペロンと陽

子の散乱実験によってその相互作用を調べることが望ましいが、ハイペロンは寿命が短い散乱実験が極めて難しかった。 Λ については、核子との相互作用が引力で Λ ハイパー核を形成するので、そのエネルギーや構造から ΛN 相互作用の情報が得られてきた。しかし、 Σ については、核子との相互作用が斥力的なためハイパー核をほとんど形成せず、 ΣN 相互作用の情報は散乱実験から得るしかない。そこで我々は、 Σ 陽子散乱実験をJ-PARCで行い、 ΣN 相互作用の初めての明確なデータを得ることを目指している。特に、図1に示すように、 Σ^+ と陽子のスピン1の状態には、クォーク間のパウリ効果によって強い斥力芯があることがクォークモデルで予想されており、その検証は核力の斥力芯の起源の理解につながる。また、 Σ 陽子散乱データを合わせて測定することで、 s クォークを含む形で拡張した中間子交換描像にもとづくバリオン間力の理論がどこまで正しいのかも調べることができる。J-PARC E40 実験では、図2に示すセットアップにおいて、液体水素標的中で $\pi^\pm p \rightarrow \Sigma^\pm K^+$ 反応により運動量 0.4-0.8 GeV/c の Σ^\pm を大量に生成し、この Σ^\pm が標的中の別の陽子と散乱する事象を測定する。標的回りに東北大で開発したCATCHとよばれる検出器を設置し、散乱した陽子の軌跡とエネルギーを測定し、運動学からバックグラウンドと散乱事象を区別する。この方式では、散乱の画像情報を用いていた従来の実験に比べて、約100倍の統計量を得ることができる。データ収集はK1.8ラインにおいて2019年から始まっており、2020年夏前に終了する。すでに、 $\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^- p$ (弾性散乱)、 $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ (非弾性散乱)について十分なデータを収集し、解析を進めている。[担当：三輪(東北大)]

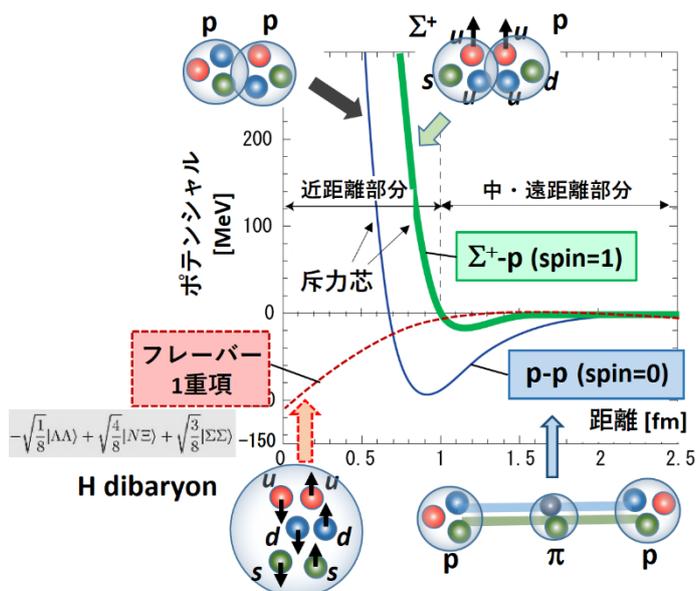


図1: 陽子-陽子、 Σ^+ -陽子、フレーバー1重項バリオン-バリオンのポテンシャルの模式図(実験および格子QCD計算をもとに描いた)。陽子-陽子と比べて Σ^+ -陽子(スピン1)では斥力芯が非常に強く、フレーバー1重項では斥力芯の代わりに引力芯が現れHダイバリオンが予想される。

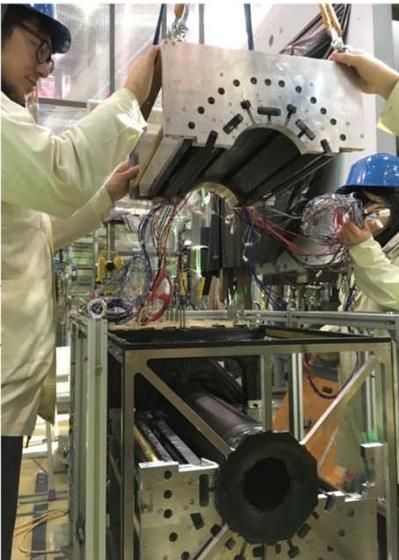
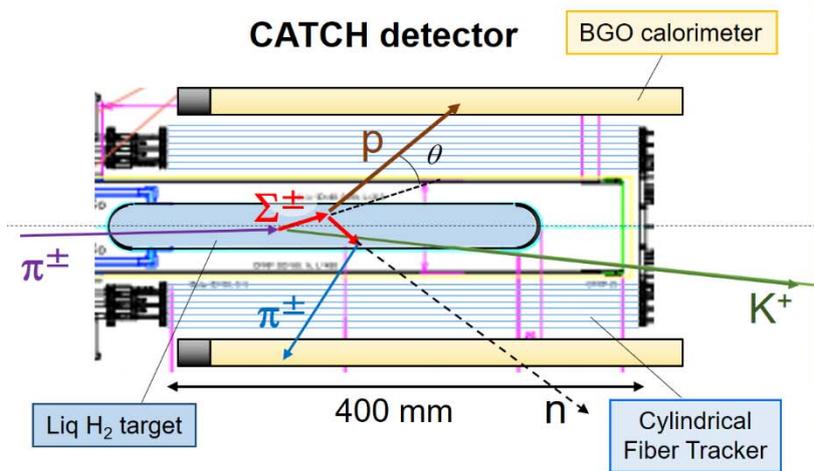


図2: Σ 陽子散乱実験(J-PARC E40)の標的まわりのセットアップ。液体水素標的で(π^\pm, K^+)反応で作られた Σ^\pm を標的中の別の陽子と散乱させ、散乱陽子や Σ の崩壊粒子の飛跡とエネルギーをCATCH検出器で測定する。写真は、CATCHの組み立て風景。

Ξ N間の相互作用に関しては、散乱実験はおろか Ξ ハイパー核データもほぼ皆無であり、最近まで引力が斥力かすら確立していなかったが、2015年に Ξ と原子核の束縛状態のイベントが1個発見され、引力であることが分かった。そこで我々はこれに続き、 (K^-, K^+) 反応による Ξ ハイパー核の分光実験 (J-PARCE70) によって、 $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ の質量スペクトルを測定して定量的な相互作用の情報を得るとともに、 Ξ n束縛状態 (負電荷の原子核) の探索を目指している。実験は、京都大学が建設した大型磁気スペクトロメータ S-2S を J-PARC K1.8 ラインに設置して2022年から実施する予定である。[担当: 永江 (京都大)] また、これと平行して、すでに原子核乾板へのビーム照射が終了したダブルハイパー核探索実験 (J-PARC E07) の解析も進め、新たな Ξ ハイパー核と $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の事象から Ξ Nおよび $\Lambda\Lambda$ 相互作用の情報を得る努力も続けている。[担当: 仲澤 (岐阜大、公募研究) ほか]

Ξ N相互作用と関連して極めて重要なのは、Hダイバリオン探索実験である。Hダイバリオンは、 u, u, d, d, s, s の6個のクォークがスピン=0、アイソスピン=0 (フレーバー反対称1重項) に組んで安定化したバリオン数2の粒子で、 Λ 粒子2個より軽くなると言われていたものである。フレーバー1重項に組んだバリオン2個の状態 (Ξ N, $\Sigma\Sigma$, $\Lambda\Lambda$ チャンネルの一部) では、バリオン間に斥力芯の代わりに引力芯が現れ、2個のバリオンが融合してHダイバリオンになる (図1参照)。引力芯が現れるのは、クォーク間でパウリ排他律が効かずカラー磁気相互作用が強い引力になるためとされる。1980-90年代の多数の探索実験は否定的結果で終わっていたが、Hが Λ 粒子2個より重いことを想定した $H \rightarrow \Lambda\Lambda$ 崩壊を検出する実験は十分には行われていなかった。最近の格子QCDの予測では $\Lambda\Lambda$ より上の質量にHが存在することが予想されている。そこで我々はハイペロンの崩壊を測定する超伝導ヘルムホルツ磁石と飛跡検出器 (TPC) からなる Hyperon spectrometer を開発し、J-PARCで $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応と同時に放出された $\Lambda\Lambda$ の不変質量分布を測定する。実験準備は順調に進んでおり、2021年度初頭の実施を予定している。[担当: 高橋 (KEK)]

(2) 原子核の階層はハドロンの階層からよく分離しているのか?

(2-1) 原子核以外のハドロン多体系はあるのか

ハドロンの階層の上には、核子からなる原子核という階層があるが、他の階層 (サブ階層) はないだろうか? 構成要素を核子から一般のバリオンに拡張して考えると、 Λ , Ξ は核子との相互作用が引力でハイパー核を形成し、その性質は通常の原子核に似通っているため、原子核階層を拡張して考えればよい。 Σ は核子との相互作用が斥力なので、原子核のような高次構造は (特別の例外を除き) 形成しない。もし上記のHダイバリオンが、2個のバリオンの束縛状態 (原子核) ではなく、コンパクトな6クォーク状態だとすると、それは我々の知らなかった新しいサブ階層の存在を示唆する。理論的に存在が示唆されてきた、ほぼ同数の u, d, s クォークが多数集まって安定化した多クォークハドロン粒子「ストレンジレット」の存在につながる。

一方で、核子 (バリオン) の多体系である原子核やハイパー核とは異なる、ハドロンの多体系はあるだろうか。中間子2つがゆるく束縛した中間子分子は新しいサブ階層の候補であり、A02班の研究テーマとなっている。我々の研究班では、中間子とバリオン系 (原子核) が束縛したハドロン多体系を考える。

反K中間子 (K^- と K_0^{bar}) は、陽子との間に

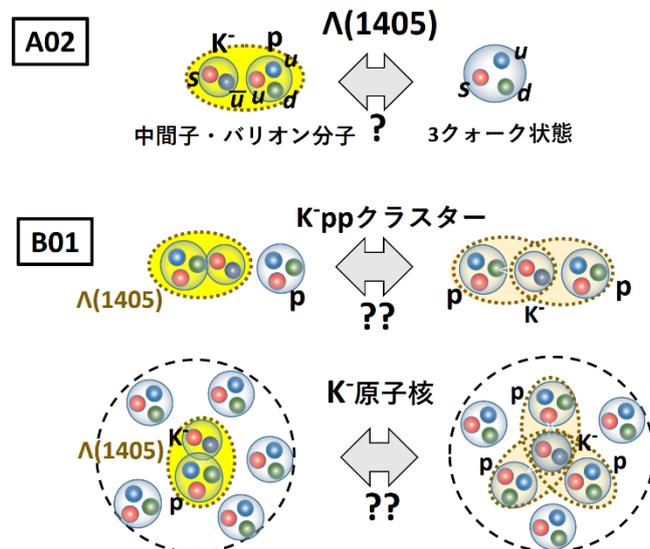


図3: K^-p , K^-pp , K^- 原子核の構造。 $\Lambda(1405)$ は、 K^-p の束縛した中間子・バリオン分子と考えられている。すると、 K^-pp や K^- 原子核では、左のように K^- が1個の陽子と結合して $\Lambda(1405)$ 原子核となっているのか、右のように K^- が複数の陽子と共有されているのか、両方の可能性がある。

強い引力を及ぼすことがわかっており、これが原子核に束縛された”K-原子核”の存在の可能性が以前から議論されている。最近、J-PARC で 40 MeV 程度の束縛エネルギーをもつ K^-pp 束縛状態と考えられる実験データが得られた。一方、J-PARC の別の実験やヨーロッパの実験では、100 MeV 程度の深い束縛エネルギーをもつ K^-pp 状態の存在を示唆するデータも得られている。 $\Lambda(1405)$ は束縛エネルギー約 25MeV の K^-p の束縛状態と解釈されているが（図 3 上、その研究は A02 班の課題）、100 MeV もの深い状態は、図 3 中段左のように $\Lambda(1405)$ と陽子との束縛状態と解釈すべきなのかも知れない。そこで我々は、 K^-pp 状態や K-原子核の束縛状態を生成してその崩壊過程を測定し、これらの状態の構造、特に図 3 下段のように K-が複数の陽子に共有されているのか、一つの陽子と結合して $\Lambda(1405)$ の形で核内に存在しているのかを調べようとしている。こうして中間子原子核というサブ階層の仕組みを明らかにしたい。[担当：永江（京都大）]

（2-2）核内のバリオンは自由空間のバリオンと同じなのか

なぜか原子核階層はハドロン階層からよく分離しており、通常の原子核理論では、核子は自由空間にいるときも核内にいるときも変化していないものとして扱われる。しかしながら、高エネルギーレプトンビームによる深部非弾性散乱のデータをみると、核内の核子と自由な核子（実際は重陽子内の核子）のクォーク分布は異なっている（EMC 効果）。また、核内核子は核力の場によって大きさが膨れているという議論もなされている。では、なぜ核子の内部自由度が原子核の低エネルギー現象の中に見えてこないのか。あるいは、核子の性質は変化しているがそれがうまく見えないだけなのか。そこで我々は、ハイペロンが核内で核子からのパウリ排他律を受けないことを使って、核内深部でのバリオンの性質変化を調べる。こうして、原子核階層がハドロン階層から本当によく分離しているのかどうかを明らかにしたい。

J-PARC E63 実験では、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核の基底状態二重項間の Λ スピン反転に伴うガンマ遷移（ $3/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ）の遷移確率を測定して、核内 Λ の g 因子（磁気モーメント）を精密に導出して、それが自由空間での値から変化しているかどうかを調べようとしている。 Λ - Σ 混合や meson exchange current などのハドロンレベルの効果では説明できないズレが検出されれば、核内バリオンの構造変化の証拠となる。新たに建設される J-PARC K1.1 ビームラインでの実施にむけて実験準備を進めている。また、 Λ ハイパー核の弱崩壊から核内バリオンの構造変化を調べる実験も検討している。[担当：田村（東北大）]

お知らせ

- 本領域研究が後援している国際会議 Asia-Pacific conference on few-body problems in physics は、2021 年 3 月 1 日—5 日に延期されました。詳しくは国際会議のページ、<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/apfb2020/> をご覧下さい。