

J-PARC ハドロンビームによる新種の超原子核発見



仲澤 和馬
Nakazawa Kazuma

1 はじめに

原子核物理の大きな研究目的の1つは、バリオン間相互作用を統一的に理解することにある。図1に示すバリオンの中で、核子 (N) と総称される陽子 (p) や中性子 (n) で構成される原子核は、既に3,000を超えて発見されている。図1の中間に示すラムダ (Λ) やシグマ (Σ) は、ストレンジ量子数を1つ持つ ($s = -1$)。最下層は $s = -2$ のグザイ (Ξ) である。

核子間相互作用については、50年以上に及ぶ実験・理論両面での詳細な研究から多くの知見が得られてきた。またこれまでの約20年間の精密 γ 線分光の研究により、 Λ - N 間や Σ - N 間の相互作用の理解が急速に、かつ着実に進んでいる。そして現在、ダブルストレンジネス： $s = -2$ の Λ - Λ 間、また Ξ - N 間相互作用を明らかにして、バリオン間相互作用を統一的に理解することが、最重要課題の1つになっている。

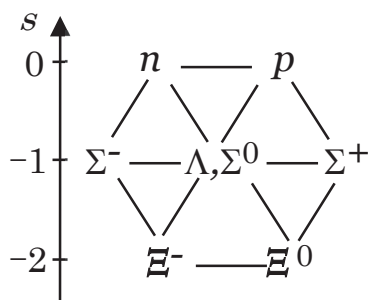


図1 バリオン8重項

一方で近年、通常の原子核の数倍にもなる高密度な天体：中性子星のコア部分では、中性子が弱い相互作用で変化したハイペロン ($s \neq 0$ の Λ , Σ や Ξ) が星の構成成分として質量や冷却機構に大きく関わると考えられている。これをひも解く鍵として $s \neq 0$ の原子核：ハイパー核について、実験・理論家と宇宙物理分野の専門家が共同研究を進めている。中性子星は、さしずめ超巨大なハイパー核である。

筆者らは、1988年にKEKで開始したエマルジョン（原子核乾板）実験（E176）で、核内の2個の Λ 粒子は直ちに融合して“Hダイバリオン”になるとの当時の理論的予想に反して、 Λ が順次崩壊するダブル Λ ハイパー核の存在を明確にした¹⁾。しかし核種を単一に同定できなかったため、E176実験の10倍（約10個）のダブル Λ ハイパー核の検出が期待できる実験（E373）を、更にKEKで実施した。その結果、発見した9例中に ${}^4\text{He}$ に2個の Λ を含む ${}_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ を1例（NAGARA event）発見し、 Λ - Λ 間（s波）に引力的相互作用（ $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 0.67 \pm 0.17 \text{ MeV}$ ）がはたらくことを突き止めた^{2,3)}。ここで $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ は、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用エネルギー（ $B_{\Lambda\Lambda}[\Lambda\Lambda Z \text{の質量欠損}] - 2 \cdot B_{\Lambda}[\Lambda \text{の質量欠損}]$ ）である。その後、 Λ - Λ 間のp波相互作用、 Ξ - N 相互作用、また質量差が28 MeVしかない $\Lambda\Lambda \leftrightarrow \Xi N$ 結合等、それらの全容解明を目指して、ビームの量・質共に優れたJ-PARCで、E373を更に1桁上回る統計量（約100例）を期待できるE07実験に取り組んでいる。

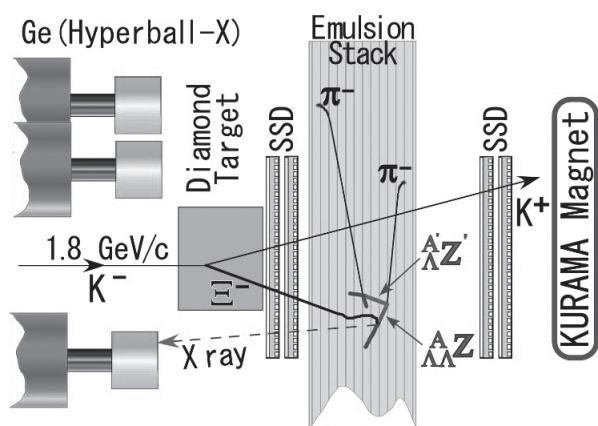


図2 E07実験のセットアップの概要

2 E07 実験 (J-PARC) の概要

2007年に採択を受けたE07実験は、東日本大震災や放射能漏洩事故等により、最初のビーム照射は2016年となった。照射まで長い期間であったが、万全の準備をすることができた。

実験のセットアップの概要を図2に示す。

ダブルΛやΞハイパー核(ダブルハイパー核)を作るには、 $s = -2$ のΞ⁻を原子核に吸収させ、核内陽子との反応で2つのΛを作らなければならない。K⁻ビームが入射し、ダイヤモンド標的(2[縦]×5[横]×3[奥行]cm³)中で起こる $p(K^-, K^+)Ξ^-$ 反応からのΞ⁻をK⁺でタグして、Ξ⁻吸収を効率良く選別した。上流の50μmピッチのSSD(4層:x, y, x', y')はエマルションに入射するΞ⁻の位置・角度を測定し、スタックの最上流のエマルションでのΞ⁻探査をガイドし、下流エマルションへと追跡してΞ⁻吸収点でダブルハイパー核生成の有無を確認する。下流のSSDは、エマルション中で吸収されなかったΞ⁻候補を排除する。

エマルションの大きさは34.5×35cm²である。スタックは、最上流と最下流に薄型塗布(透明な180μm厚のポリスチレン[PS]フィルムの両面にそれぞれ100μm厚の乾膜)と、その間に11枚の厚型塗布(40μm厚のPSフィルムの両面にそれぞれ480μm厚の乾膜)で構成される。エマルションは2013年12月から6か月かけて、岐阜大学のダブルハイパー核実験棟で2.1tの乳剤から製作したが、ビーム照射時期が遅れていく中で宇宙線等による被ばくを回避すべく、東京大学宇宙線研究所神岡地下観測所の

地下1,000mの鉛ブロック箱(壁厚10cm)で保管させていただいた。定期的なモニターでは、主たる照射の2017年には、E373実験の照射エマルションと同程度の被ばくが予期できたため、すべてのエマルションの強制潜像退行を実施した。

上流のGe半導体のX線検出器は、Ξ-N間相互作用を明らかにするべく、Ξ⁻の原子軌道から吸収反応の強い相互作用が起こる準位のX線を測定するためである。エマルション中で静止吸収された事象のみを対象にできるので、バックグラウンドとなるX線の大幅な削減が期待できる。

実験はJ-PARCハドロンホールのK1.8ビームラインを利用した。K⁻ビームの運動量は、Ξ⁻生成反応断面積が最高となる1.8GeV/cとした。エマルションはすべての荷電粒子を記録するので、K⁻以外をカットすべく、ビームライン上流のスリットを狭めると共にタングステンコリメータを配置して、ビーム中のK⁻の純度を80%にまで高めた。ビームは繰返し時間5.52秒のうちの2.0秒間に $3 \times 10^5 K^-$ を照射したが、ビームをエマルション全面に均一に照射すべく、照射中は位置精度10μmのムーバーを開発しテレビのラスタースキャンのようにスタックを移動させた。このようにして2016年10月と2017年6月に、それぞれ18及び100スタックのエマルションにK⁻ビームを照射した。照射直後から開始したエマルションの現像は、2017年2月にすべて終了した。

E373実験においては、探査と解析に10年を要した。その10倍のダブルハイパー核を短期(数年)で捉えるには、Ξ⁻追跡の自動化と解析の高速化が不可欠である。前者は、隣り合う2枚のエマルションのビームパターンを合わせることで、全面にわたって1μmの精度で位置較正が可能になり、角度が類似した飛跡を誤追跡することを抑えて、自動化が実現した⁴⁾。後者は、エネルギー較正に不可欠なエネルギーが既知の飛跡を持つ図3に示す事象(エマルション中に含まれる自然放射性同位元素²²⁸Thを起点とする系列の最後、²¹²Poから²⁰⁸Pbへのα線を用いる)の探査の自動化により高速化が達成された⁵⁾。

オフライン解析でΞ⁻の可能性の高い候補を選別し、2017年5月から追跡が順調に進むようになった。その2か月後、ついに⁸ΛHeと異なる核種でBeを芯とするダブルΛハイパー核を岐阜大学の修士学生

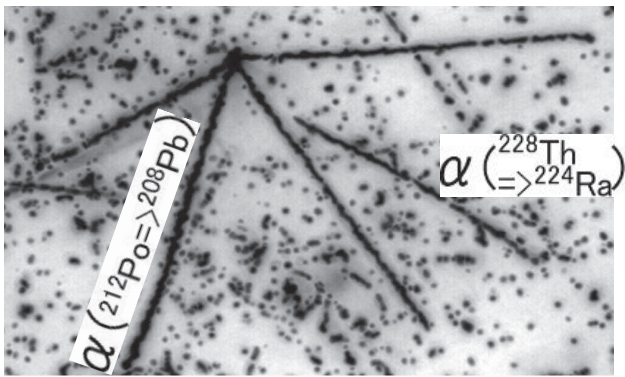


図3 ^{228}Th の α 崩壊。 ^{212}Po の出す α の飛程は約 $50\ \mu\text{m}$

が発見した。この事象に、岐阜県の南部を表す MINO event と命名した。

3 MINO event

運動量 $1.27\ \text{GeV}/c$ 、質量 $0.54\ \text{GeV}$ と測定された K^+ でタグした反応の Ξ^- 候補をスタック下流に自動追跡した結果、7枚目のエマルジョンで静止したとの情報が残された。その位置を学生が確認したところ3つの分岐点を持つ事象が記録されていた。積層写真を図4に示す。

Ξ^- 粒子の静止吸収A点からは3つの荷電粒子(#1, #3, #4) が放出された。いずれもエマルジョン中で静止しているが、飛程 $2.1 \pm 0.2\ \mu\text{m}$ の#1の静止点Bからはやはり3つの荷電粒子(#2, #5, #6) が放出されていた。#5はエマルジョン中で静止する一方で、#6は下流に向けて $2.3\ \text{mm}$ 以上飛行しスタックから出て SSD 中で静止した。#2は飛程 $50.6 \pm 0.3\ \mu\text{m}$ を残してその静止点Cから、3つの荷電粒子(#7, #8, #9) を放出した。#9は $7.3\ \text{mm}$ 以上飛行した後に下流の SSD をも通り抜け、#7及び#8はエマルジョン中で静止した。

吸収点から放出される荷電粒子は、吸収した核のクーロン障壁を破る必要がある。エマルジョンを構成する重い核の成分 (Ag, Br) に吸収された場合には、密度 $3.486 \pm 0.013\ \text{g}/\text{cm}^3$ の我々のエマルジョンでは陽子でも $32\ \mu\text{m}$ 以上の飛程となる。A点からの#3の飛程が $17.5 \pm 0.2\ \mu\text{m}$ であるため、 Ξ^- は軽い成分 (C, N, O) に吸収されたことが分かる。

事象の再構成には、電荷保存を満たすあらゆる生成・崩壊モードから、運動量及びエネルギー保存を満たすモードのみを引き出してくる。

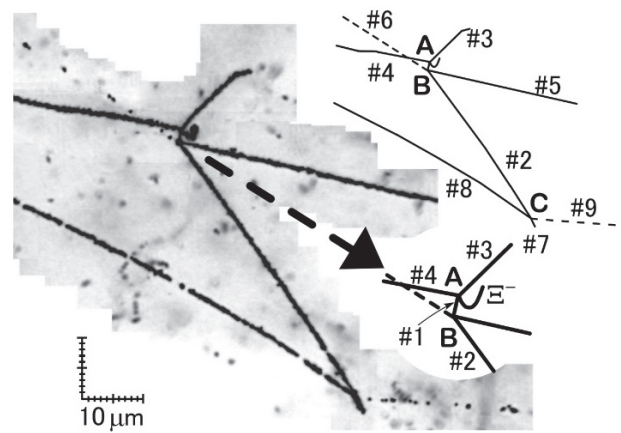
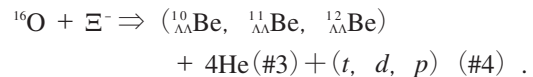


図4 ダブル Λ ハイパー核：MINO event

まずC点では、#7, #8及び#9の単位ベクトルを用い、それらのスカラー3重積が 0.001 ± 0.043 となることから、3粒子は一平面上にあって中性粒子の放出は考えにくい。中性粒子放出の場合を考慮しても#9が π^- であり、#9の飛程に SSD 中も加味すると $9.5\ \text{mm}$ 以上あることから、#2は ^4He , ^5He , ^6Li となった。ここで自由度3で運動学的フィッティングをすると χ^2 が、それぞれ 33.1, 5.23 及び 105 となり、#2は ^5He であることが分かった。

ダブルハイパー核崩壊のB点でもスカラー3重積が 0.007 ± 0.019 となり、中性粒子放出がない場合は $^8\text{B} \Rightarrow ^3\text{He}(\#2) + ^4\text{He}(\#5) + d(\#6)$ が唯一の解釈として得られたが、 0.8 秒で β 崩壊する ^8He の終端に β 線が見られず、中性粒子を前提に崩壊モードを当たった。候補として、 ^9Be , ^{10}Be , ^{11}Be , ^{12}Be , ^{13}Be , ^{11}B , ^{12}B , ^{13}B , ^{14}B , ^{15}B が残った。

生成点Aでは、 ^mBe 又は ^mB を生成するすべてのモードを点検し、これまでも採用した $\Delta B_{\Lambda\Lambda} - B_{\Xi^-} < 20\ \text{MeV}$ を満たす事例から、NAGARA event の $\Lambda\Lambda$ 間相互作用と矛盾する ($\Delta B_{\Lambda\Lambda} - B_{\Xi^-}$) を示すもの3例に絞られた。ここで B_{Ξ^-} は、 Ξ^- の束縛エネルギーである。生成モードは、次のようになった。



この3例に対して運動学的フィッティングをすると、自由度3で χ^2 がそれぞれ 11.5, 7.28, 及び 11.3 で、p-value (%) はそれぞれ 0.93, 6.35, 及び 1.02 となり、 ^{11}Be の生成・崩壊の可能性が最も高く、 $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.87 \pm 0.08 \pm 0.36\ \text{MeV}$ を得た。ついに NAGARA event と異なる核種のダブル Λ ハイパー核の発見に成功した⁶⁾。

4 議論と今後の計画

さて、MINO event と NAGARA event の $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の結果の相違の本質は何だろうか。

MINO event では、NAGARA event で見られた $\Lambda\Lambda$ 相互作用に加えて、 ΛN のスピン・スピン相互作用、コア核の Λ 粒子による収縮といった核媒質効果が寄与するであろう。また、理論予想に反して $\Lambda\Lambda$ 状態と ΞN 状態との結合が強ければ、その影響が出ているのかもしれない。

NAGARA event や MINO event で、 $\Lambda\Lambda$ は引力的相互作用であることが確定し、 Ξ^- が ^{14}N に深く束縛した Ξ ハイパー核 (^{13}C : KISO event) から ΞN も引力的相互作用であることが分かった⁷⁾。これらのことから、 Λ だけでなく Ξ のようなハイペロンも中性子星の高密度状態の中で容易に発生することになる。しかしこのような引力に加えて重力に耐えうる中性子星の最大質量はいかほどであろうか。筆者らの結果は、近年発見された太陽質量の2倍もある中性子星では重力崩壊を起こすはずであるという“ハイペロンパズル”を一層深刻にした。

このパズルを解く鍵を求めて今後の進む方向を次のように考えている。

(1) $\Lambda\Lambda$ 相互作用の全容解明

s波相互作用は引力であることが分かった。次は2つの Λ のうちの1つが励起状態となるダブル Λ ハイパー核の検出によるp波相互作用の研究推進。

(2) ΞN 相互作用の全容解明

Ξ ハイパー核中の Ξ の準位構造の精密測定。特に基底状態の幅は、次の $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合の強さを表す。

(3) 核媒質効果、 $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合の解明

更に多くの核種で $\Lambda\Lambda$ 相互作用を測定すると同時に、 $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合の影響を顕著に受けるであろう $^{\Lambda}\text{H}$ といった非常に軽いダブル Λ ハイパー核の質量の精密測定。

これらを実現するには、大統計のダブルハイパー核の検出が不可欠である。前述した Ξ^- を追跡する

手法では、E373実験のせいぜい10倍の統計しか期待できない。そこでこの10年間で開発を進めてきたのが、エマルジョン全面をスキャンして、ダブルハイパー核に特有の3つの分岐点を持つ事象を全自動で検出する手法：全面探査法である。KISO eventはこの手法の開発時に発見したものである。カウンターでタグできなかった Ξ^- や、 $n'(K, K^0) \Xi^-$ 反応を考慮すると、統計を更に1桁向上できる。

顕微鏡やその画像取得を高速化させ、機械学習等も導入して、パズルを解く鍵を求めてダブル・ストレンジネスの全容解明にあたりたいと考えている。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(S) [23224006]の支援を受け、基盤研究(A) [16H02180]及び新学術領域「中性子星」[24105002]、「クラスター階層」の公募研究[19H05147]の支援をいただいています。E07のビーム照射にあたり、J-PARCの加速器グループ、K1.8ビームライングループの方々には大変お世話になりました。また、東京大学宇宙線研究所神岡地下観測所の方々には、照射開始時期が不明瞭な中を、エマルジョンのモニターや強制潜像退行試験で頻繁に坑内に入出入りさせていただき、そして何より長期にわたり保管させていただけたことに大変感謝しております。

参考資料

- 1) S. Aoki, *et al.*, *Prog. Theor. Phys.*, **85**, 1287-1298 (1991)
- 2) H. Takahashi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 212502-1~5 (2001)
- 3) J.K. Ahn, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C88**, 014003-1~10 (2013)
- 4) M.K. Soe, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A848**, 66-72 (2017)
- 5) J. Yoshida, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A847**, 86-92 (2017)
- 6) H. Ekawa, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 021D02 (2019)
- 7) K. Nakazawa, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 033D02 (2015)

(岐阜大学教育学部・大学院工学研究科)