

ストレンジネス核物理

田村 裕和
東北大学理学研究科

私が大学院に入って最初にやったニュートリノの実験は、期せずして日本で最初のハイパー核実験となった。それ以後、私は KEK-PS, BNL-AGS, J-PARC でハイパー核の研究ばかりをやってきた。幸運にも、日本でストレンジネス核物理が花開いた時期であった。日本のストレンジネス核物理の歴史を振り返りつつ、特にハイパー核ガンマ線分光の開拓と今後、そしてストレンジネス核物理の将来への期待を述べたい。

1 日本のストレンジネス核物理実験の黎明と発展

ハイパー核の実験が日本で最初に行われたのは、私が東大の山崎・中井研に入った 1983 年のことだった。私は KEK-PS で行われていた山崎グループの $K_{\mu}II$ 実験に参加した。山中卓さん・石川隆さん・岩崎雅彦さん・秋葉康之さんといったとんでもなく元気のいい先輩達と、大阪から来たばかりのやはりパワーのかたまりみたいな万博さん¹にしごかれながら、KEK の宿舎に住み込んで実験を enjoy した。これは、 K^+ 中間子をプラスチックシンチレータ標的に止めて $\mu^+\nu$ 崩壊の μ^+ 運動量スペクトルを測ることで重いニュートリノを探す実験で、私は素粒子実験の研究室だと思って山崎研に入ったのである。当時の写真と実験セットアップを図 1 に示す。ところが山崎先生の発案で (万博さんも期待していたと思うが)、ビームタイムの最後の一週間はビームの極性を反転して K^- をプラスチックシンチレータ標的中に止め、 K^- が ^{12}C 核に吸収される際に放出される π^{\pm} 中間子の運動量を測定した。スペクトルは当時欧米で話題となっていた Σ ハイパー核の細い幅の非束縛状態の存在を示唆していて [1], 我々は興奮した。ここから東大グループは KEK-PS で静止 K^- 吸収によるハイパー核実験を進めることとなった。私から見ると、素粒子実験から原子核実験への転向だったが、実験手法がまったく同じだったのであまり違和感を感じなかった。その後も、私は原子核物理から素粒子物理, 原子分子物理, 物性物理と縦横無尽に分野を越境する山崎スタイルの華麗さを何度も目の当たりにしたが、その越境の瞬間はいつも自然だった。serendipity という言葉の意味を実感した。

一方、当時中井先生は、学生だった延與秀人さん・永江知文さん・徳宿克夫さんやスタッフの関本美知子さんらと KEK-PS の隣のビームラインでハドロン原子核反応の実験を進めていたが、素粒子の牙城だった KEK-PS で原子核物理を本格的に展開するため、ハイパー核の研究を KEK-PS で進めるべきだとも言われていた。ハイパー核実験の草分けである Heidelberg の Povh 先生が CERN で進めていた in-flight (K^-, π) 反応の Σ ハイパー核実験を KEK に誘致しようと検討していた。ところが Povh 先生は、静止 K^- 吸収の実験で Σ ハイパー核が見えたという話に惹かれて山崎グループに加わり、我々は数人のドイツ人と一緒に (静止 K^-, π^{\pm}) 反応による Σ ハイパー核実験を行うこととなった。高田栄一さん・阪口篤志さんも加わって実験を行ったが、 ^{12}C のみならず、 7Li , 9Be , ^{16}O , ^{40}Ca を標的にしたスペクトルにはいずれも Σ ハイパー核のピークは観測できなかった。 Σ ハイパー核をたくさん発見して D 論を書くはずだった私は目算が外れ、同じスペクトルに見えていた Λ ハイパー核の生成と崩壊の信号を解析して D 論にした。失望して Povh 先

¹この原稿を読んだ中井先生が、こういう子供を英語で hyper child と言うことを指摘して下さい。

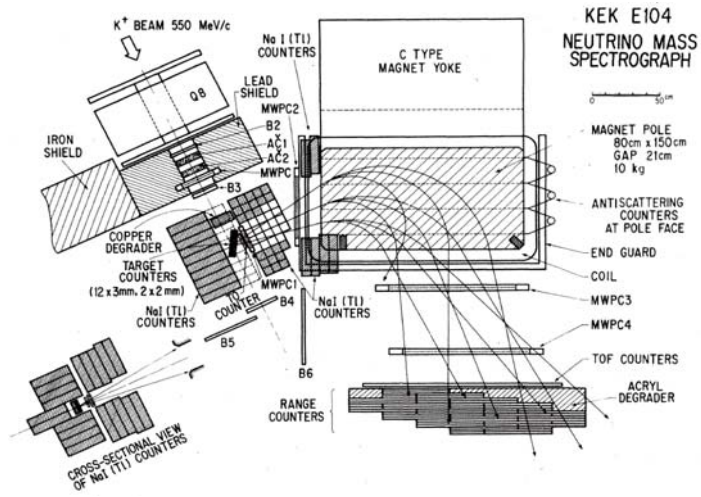
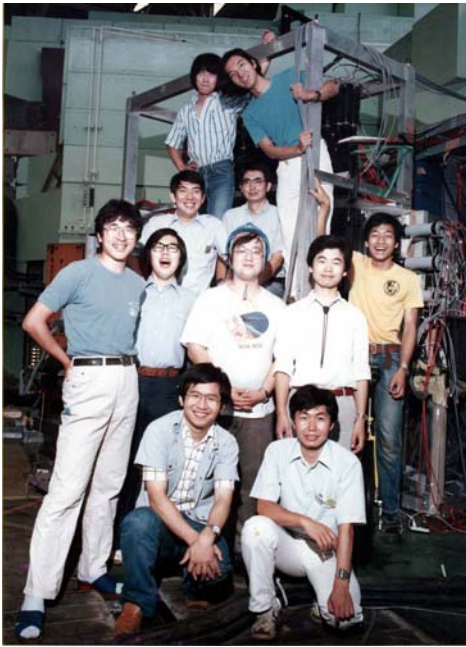


図 1: 日本で最初のハイパー核実験となった KEK-PS E104($K_{\mu}II$) 実験のメンバー (左) と実験セットアップ (右)。実験メンバーは、下の列左から秋葉さん, 中島雅之君 (現 NTT), 2 列目左から岩崎さん, 田村, 万博さん, 新井一郎さん, 山中さん, 3 列目左から大竹暁さん (現文科省), 内藤富士雄さん (現 KEK(J-PARC) 加速器), 4 列目左から鈴木健さん, 石川さん。

生が去ったあと、早野さんが実験責任者となって行った ^4He 標的での静止 K^- 実験で、我々東大グループは学生だった原田融さんと赤石さんの预言通りに ^4He の束縛状態のピークを発見した [2]。Dalitz らに threshold cusp ではないかとの疑問を受けたが、のちに永江さんが中心となって BNL で行った in-flight (K^-, π^{\pm}) 反応の実験で束縛状態であることが確立した。 [3]

1980 年代後半に BNL-AGS が (π^+, K^+) 反応による Λ ハイパー核分光に成功すると、中井先生は、これこそ KEK-PS で発展させるべき手法だと主張された。ビーム強度の弱い KEK では、 K 中間子ビームを使う実験をやっても BNL には勝てないが、 π 中間子ビームを使う実験なら検出器のレート耐性で使用可能なビーム強度が決まるので、速い検出器を使い、大立体角・高分解能のスペクトロメータを用意すれば、勝ち目がある、ということだった。今から思うと、これは後の日本のストレンジネス核物理の発展を決定づけた素晴らしい着眼点だった。パークレーにいた核研の橋本治さん呼び戻し、橋本さんの率いる核研グループが大立体角の超伝導 K 中間子スペクトロメータ SKS を建設した。また彼らは、SKS の建設と並行して、阪大の江尻・柴田グループとともに既存の dipole magnet を使って (π^+, K^+) 反応のハイパー核実験 (PIK) を行い、経験を積んだ。SKS が完成すると、後述のように、 $^7_{\Lambda}\text{Li}$ から $^{208}_{\Lambda}\text{Pb}$ にいたるさまざまな質量数のハイパー核を当時の最高分解能 (~ 2 MeV FWHM) で分光して良質のデータを取り [4, 5], さらに岸本さん (阪大) や Bhang さん (ソウル大) のグループも加わってハイパー核弱崩壊でも成果を上げた [6, 7]。

一方で、京大の政池さん・今井さんらは、当時 Jaffe により预言されていた H ダイバリオンを探索する実験を KEK-PS および BNL-AGS で開始した。 H ダイバリオンは確認できず、一方で名大の emulsion の技術を導入して KEK で行った実験で、ダブル Λ ハイパー核の事象を発見し、軽い H の存在を否定する成果を上げた。このように、1980 年代後半から 1990 年代半ばには、静止

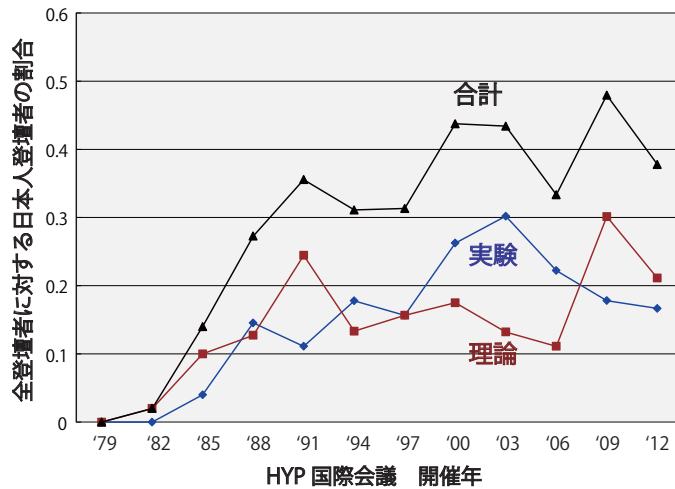


図 2: 3年に1回行われている「ハイパー核とストレンジ粒子国際会議 (HYP_{xx})」での日本人登壇者数の全体に占める割合。ただし「実験」の中には、日本で実験を行った外国人を含んでいる。このうち日本で開催されたのは、1991年(下田)、2009年(東海)である。

K^- の東大(山崎・早野)グループ、 (π^+, K^+) の核研(橋本)グループ+阪大(江尻・岸本)グループ)、 (K^-, K^+) の京大(政池・今井)グループの3グループが競い合った。

静止 K^- 法は、反陽子ヘリウム準安定状態の研究(山崎・早野)を生み出すとともに、岩崎さんらによる K^-p X線および後の K^- 原子核束縛状態の探索へと発展した。一方、早野さんの助手になった私は、静止 K^- と静止 K^+ の実験のために山崎先生と今里さんが建設した超伝導トロイダル磁石を使って、ハイパー核実験を続けようとした。 Σ ハイパー核は $^4_{\Sigma}\text{He}$ 以外に存在しないことがほぼわかってしまったので、D論のデータで多量の $^4_{\Lambda}\text{H}$ がhyperfragmentとして見えていたことをヒントに、静止 K^- 吸収で大量に生成するはずのhyperfragmentを使った Λ ハイパー核研究を模索したが、うまくいかなかった。

今井グループでは、KEK-PS K2ラインで、 (K^-, K^+) 反応による $S=-2$ 系の実験とともに、 H 探索実験用に開発したシンチレーションファイバーの技術を生かしてハイペロン・核子散乱実験も行った。この間、KEKに移ってこうした実験を推進・支援して下さっていた中井先生は、東京理科大に移ってグループを立ち上げ、ファイバーでなくバルクなシンチレータを用いたハイペロン・核子散乱実験を行った。こうして、KEK-PSでハイパー核物理が発展していった。KEK-PSでの当時の状況については中井先生の文章 [8] を参照されたい。

1990年代にSKSグループを率いて様々な成果を上げた橋本さんは、1995年に東北大に異動してSKSを永江さんに託したのを機に、JLabの電子線ビームを使った高分解能ハイパー核分光の開拓へと進んでいった [5, 9]。私が1997年に東北大に移ったため、東北大では、以下に述べるハイパー核ガンマ線分光の開拓と、電子線によるハイパー核分光という2つの新しい手法の開拓が並行して進められた。一つの研究室で2つのチームが「高分解能」を旗印に協力し合い、刺激し合ってそれぞれの研究を進めるといふ、理想的な環境であった。

なお、ここまで実験の話ばかり書いてきたが、日本でこのようにハイパー核実験が発展した理由には、KEK-PSの存在とともに、強力な理論家グループの存在がある。日本で実験が始まるより前から、坂東さんがハイパー核の理論グループを作り育ててきた。私がD論をまとめるときに

は、坂東さんと山本さんには大変お世話になってのちに共著論文まで書かせていただいた。一方、D論の主査だった矢崎さんに、審査前に論文の弱点を洗いざらい話して理論家として協力していただくという、禁じ手を使った。その後も、新しい実験をデザインするたびに、あるいはデータを解釈するたびに、元場さん、糸永さん、赤石さんといった方々に何度も何度も教えていただき、計算をしていただいた。こうした理論家と実験家の関係は、ますます強力になっている。

図2は、3年に1回行われている伝統あるハイパー核国際会議 (HYP_{xxx}) での日本人登壇者数の全体に占める割合である。1982年の会議から坂東グループが参入、1985年から山崎先生ら実験家も参入し、以後急速に増えて、最近では登壇者の約4割が日本人となっている。

2 ハイパー核ガンマ線分光

2.1 ハイパー核ガンマ線分光の開拓

1990年代前半に、私は静止 K^- 吸収で大量にできる様々なハイパー核 (hyperfragment) の弱崩壊で放出される π^- を、大立体角の超伝導トロイダルスペクトロメータで同定し、同時計測でそのハイパー核ガンマ線を測るという新しいアイデアの実験を行った。NaI カウンターを多数ならべて実験したが、過去に知られていた ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ のガンマ線しか検出できなかった。そんなとき、筑波大で古野さん主催のガンマ分光のワークショップがあり、そこでこの話をしたところ、なぜゲルマ (Ge 検出器) で測らないのか？ と浜本さんをはじめとする何人かの出席者からしつこく聞かれた。高エネルギービームによる強烈なバックグラウンドのために、ハイパー核実験ではゲルマは使えないことが常識となっていたので、知らない人は勝手なことを言うものだと思われ反発さえ感じた。しかしこのやりとりがずっと頭に残っていて、リセット型プリアンプを搭載した Ge 検出器が発売されたときに、福田さんをお願いして核研のお金で1台買っていただき、ゲルマが本当に使えないのかどうかを調べることにした。当時学部4年生だった谷田聖君とともに、KEK-PSのT1ラインで最初にテスト実験を行い、その後はK6ラインの π ビームを使ってSKSのハイパー核実験に寄生して何度もテストを行って Ge 検出器の読出し系を工夫し、高エネルギービームによる強烈なバックグラウンドのもとでも動作する読出し方式を開発した。コンプトン散乱だけでなく高エネルギーの光子や荷電粒子からも生じる膨大な Ge 検出器のバックグラウンドを落とすため、薄いBGOカウンターを Ge の周囲に配置することとした。

こんな1995年のあるとき、今井さんから電話があって「ゲルマの開発はどないや？ほんまに動くんか？」「はい、動くと思います。」「いくら要るんや？」「1億5千万くらいですが。」というやりとりがあったあと、あっという間に今井さんが代表として科研費重点領域の予算を獲得し、これで14セットを作って丸く配置することができた。この Ge 検出器群は、谷田君の発案で Hyperball と命名された。

ハイパー核ガンマ線分光の実験は、Hyperballが完成した1998年春から始まった。静止 K^- 法では hyperfragment として様々なハイパー核が大量に生成するが、バックグラウンドが多く、未知のガンマ線が観測されてもハイパー核の同定が難しいかも知れない。そこで当時、威力を発揮していたSKSを使わせてもらうこととして、 ${}^7\text{Li}(\pi^+, K^+)$ 反応で ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核の生成事象を選び、標的周囲に設置した Hyperball でガンマ線を同時測定した。幸運にも4つの ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ のガンマ遷移が観測された [10]。ハイパー核ガンマ線の NaI を使った観測例が過去に5例あったが、これは Ge 検

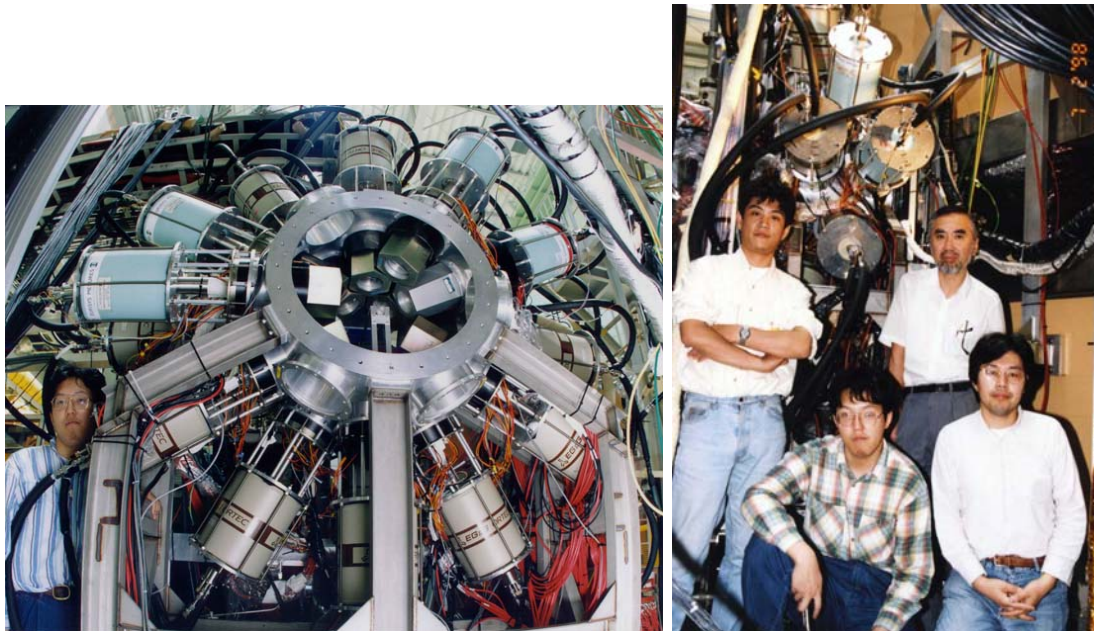


図 3: 左 : 完成した Hyperball と開発を一緒に行った谷田君 (当時 D1)。右 : SKS と Hyperball の前で。左から高橋俊行氏, 谷田君, 今井さん, 田村。

出器での初めてのハイパー核ガンマ線の観測であった。SKS の登場で 1.45 MeV (FWHM)[11] まで向上したハイパー核分光の分解能が, Ge による精密ガンマ線分光の成功によって, 束縛領域のみとはいえ 3 keV (FWHM) に一気に向上したことになる。中井先生に, どうせ無理だと思っていたがよくてきたな, と褒めていただいたのがとても嬉しかった。この頃の状況については文献 [12] を参照されたい。また, ハイパー核ガンマ線分光全体の解説は [5] にもある。

ガンマ線のエネルギーから, ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の基底状態二重項 ($3/2^+, 1/2^+$) の間隔が測定され, ΛN 間のスピン・スピンの大きさが確定した。広がったガンマ線ピークが, 1 event ごとに Doppler 効果を補正してやるときゅっと細いピークに収斂したときは, 間違いなくハイパー核ガンマ線だと感激した。スピン・スピンの大きさは, ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の基底状態二重項 ($0^+, 1^+$) の間隔 1.1 MeV が目安を与えていたが, この間隔には ΛNN 三体力も大きく寄与しているといわれており, 長年 p 殻ハイパー核での測定が待たれていたものだった。

また, この ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の実験では, $E2(5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ 遷移の $B(E2)$ の測定にも成功し, 元場さんらにより以前から予想されていた Λ の原子核収縮効果が実証された [13]。Ge 検出器の高分解能のおかげで, Doppler shift 減衰法によって励起状態の寿命がハイパー核ではじめて測定され, $B(E2)$ が得られたのである。なおこの ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 実験 (E419) を KEK に提案したとき, 当時学生だった肥山詠美子さんが $B(E2)$ 値を計算し, ハイパー核の縮み効果が分かるから実験で測定してほしいと訴えてきた。実験屋なら測れるでしょ, という感じの生意気な言い方だったが, その情熱に圧倒された。スピン・スピンをメインテーマとして提出していた E419 の実験提案書を, $B(E2)$ 測定をメインテーマに書き替えて再提出した。YN 相互作用の重要性をいつも語っていた中井先生は, この変更には不満だったようだが, スピン・スピンを決める $3/2^+ \rightarrow 1/2^+$ 遷移が測れるかどうかには不確実性があったのに対して, $B(E2)$ の方はシミュレーションにより確実に測定できることがわかったため, 最初の実験として確実な方のテーマを選んだのであった。

なお、このとき私は標的中で原子核が減速しながら出すガンマ線の Doppler shift から寿命が測れることに気づいて、内心得意になっていたが、Doppler shift 減衰法という昔からある測定法だと知ってがっかりした。森永・山崎のインビームガンマ分光の教科書にも書いてあったのに、読んでいなかったことが恥ずかしかった。一方、測定した $B(E2)$ から出した縮み率 $19\pm 4\%$ は、肥山氏の予言値 22% と一致した。このとき肥山計算のすごさも実感した。

2.2 ΛN 間のスピン依存相互作用の研究

その後も、 ΛN 間有効相互作用のスピン依存部分 (スピン・スピン力, LS 力, テンソル力) のそれぞれの大きさを実験的に決めることを目的として、ハイパー核のガンマ線分光を進めた。詳しくは文献 [14] を参照されたい。KEK では π ビームでハイパー核を生成したが、BNL-AGS の強い陽子ビームを使えば、ハイパー核生成効率のいい K^- ビームでバックグラウンドの少ないハイパー核ガンマ線データが取れる。1998 年夏の KEK E419 実験のあと、急いで Hyperball を BNL に移動し、12 月に BNL E930 実験を行った。 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ のガンマ線を測定して 42 keV という極めて小さな ($3/2^+, 5/2^+$) のレベル分岐を観測することができた [15]。私はこうした小さなスピン二重項の分岐を hyperfine structure をもじって “hypernuclear fine structure” と呼ぶことにして論文のタイトルにも使った。いいネーミングだと思っていたが、他の人は使ってくれなかった。この ($3/2^+, 5/2^+$) は ${}^8\text{Be}(2^+)$ と $0s$ 軌道にいる Λ のスピントが結合してできるレベルで、 Λ スピン LS 力で分岐する (後述のように、 ΛN 間には Λ スピンに依存する LS 力と核子スピんに依存する LS 力とがある)。つまり分岐の小ささが Λ スピン LS 力が極めて小さいことを直接示している。このガンマ線は、昔 BNL で May たちが NaI カウンターで測定したが、2 つを分離して観測することができなかったもので、ここでも Ge 検出器の威力を実感した。

その後、BNL-AGS の陽子ビームは RHIC 開始にあわせてシャットダウンが予定されていたが、永宮さんらのご努力のおかげで 2001 年に E930 の続きのビームタイムをいただくことができた。Chrien や Pile ら BNL のコラボレータに助けをもらいながら、D1 学生だった鵜養美冬さんや、SKS で学位を取って BNL のポスドクになった発知英明君 (現 JAEA(J-PARC) 加速器), 理研に移っていた谷田君らと少人数で頑張って実験をした。本格的なデータ収集が始まった頃に NY のテロが起こり、街の異様な雰囲気と人々の不安を肌で感じながらの実験となった。仙台と NY を毎週のように往復していた私は、がらがらの機内でシートを 4 つ使って寝ることができたが、よく自分の乗っている飛行機が落ちる夢をみた。実験中に、ハイパー核のガンマ線が見えてきたので、予定通り鵜養さんを NY からハワイの日米合同学会に行かせたが、燃料が多くて一番危ないと言われていたアメリカの国内長距離便に乗せられ、私を鬼のような指導教官だと思ったそうである。加速器もトラブル続きであった。AGS が RHIC の入射器として重イオンを加速しているときは、陽子ビームを使う我々は実験できないが、初期の RHIC は入射してもすぐ周回ビームを失うため、陽子ビームが出たと思うとすぐまた止まって待たされる、という状況が続き、データ収集には非常に長時間を費やした。しかし、どうにか ${}^{16}_{\Lambda}\text{O}$ の基底状態のわずか 26 keV の分岐 (hypernuclear fine structure) を観測して、ここから ΛN 間の小さなテンソル力の大きさが決定できた [16]。

その後も AGS で実験をしたかったが AGS の陽子ビームの見込みがなくなり、一方スーパーカミオカンデの事故で K2K 実験が走れなくなって KEK-PS のビームタイムに余裕ができたため、2002 年に急遽 Hyperball を KEK に戻し、静止 K^- 吸収による hyperfragment のガンマ線分光実

Hypernuclear γ rays (2012)

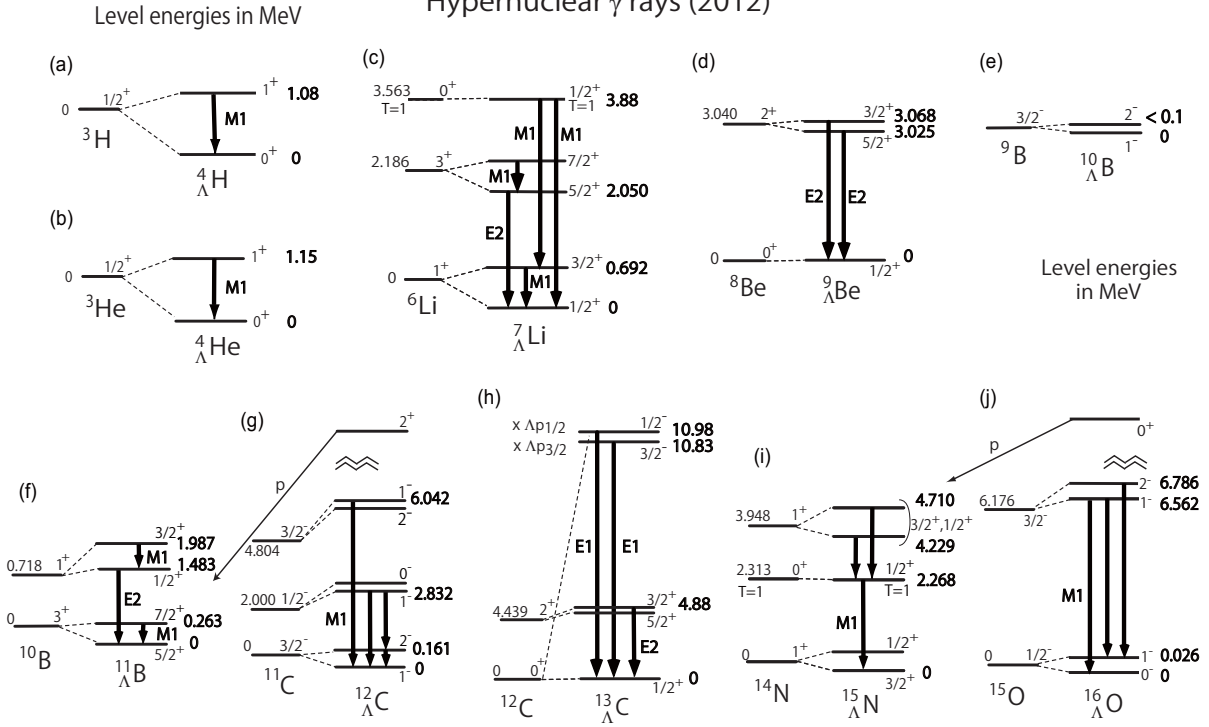


図 4: これまでに測定されたハイパー核のガンマ線。(a) ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, (b) ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ は 1970 年代に NaI 検出器を用いて測られたもの。(h) ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ は岸本グループが NaI カウンターで測定したもの。それ以外は Hyperball または Hyperball2 で測定されたものである。

験 (責任者: 谷田君) を行った。この実験は、(静止 K^-, γ) というシンプルな測定で、本来のインビームガンマ分光に近い。 $\gamma\gamma$ coincidence や標的の質量数を少しずつ変えてデータをとることでハイパー核の核種が同定できるし、中性子・陽子過剰ハイパー核のガンマ線も見えるかもしれないと考え、私はその可能性に期待していた。いくつかの既知のハイパー核ガンマ線と、未知のハイパー核ガンマ線が見えたが、未知のガンマ線の核種同定はできなかった。バックグラウンドも多く、標的から等方的に出る粒子による Ge 検出器の放射線損傷もひどかった。

やはり直接反応に戻ろうということになり、SKS で (π^+, K^+) 反応を用いた ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ と ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の実験を行った。 ${}^{12}\text{C}$ を標的とした ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の実験では、東北大サイクロの所有する 6 台の大型の Clover 型 Ge 検出器を追加して立体角を約 2 倍にし、Hyperball2 と名付けて使用した。この実験は、SKS を使ったペンタクォーク探索実験とともに、KEK-PS の最後の実験となった。なお、この Hyperball2 を作っている頃、Stony Brook でガンマ線分光をやっていた小池武志氏が、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の $B(E2)$ 測定に感銘を受けたとあってグループに加わってくれた。東北大サイクロで Hyperball2 を使った通常核のガンマ線分光実験も行ったが、これは学生の教育にとっても非常に重要な機会となった。

こうして、図 4 のように、 (π^+, K^+) , (K^-, π^-) 反応で生成可能な p 殻ハイパー核の主要なレベル構造はほとんど決定できた。また、この図の (h) には、AGS で 1998 年の Hyperball 実験が行われる前に阪大岸本グループが行った NaI 検出器群を用いたガンマ線分光の結果 [17] も描いてある。11 MeV の $p_{\Lambda} \rightarrow s_{\Lambda}$ 遷移のガンマ線を測定して ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ の Λ の $p_{3/2}$, $p_{1/2}$ 軌道を分離したもので、この 150keV の分岐は Hyperball で測った ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ の $(3/2^+, 5/2^+)$ 分岐と同じ大きさの LS 力で説明できた。

実験で得られたレベル構造は、Nijmegen グループの様々なバリオン間 (BB) 相互作用模型をもとに行われた核構造計算の結果と比較することで、相互作用模型のテストや改良に役立った。Nijmegen や Juelich の BB 相互作用模型は、中間子交換描像にたち、フレーバー SU(3) ($SU_f(3)$) 対称性を仮定してメソン・バリオンの結合定数などを与え、膨大な NN 散乱データとごくわずかな YN 散乱データをフィットして決めている。 YN , YY 相互作用には、 $SU_f(3)$ 対称性だけでは決められない部分もあるが、 YN 散乱実験ではハイペロンの短い寿命のため高統計のデータを得ることは極めて難しい。そこで、こうして得られた BB 相互作用模型がハイパー核のデータを正しく再現するかどうか、さらにはハイパー核データを使って相互作用模型を改良できないかと考えられてきた。1980 年代中頃に、山本さん・坂東さんが ΛN 相互作用では G-matrix 計算が定量的にうまくいくことを示し、元場さん・糸永さん・山田さんらの shell モデルや cluster モデルによる核構造計算を通して、二体相互作用 – 有効相互作用 – ハイパー核構造がつながり、定量的な議論が可能となった。また、宮川さん、赤石さん・原田さん、肥山さんらによる少数多体系計算も相互作用と少数系ハイパー核構造を直接結びつけた。

一方、Gal, Dalitz ら、そしてのちに Millener は、スピン・スピ力 ($V_\sigma(r)S_\Lambda S_N$), Λ スピンに依存する LS 力 ($V_\Lambda(r)S_\Lambda I_{\Lambda N}$), 核子スピンに依存する LS 力 ($V_N(r)S_N I_{\Lambda N}$), テンソル力 ($V_T(r)S_{12}$) の 4 つの有効相互作用の大きさを実験から現象論的に決める方法を提唱していた。 p 殻ハイパー核において、 p 軌道の核子と s 軌道の Λ の間での上記 4 つの相互作用の平均的エネルギーを Δ , S_Λ , S_N , T の 4 つのパラメータで表すとすると、 p 殻ハイパー核で Λ が s 軌道にいる低励起状態のレベル間隔は、shell model 計算によってこの 4 つのパラメータの線形結合として書ける。そこで、いくつかの実験データを使えば、 Δ , S_Λ , S_N , T を決めることが出来る。我々は、 ${}^7_\Lambda\text{Li}$, ${}^9_\Lambda\text{Be}$, ${}^{16}_\Lambda\text{O}$ のデータからこれらの値を得たが、さらなる実験で得られた図 4 のほとんどのレベルエネルギーがこれらの値を用いてよく再現できることがわかった [18]。さらに、核内で重要な役割を果たす ΛN - ΣN coupling の効果はまだよくわかっていないが、Nijmegen モデルをもとに各レベルエネルギーへの寄与を計算してこれを加えると、実験データとの一致が一層良くなる。4 つのパラメータと理論的な ΛN - ΣN 効果の計算値をいれただけで、ごく一部の例外を除き、数 10 keV 程度の精度でほぼ完璧に再現できるのは驚きである。核内での ΛN - ΣN coupling は、pion 交換による 3 体力 (藤田・宮沢型 3 体力で Δ を Σ に変えたもの) として現れる。こうした結果から、 ΛN - ΣN coupling 力は Nijmegen の中間子交換模型でおおよそ説明できるらしいことがわかってきた。

さて、G-matrix 計算を行えば、BB 間力の理論模型から、 Δ , S_Λ , S_N , T の値を予言することとができる。これを実験で決まった値と比べれば、理論模型の適否が判定できる。その結果、テンソル力 T は、Nijmegen 模型のさまざまなバージョンのどれでもおおよそ一致することがわかったが、LS 力 (S_Λ と S_N) については、どのバージョンを使っても実験とまったく合わない。これは、肥山さんや藤原さんの ${}^9_\Lambda\text{Be}$ と ${}^{13}_\Lambda\text{C}$ のクラスター模型の構造計算でも確かめられている。ところが、LS 力を構成子クォーク間の one gluon exchange で記述する QCM を使った BB 間力模型 (藤原模型) では、実験とよく一致する。原子核の魔法数を通して宇宙の元素の存在比を支配している、核力の大きな LS 力は、従来の重い中間子交換の描像で記述すべきではなく、クォーク描像で記述すべきことがわかった、と私は嬉しくなり、国際会議などでもそう発言したが、理論家の多くからは顔をしかめられた。話はそんなに単純ではないということだが、実験で合わせるパラメータが多いものの理論的枠組みがしっかりした伝統ある中間子交換模型をこれだけのデータで批判してほしくないということだろう。しかし、理科大に移られた中井先生が測定した原子核を

使った YN 散乱の asymmetry のデータは、 ΣN では大きく、 ΛN ではほぼゼロの LS 力が働くことを示していて、クォーク模型の予想と合っているようにみえる。今後、 ΣN 、 ΞN の LS 力を詳しく調べることで、LS 力はクォーク描像で理解すべきであることが確立できるのではないかと考えている。

2.3 ハイパー核の精密ガンマ線分光の今後

図 4 のガンマ線のうち、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 以外は、1998 年から 2005 年までの実験で得られたものである。 (π^+, K^+) 反応を用いた KEK の実験と、 (K^-, π^-) 反応を用いた BNL の実験とがあるが、いずれも 1 つの標的あたり 1 ヶ月かそれ以上のビームタイムを費やしている。J-PARC で 1 桁以上強いビームを使い、Hyperball2 よりもさらに大立体角の Ge 検出器群を使うことで、多数の標的に対してハイパー核ガンマ線を次々と系統的に測れるようにしたい。そこで、Hyperball2 よりもさらに立体角が大きく、より強いビームに耐えられる新型の Ge 検出器群 Hyperball-J を東北大で開発・建設した。永江さんが領域代表として獲得した科研費特定領域で資金を得ることができた。

KEK-PS の π ビームで実験していたときは、数週間ごとに放射線損傷で Ge 検出器のピークがなまっていき、頻りにアニールをする必要があった。J-PARC では KEK-PS の π ビーム強度以上の K^- ビーム強度が得られることになっていたため、放射線損傷の軽減が不可欠であった。小池氏が、Ge 結晶を液体窒素より低い温度に保つと放射線損傷の影響が劇的に小さくなるというデータを見つけてきた。KEK の春山さんに協力していただき、メーカーも巻き込んで、パルス管冷凍機を使った低温型 Ge 検出器を小池氏が中心となって開発した。また、経験豊富な鵜養さんに東北大に戻ってもらい、優秀な学生たちにも恵まれた。技術職員の千賀氏は、超絶メカ技術を発揮した。この強力な東北大チームが、これまでのゲルマボールの常識を覆すような新世代型の Ge 検出器群を開発した。

Hyperball-J でもう一つ特徴的なのは、BGO よりも高速の PWO シンチレータを用いたバックグラウンド (コンプトン) 抑止カウンターである。PWO は信号が高速な反面、光量が非常に小さいため、これまで高エネルギーの電磁カロリメータとしてしか使われたことがなかったが、工夫をして低エネルギーのガンマ線検出に初めて使うことができるようになった。

こうして完成した Hyperball-J (図 5) を J-PARC K1.8 ラインに設置して、J-PARC での最初のガンマ線分光実験 E13 を行おうとしている。E13 では、過去の NaI データの信頼性が低い ${}^4_{\Lambda}\text{He}(1^+ \rightarrow 0^+)$ 遷移 (図 4(b)) を正確に測って ΛN 相互作用の荷電対称性の破れを調べたり、 ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$ を測って sd 殻と p 殻のハイパー核の比較から ΛN 相互作用の距離依存性の情報を得るなどのテーマがあるが、ここで一番測りたいのは、以下に述べる核内バリオンの磁気モーメントである。なお、E13 の詳細は文献 [19] を参照いただきたい。

2.3.1 核内バリオンの磁気モーメント

今後、ハイパー核精密ガンマ線分光によって追究したいテーマが 2 つある。一つは、核内深部でのバリオンの性質変化を、パウリ効果を受けない Λ を使って調べることである。 Λ の磁気モーメントが自由空間と核内とで同じかどうかは興味深い問題である。昔、山崎先生が meson exchange current の効果を測定し、核内のパイ中間子の存在を実証した。現在の興味は、核密度でのカイ

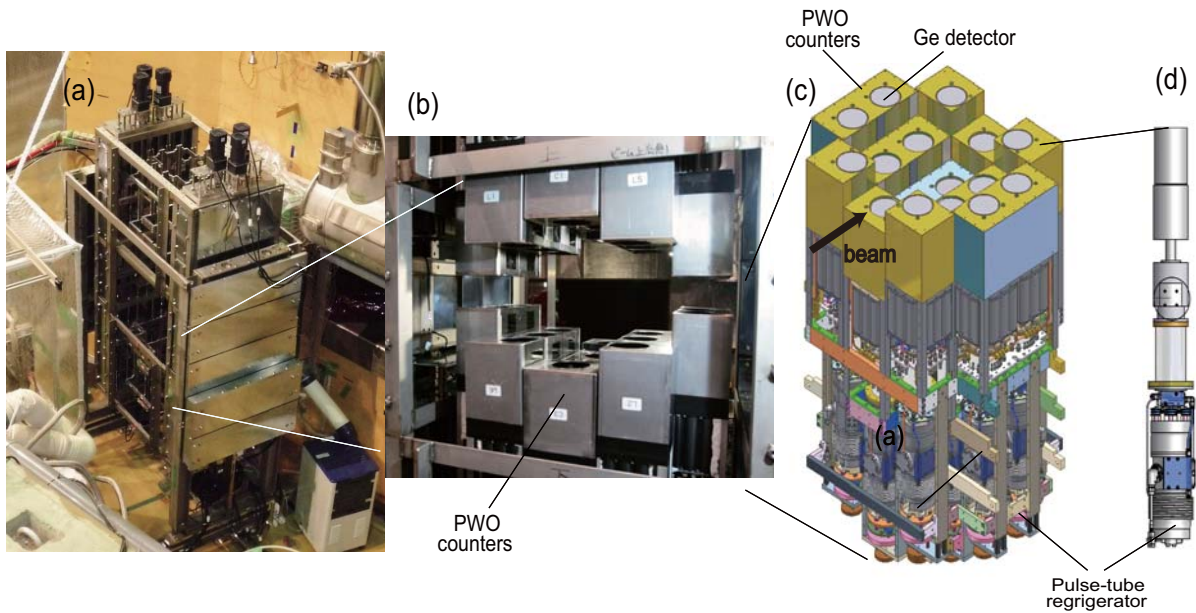


図 5: J-PARC でのハイパー核ガンマ線分光用に開発・建設した新世代型 Ge 検出器群 Hyperball-J。

ラル対称性の部分的回復による核内ハドロン質量変化である。カイラル対称性の破れが u, d クォークの裸の質量より 100 倍も重い構成子質量を作り出したと考えられ、核内のベクトル中間子のレプトン対崩壊による不変質量の測定が行われている。しかし、バリオンについてはこうした測定は難しい。ところで、バリオンの磁気モーメントは、構成子質量 m をもった Dirac 粒子の磁気モーメント $e\hbar/2mc$ の足し合わせでよく説明できる。その理由は十分理解されているわけではないが、クォークの構成子質量が核内で小さくなるのであれば、バリオンの磁気モーメントが核内で大きくなる効果が生じるように思われる。原子核の磁気モーメントは最外殻の valence 核子によって作られるが、その核子は一般に密度の小さいところにいる。密度が大きいほどカイラル対称性の部分的回復が大きいとされているので、 $0s$ 軌道にいるハイペロンを用いるのがよい。

ハイパー核の磁気モーメントの直接測定はハイペロンの短い寿命のため非常に難しい。しかし、ハイパー核基底状態二重項の間の Λ スピン反転 M1 遷移の換算遷移確率 $B(M1)$ は、核内 Λ の g 因子 g_Λ とコア核（ハイパー核の Λ 以外の部分）の g 因子 g_c との差に依存し、

$$B(M1) = \frac{3}{8\pi} \frac{(2J_{low} + 1)}{(2J_c + 1)} (g_c - g_\Lambda)^2$$

と書ける。 J_{low} は二重項の下のレベルのスピンの、 J_c はコア核のスピンのである。 ${}^7_\Lambda\text{Li}$ の $B(E2)$ 測定のとおり同様、Doppler shift 減衰法で二重項の励起状態の寿命が測定できれば、 $B(M1)$ 値が求められる。なお、上式は、 Λ がコア核に入っても g_c が変化しないことが仮定されている。通常の原子核で core polarization が磁気モーメントに大きな影響を与えていることを考えると、この仮定は正しくないように思われるが、我々のガンマ線分光実験から、 ΛN 間の Λ スピンに依存するすべての相互作用は NN 間のスピン依存相互作用よりエネルギーで 1 桁以上小さいことがわかっているため、 g_c の Λ による変化も非常に小さいはずである。これは理論計算で定量的に確かめることができる。

実は、KEK-PS の晩年に行った前述の ${}^{11}_\Lambda\text{B}$ と ${}^{12}_\Lambda\text{C}$ のガンマ線分光のメインテーマは、これらの基底状態二重項間の M1 遷移を使って核内磁気モーメントを調べることであった。しかし、いず

れの場合も遷移エネルギーが小さすぎて遷移寿命が長く、Doppler shift 減衰法が使えなかった。この方法を使うには、核内で反跳を受けた励起原子核が標の中で静止するまでの時間と励起状態の寿命とが同じオーダーでなければならない。ハイパー核の生成では、反跳速度はあまり自由に変えられないし、静止時間を決める標の密度も自由には選べない。しかも、M1 遷移の寿命は遷移エネルギーの 3 乗に反比例するため、あらかじめエネルギーを測っておよその寿命を知っておかなければ、Doppler shift 減衰法が使えるかどうかは分からない。 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の $B(E2)$ を測定した時は、過去の NaI を使った実験で遷移エネルギーが知られていて、およその寿命が予想できた。そしてリチウム金属標的の小さい密度と (π^+, K^+) 反応の大きな反跳運動量とで決まる静止時間が、予想された寿命と理想的な関係にあることがあらかじめ分かっていた。理論家の方に、なぜもっと $B(E2)$ や $B(M1)$ を測らないのかとよく聞かれたが、最初の実験だった ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ は、極めて幸運なケースだったのである。

${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$, ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ 実験の反省から、J-PARC では、レベル構造が完全に分かっている ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ を $B(M1)$ 測定に使うこととした。鶴養さんが詳しく検討し、短い M1 遷移の寿命に合わせるため密度の高い Li_2O を標的に使うこととした。約 5% の精度で $B(M1)$ を測定して、3% の精度で $|g_{\Lambda} - g_c|$ を決定できるという目算になった。これが J-PARC E13 実験のメインテーマである。

E13 の後は、より重いハイパー核で $B(M1)$ 測定の実験を行いたい。カイラル対称性の部分的回復の効果が磁気モーメント変化に影響しているならば、密度の薄い ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ と、核密度が一定となった重い核とで比較すると差が見えるはずである。ただ、重い核では二重項の分岐が小さくなり遷移寿命が長くなる傾向があるので、Doppler shift 減衰法が使えなくなる可能性がある。そのときは、遷移寿命が弱崩壊の寿命に近づくことを利用して、ガンマ線との同時計測をしながら弱崩壊粒子をカウンターで測って寿命を直接測定するという新しい方法で $B(M1)$ を求めることを考えている。

ところで、カイラル対称性回復の効果を見るためには、meson exchange current の効果 (one pion 交換がないので小さいが) や、核内での Λ - Σ 混合を評価する必要がある。 Λ - Σ 混合は核内 Λ の磁気モーメントに無視できない影響を与えるとされるが、 Λ - Σ 混合はアイソスピンが大きい核で効果が大きいため、アイソスピンの異なるハイパー核の測定を行って効果を分離することができると考えている。

2.3.2 不純物核物理

${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の $B(E2)$ 測定によって Λ が ${}^6\text{Li}$ 核を $19 \pm 2\%$ 縮めていることがわかったが、このように Λ は $0s$ 軌道に入って内側から引力の ΛN 相互作用で核子を引っつけるため、原子核が縮んだり、変形した核やクラスター的な核が球形に変化したりすることが起こりうる。また、中性子ハローをもった核 (${}^6\text{He}$ など) に Λ を入れるとハローが消失すると期待される。不純物が固体の物性を大きく変えることに似ている。こうした現象の研究を「不純物核物理」と呼ぶことにした。パウリ排他律のため核子が入ることが禁止されている軌道に Λ が入ることで、通常核にはない新しい対称性をもつ状態 (坂東さんが genuine hypernuclear state と呼んでいたもの) ができるが、こうした現象も不純物効果といえる。ガンマ線分光による高精度のレベルエネルギーの情報と、Doppler shift 減衰法による $B(E2)$ の測定によってこうした現象が実験的にみえるようになる。最近、平均場近似や AMD の計算によって、 sd 殻ハイパー核などで不純物効果の例がいろいろ予想されて

おり、今後実験が期待されている。

ここでひとつ面白いのは、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ (Hoyle state) のようなクラスターのと思われる状態に Λ を入れるとどうなるかである。ある程度クラスター化しているときは Λ がそれらを引きつけるので束縛エネルギーが大きく下がるが、クラスターが広がって存在していると $0s$ の Λ の引力が十分届かないため、あまり束縛エネルギーが下がらないことが理論的に指摘されている。このように、 Λ を入れたときの応答から、通常核の大きさや構造が逆にわかる。 Λ を使って通常核の構造をより詳しく調べる、という逆転した発想である。小池氏は、 ^{24}Mg のような 3 軸非対称変形をもつと言われている変形核に Λ を入れたときの変化を見ることで、3 軸非対称変形の証拠を得ることを目指した実験を J-PARC で行うべく検討している。

3 ストレンジネス核物理の展望

2000 年頃から、ハイパー核とともに、 YN 散乱、 $K^-/\Sigma^-/\Xi^-$ 原子、 K 中間子原子核などの研究分野を総称して「ストレンジネス核物理」と呼ぶようになった²。ここでは、ストレンジネス核物理全般の将来の展望について私見を述べたい。なお、J-PARC でのストレンジネス核物理の研究計画については、文献 [19] にまとめた。また、日本の核物理の将来構想を多くの若手研究者が議論して執筆した「日本の核物理の将来レポート」のストレンジネス核物理の章 [20] も参照されたい。

3.1 YN , YY 相互作用の研究

バリオン間相互作用を詳しく調べてバリオン間力を統一的に理解することは、ストレンジネス核物理、特にハイパー核研究の最大の目的の一つとされている。しかしそのような認識が定着したのは 1980 年代末あたりからで、G-matrix 計算や少数系計算などの理論の発展と、さまざまな新しい実験手法の開拓による実験データの充実がその背景にある。日本の理論家と実験家が協力してこの分野を急速に発展させた際の旗印がバリオン間相互作用であった。

中性の原子や分子の間の電磁相互作用は、高次の効果で生ずる複雑な振る舞いをする。同様に、バリオン間力は、白色になって閉じ込められたクォーク多体系の間に働く“高次の”強い相互作用であり、極めて複雑であることは当然だ。しかし、やはり閉じ込めの性質によって、長距離ではバリオン間力が中間子という自由度で記述できる。一方、斥力芯や LS 力などの短距離のバリオン間力が何の自由度あるいはどういう描像で理解できるかは分からず、昔から極めて重要なテーマであった。助手になった頃だったと思うが、岡さん・矢崎さんらのクォーク模型 (Quark Cluster Model: QCM) を知ったとき、これはすごいと思った。パラメータの殆どない非常にシンプルなモデルで、本質を突いているような気がした。核力に YN , YY 相互作用を加えて BB 相互作用に拡張すると、チャンネルによっては斥力芯がもっと強くなったり、逆に引力芯になったりすることが予言されている。ハイパー核を使ってこうした予言を検証して、短距離の核力あるいは BB 間力の物理的描像を打ち立てるのに役立ちたいと思った。最近では、格子 QCD によるバリオン

²この言葉は、ハイパー核研究者の間で以前から使われていたようにも思うが、正式に認知されたのは 1999 年冬にソウルで Il-Tong Cheon さんが主催して行った国際会議が Strangeness Nuclear Physics (SNP'99) と名付けられたときだったと思う。当分野では、“HYPxx” と名付けられている伝統あるハイパー核国際会議があるが、それと別に日本やアジアで行われる国際会議に SNPxx という愛称がよく使われるようになった。故橋本さんが始めた学振の先端研究拠点事業 (Core-to-core) で、毎年国際スクールを開催しているが、その名称も“SNP school”である。

間力のシミュレーションが可能になり、 $SU_f(3)$ 対称の極限では QCM の予言を支持するようなシミュレーション結果が得られている。実験で重要な部分を押さえながら、格子 QCD シミュレーションも利用すれば、この夢が叶う日も遠くないのではないかと思っている。さらには、こうして確定した YN , YY 相互作用を使って中性子星内部の高密度核物質が解明できるようになると期待している。

ΣN 相互作用 Σ は核内で Λ にすぐ転換するため、 Λ のようにハイパー核分光から詳細な相互作用の情報を得ることはできないが、これまでに ${}^4_2\text{He}$ の束縛状態のデータから、 ΣN 相互作用にはスピン・アイソスピン依存性があり、それは Nijmegen の中間子交換モデルの傾向 ($(S=1, I=1/2)$ と $(S=0, I=3/2)$ が引力で $(S=0, I=1/2)$ と $(S=1, I=3/2)$ が斥力) と consistent であることがわかっている。また SKS を使って野海氏らが測定した (π^-, K^+) 反応の連続スペクトル (いわゆる quasi-free spectrum) の形状から、スピン・アイソスピン平均した ΣN 相互作用は強い斥力であることが明らかになっている [21]。QCM では、 $(S=0, I=1/2)$ と $(S=1, I=3/2)$ のチャンネルは、クォーク間のパウリ効果が強く効いて斥力芯が非常に高くなるとされており、その傾向は最近の格子 QCD による計算でも再現されている。短距離部分に QCM を用いた藤原さんらのバリオン間相互作用モデルでは、 (π^-, K^+) スペクトルの示唆する $U_\Sigma \sim +30$ MeV の程度の斥力が再現される。そこで、本当にこれらのチャンネルで高い斥力芯が生じているのかを実験で調べることが重要である。その目的で、東北大学の三輪氏によって Σp 散乱実験 (J-PARC E40) が提案され、実験準備が進んでいる。この実験では、約 5 千本のシンチレーションファイバーを一本ずつ MPPC で読み出すという、高い位置分解能と時間分解能を兼ね備えた新しい飛跡検出器を開発し、 (K^-, K^+) 反応の測定による Σ の運動量ベクトルの決定と、散乱による反跳陽子の散乱角とエネルギー測定から散乱事象を選択する。これによって統計量を圧倒的に上げられ、さらに重心系 90 度に散乱した事象から、直接、位相差が決定できて強い斥力芯の存在が実証できる。

中性子星の表面から内部へ向かって核物質の密度が上がっていくと、最初に現れるハイペロンは何だろうか。 ΣN 相互作用が ΛN と同様に引力であれば、負電荷をもつ Σ^- は陽子とともに発生できるため中性子のフェルミエネルギーを一層下げるので、 Λ よりも低い密度領域 ($\sim 2\rho_0$ 周辺) で Σ^- が出現する。しかし ΣN 相互作用が強い斥力だと Σ は出現しない。とくに中性子ばかりの核物質中でハイペロンの出現を考える必要があるので、 $\Sigma^- n$ 間の相互作用が重要となる。クォークパウリ効果が存在するならば、 $\Sigma^- n$ ($S=1$) チャンネルの強い斥力芯により、 Σ^- は中性子星の内部で発生しないことが確定するだろう。

中性子過剰核物質中での ΛN 相互作用 ΛN 相互作用については、前述のようにスピン相互作用 (spin-spin 力, LS 力, tensor 力) の大きさが決まったが、今後は ΛNN の 3 体力の効果、特にその中性子過剰核物質中での効果を詳しく調べる必要がある。 ΣN - ΛN coupling による ΛNN 3 体力は、 Σ がアイソスピン 1 をもつため、 Λnn (Λpp) で大きな効果をもつ。そのため、この効果は中性子星でも重要である。

この 3 体力は、赤石さんによって中性子過剰ハイパー核をより強く束縛させると指摘されている。最近 FINUDA グループが 3 イベントを報告した ${}^6_\Lambda\text{H}$ のような中性子過剰ハイパー核の研究が直接この効果を知るのに役立つ。 (π^-, K^+) 反応で ${}^{10}_\Lambda\text{Li}$ の束縛状態を発見した SKS による福田さんらの KEK 実験 [22] につづき、J-PARC では (π^-, K^+) 反応で ${}^6_\Lambda\text{H}$ および ${}^9_\Lambda\text{He}$ を調べる実験 E10

(実験責任者：阪口さん) が進められている。ハイパー核ガンマ線分光実験でも、まずは ${}_{\Lambda}^{10}\text{B}$, ${}_{\Lambda}^{11}\text{B}$ などの構造から ΣN - ΛN coupling の効果をさらに詳細に調べる予定だが、その後はぜひ (K^-, π^0) 反応を用いて ${}_{\Lambda}^7\text{He}$ などのアイソスピンの大きなハイパー核のガンマ線分光も行いたい。

一方、 $(e, e'K^+)$ 反応分光は、陽子を Λ に変換するため ${}_{\Lambda}^7\text{He}$ のようにやや中性子過剰なハイパー核が研究でき、 $\Lambda N N$ 3 体力の研究にも威力を発揮する。橋本さんが大型科研費で完成させた HKS, HES という 2 つのスペクトロメータが JLab Hall-C に設置されて実験が行われた。これまでに 400 keV (FWHM) 程度の極めて高い分解能が実現しており、 ${}_{\Lambda}^7\text{He}$ の基底状態の観測では、その束縛エネルギーを ${}_{\Lambda}^7\text{Li}^*$, ${}_{\Lambda}^7\text{Be}$ と比べ、 ΛN 相互作用の荷電対称性の破れの研究にも役立っている [23]。橋本さん亡きあとは中村哲氏が中心となって Hall-A のグループと組んで次の実験を提案している。ただ JLab はビームタイムが少ないため、東北大では Mainz の MAMI-C でも $(e, e'K^+)$ 分光を進めようとしており、hyperfragment の中間子崩壊の π^- を分光して高精度でハイパー核質量の絶対値を求める実験も進めつつある。

$\Lambda\Lambda$ 相互作用 $S = -2$ 系のバリオオン間相互作用の研究は、J-PARC でのみ実験可能である。中性子星の中心部分では、 p , n , Λ , Ξ^- , Ξ^0 がほぼ同数ずつ混合した「ストレンジ核物質」が安定して存在している可能性がある。こうした $\rho_0 > 3$ の高密度核物質を理解するためには、 ΞN , $\Lambda\Lambda$ といった $S = -2$ 系のバリオオン間相互作用の情報が不可欠である。

$\Lambda\Lambda$ 相互作用については、今井さん・仲澤さんらによる hybrid emulsion 法でのダブル Λ ハイパー核の研究方法が確立しており、これを J-PARC で本格的に進めて KEK の実験の 10 倍以上の統計を得ようという実験 (E07) が 2013 年度末から始まる。Nagara event (${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$) によって $\Lambda\Lambda$ 間の結合エネルギーは $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 0.67 \pm 0.17$ MeV と決まり [24]、 $\Lambda\Lambda$ 間相互作用は昔言われていたほど引力が強くないことが確定したが、核構造の影響を除いて相互作用の大きさを定量的に知るためにはいくつかの異なる核種のダブルハイパー核のデータが必要である。また、 H ダイバリオンの関連で、核内で 2 つの Λ が短距離に存在している H ダイバリオンの相関がある可能性が指摘されているが、通常なら $0s$ 軌道にある 2 つの Λ がそれぞれ $\Lambda N \rightarrow NN$ のように弱崩壊するのに対して、 H ダイバリオンの相関があれば $\Lambda\Lambda \rightarrow \Sigma N$ 崩壊の頻度が多くなるはずである。これも E07 実験ではっきりする。

ΞN 相互作用 ΞN 相互作用は、過去に実験データがなく斥力か引力かさえも確定していない。以前 BNL で取得された ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応のスペクトルの連続部分の形状から、弱い引力 ($U_{\Xi} \sim -12$ MeV) が示唆されてはいるが、この実験は質量分解能と統計が乏しく何ともいえない。J-PARC E05 実験 (責任者: 永江さん) では専用のスペクトロメータ S-2S を建設して高分解能・高統計で ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応のスペクトルをとり、 Ξ ハイパー核の束縛状態を発見して U_{Ξ} を正確に決定することを目指している。 Ξ ハイパー核ピークの幅から $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用の情報も得られる。この実験は J-PARC ハドロン施設での最優先課題と位置づけられている。その後は、標的を変えて ΞN 相互作用のアイソスピン依存性も調べる。また ΞN - $\Lambda\Lambda$ は質量差がわずかに 28 MeV のため、これらの混合は大きく、核内の Ξ には $\Lambda\Lambda$ が 10% オーダー混合するといわれている。 (K^-, K^+) 反応で Ξ 核を作ると、その 28 MeV ほど深いところに $\Lambda\Lambda$ 核の生成がピークとして観測できるはずであり、 $\Lambda\Lambda$ 核と ΞN - $\Lambda\Lambda$ 混合の情報も得られる。

ΞN 相互作用に関しては、 (K^-, K^+) 反応で生成した Ξ^- を静止していくつかの原子にトラップ

させて Ξ^- 原子の X 線を測る実験 (E03, E07) も行われる予定である。X 線のシフトと幅から、 Ξ 核ポテンシャルの外側部分での実数部分と虚数部分の情報が得られる、ポテンシャル全体の情報が得られる (K^-, K^+) 反応分光の実験 (E05) と組み合わせれば、ポテンシャルの形状の情報も得られるはずである。原田さん・赤石さんの ^4_2He の計算以来、ハイペロンの核ポテンシャルの形は Woods-Saxon 型とは限らないことが常識となっている。軽い Λ 核ではポテンシャルの中心部分にワインボトル型の盛り上がりができ、重い Σ 核では核表面だけに引力ポケットがあるような斥力ポテンシャルになっていると考えられている。

いずれの実験でも、ガンマ線分光実験で用いる Ge 検出器群 Hyperball-J あるいはその一部を数 100 keV の Ξ^- 原子 X 線を検出するために用いる。谷田君が実験責任者の E03 では、まず鉄の標的に Ξ^- を止めて X 線を測定する。その後、データをみながら標的をいくつか変えて系統的に測定することで、ポテンシャルの情報を得る。また、E07 では、Ge 検出器を emulsion のまわりにおいてデータをとっておき、emulsion の解析で Ξ^- が静止吸収されたことがわかった事象のみを選ぶことで、バックグラウンドのほとんどない Ag と Br の Ξ^- 原子 X 線のデータが得られると期待している。

H ダイバリオン H ダイバリオンは、1990 年代に BNL や KEK で盛んに探索されたが見つからず、ダブル Λ ハイパー核の再発見により、2 個の Λ より軽い H は存在しないことが明らかになっていた。しかし今井グループは、KEK-PS で行った 2 度の実験で、(K^-, K^+) 反応で生じた 2 個の Λ 粒子の不変質量分布をプロットし、いずれにおいても $\Lambda\Lambda$ と $\Xi^- p$ の質量の間に乏しい統計ながら盛り上がりを観測していた。これは、 $\Lambda\Lambda$ より重い (すなわち非束縛の) H ダイバリオンの存在を示しているのではないかと言われていた。最近、格子 QCD によるバリオン間力の計算によって、 $SU_f(3)$ 対称性があると QCM や bag model の予言の通り、flavor singlet チャンネル (H ダイバリオンチャンネル) に確かに引力芯が生じて軽い H が存在すること、さらに $SU_f(3)$ 対称性を破った計算でも、引力芯が残り $\Lambda\Lambda$ threshold の付近に H が存在することが示された。そこで高統計で不変質量分布を測り直そうという機運になった。

(K^-, K^+) 反応の標的周囲に大立体角の「ハイペロンスペクトロメータ」を設置して 2 個の Λ 粒子等の不変質量分布を測る実験を Ahn 氏と今井さんが責任者となって提案し、スペクトロメータの開発が始まった。長年探し求めていた H が見つかるだけでも快挙となるが、lattice 計算と協力して実験対象を検討し、狙いを定めて実験するという新しい研究スタイルが生まれたことは感慨深い。

その先へ 今後の 5~10 年程度にわたり J-PARC でこうした研究を進めることによって、Octet-Octet バリオン間相互作用の重要部分はほぼ明らかになるだろう。そして、核力が本当にわかった、といえる日が来ると思う。

さらに将来には、 $S = -3$ 系、すなわち ΩN 相互作用 (Decuplet-Octet 相互作用) や $\Xi\Lambda$ 相互作用なども研究したい。現在の我々の悲願というべき J-PARC ハドロン施設の拡張計画では、最大運動量 10 GeV/c の質量分離ビームラインを建設することとしているが、ここでは charm メソンや charm バリオンの入った原子核とともに、 $S = -3$ 系の研究が主要テーマとなっており、高橋仁氏ら若い人たちによって検討が進められている。

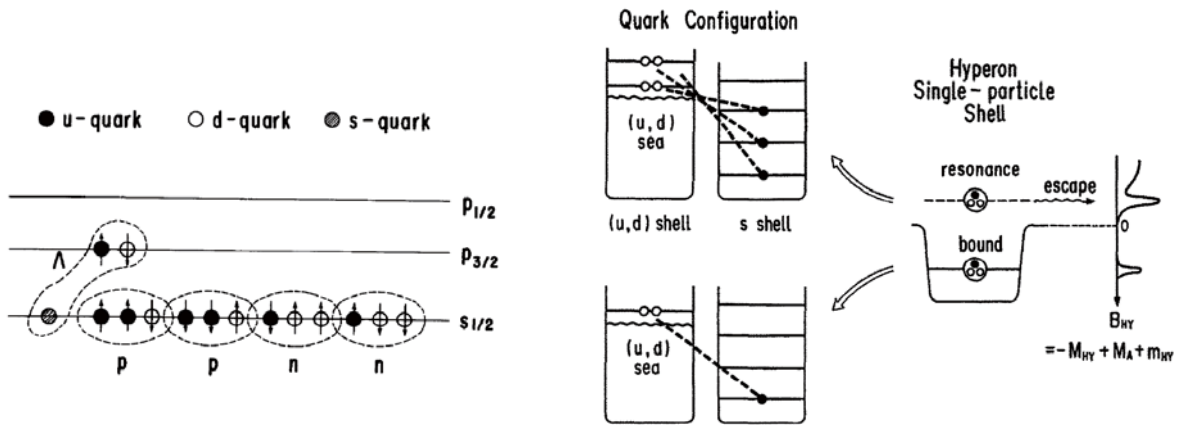


図 6: 山崎先生が描いた、クォークが核内で溶け出している絵。文献 [25] から引用。核の深部では核子が完全に融けてクォークがバラバラになっていると仮定する quark shell model なる極端なモデルを仮定すれば、左図のようにクォークレベルでのパウリ効果によって ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の overbinding problem が説明できる。(今では、over-binding problem は赤石さんらにより Σ - Λ coupling で説明されている。) また右図は、 Λ 粒子の u , d クォークと s クォークが生き別れになるため、 Λ の非束縛状態の幅が細いことが説明できるとする図。

3.2 核内のバリオンの

核内ハドロンの性質変化というのは、古くて新しい問題である。1980 年代後半、山崎先生が「原子核深部の核子は、核子としての identity を保っているのだろうか？クォークの閉じ込めが緩んで、核子は融けてしまっているかも知れない。ハイパー核でそれが分かる！」といった話を、図 6 のような絵をみせながら我々学生の前でよくしていた。この時の新鮮な驚きは今でも覚えている。EMC 効果が発見されて、核内核子のクォーク構造が自由核子とは違うことをみんな話題にしていた頃である。実際にはこの図ほど極端なことは起こっていないが、当時の私はまんまと騙されてハイパー核はすごい！と思った。

そんなわけで、当時から私は、 Λ を核内深部に入れたハイパー核のデータから（ここまで極端ではない場合でも）核内でのバリオンの性質変化がわかるに違いないと漠然と思っていた。この思いは今も変わらない。しかも今では、カイラル対称性の部分的回復による核内ハドロンの性質変化をとらえることで、ハドロンの質量獲得のメカニズムを実験的に確かめるという大きな課題がある。しかし、実際にはハイパー核の何をどう測ればいいのか？

一つには、すでに述べたように、核内 Λ の磁気モーメントであろう。山崎先生は、meson exchange current の効果とは別に、バレンス核子の核磁子が少し大きくなっているように見える、と昔から指摘しておられる [26]。核内の $0s$ 軌道の Λ の磁気モーメントはまさに理想的なプローブだ。ただ、カイラル対称性の部分的回復によって、 u , d クォークの構成子質量は数割軽くなるが、 s クォークの構成子質量の変化はずっと小さいとされている。 Λ のスピンは s クォークが担うので、核内 Λ の磁気モーメントの変化は実は小さいのかも知れない。(あるいはそうでないのかも知れない。) 核内にある Σ や Ξ の磁気モーメントに相当する量を引き出せないものかと考えている。

また、もうひとつ私が是非とも実験したいと思っているのがバリオンの弱崩壊の核内での変化である。分岐比は非常に小さいが、ベータ崩壊 ($\Lambda \rightarrow p\mu^- \bar{\nu}$, $pe^- \bar{\nu}$) のレートを測りたい。これは Λ

内の s クォークと、陽子内の u クォークの波動関数の重なりに依存するので、核内と自由空間では異なっていそうな気がする。

なお、ハイパー核弱崩壊の話が出たついでに述べておくと、非中間子崩壊 ($\Lambda N \rightarrow NN$) には、以前 $\Gamma(\Lambda n)$ と $\Gamma(\Lambda p)$ の比が実験と理論で大きく隔たっているという問題があったが、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ と ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ に関する精密な実験が SKS で行われ、理論の進展もあって解決した。その過程で、 Λ と N の中のクォーク同士が直接弱い相互作用をするというメカニズムが岡さんらによって提案されたが、その後、中間子交換の描像でも実験値は説明できることとなった。今後、非中間子崩壊に関して重要なのは、 $\Delta I = 1/2$ 則 (ハイペロンや kaon の弱崩壊ではアイソスピン I の変化は $3/2$ でなく $1/2$ になりやすいという現象論的法則) が中間子を出さない $\Lambda N \rightarrow NN$ でも成り立っているのかどうかである。そのために ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の非中間子崩壊の高精度測定の必要性が昔から指摘されている。阪口さんは J-PARC で (π^+, K^+) 反応による ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の測定と、特に難しい ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ についての (π^-, K^0) 反応による測定を提案している。

核内の深い単一粒子軌道のエネルギーは、核子の場合は実験で測定できないが、 Λ の単一粒子軌道エネルギーは測定できる。SKS の実験が始まった頃は、 ${}^{208}\text{Pb}$ のような重い核の中では Λ は融けてしまっているので深い Λ の単一粒子軌道のエネルギーはとても変なものになっているのではないかと漠然と期待していたが、SKS グループの出した ${}^{89}_{\Lambda}\text{Y}$ のスペクトル (図 7 左下) をみると、 s, p, d, \dots 軌道に相当するピークが等間隔で現れて、調和振動的な一体ポテンシャル中の単一粒子軌道のエネルギーと一致していた。 Λ が核内深部でも identity を保って運動しているのかのように見え、がっかりした。しかし、コアの励起した状態や Λ の LS 分岐状態が分離されて見えているわけではなく、図 7(上) のように、 Λ 単一粒子軌道エネルギーの精度は 1 MeV 程度であり、測定した核種も少ない。この程度のデータであれば、一体場の理論計算と一致しなくても、一致するようにパラメータを調整することでずれをパラメータに吸収してしまいうることができる。しかし、数 100keV FWHM という高分解能の $(e, e'K^+)$ 反応や (π, K^+) 反応のハイパー核分光実験が進展し、数 10 keV の精度で精密な単一粒子エネルギーのデータが取れると、世界が一変する。(ここでいう高分解能の (π, K^+) 反応は、拡張ハドロン施設に野海氏が建設を提案している運動量分散整合型の大強度高分解能パイオンビームラインで実現する。2 GeV/c のビームで、図 7(右下) のような 200 keV FWHM の質量分解能の (π, K^+) 反応ハイパー核スペクトルが取れる。) 具体的にどうなるかわからないが、こうした高分解能分光によって核内のバリオンの姿に関わる情報が得られると思っている。ただし、そうした高精度データを解釈するには、新しい精密な理論的枠組みが必要となるだろう。原子核理論にとっても大きなチャレンジになると思う。

重いハイパー核のガンマ線分光では、 $0p_{3/2}, 0p_{1/2} \rightarrow 0s_{1/2}$ の E1 遷移がさまざまな質量数で測定でき、 s 軌道と p 軌道の間隔だけでなく、小さい LS 分岐も正確に決定できる。原子核の LS 分岐の起源は、核力の LS 力だけでなく、テンソル力の効果や多体効果の寄与があり、中性子過剰核で LS 分岐がどう変化するかが現在大きな話題となっている。核子との間で one pion exchange が禁止されテンソル力や多体効果も小さい Λ の場合、 Λ の単一粒子軌道に LS 分岐がどう現れるかは、原子核の LS 分岐の起源をきちんと理解するための重要な情報となると思う。ただし、 ΛN 間では、 Λ スピンに依存する二体 LS 力も小さい。よって、精密ガンマ線分光による高精度で系統的なデータが必要である。

原子核で単一粒子運動という近似的描像とそれに基づく殻模型がなぜうまくいくのか、どの程度まで有効なのかは定量的には理解されていない。この原子核物理学の根本的課題に答えるため

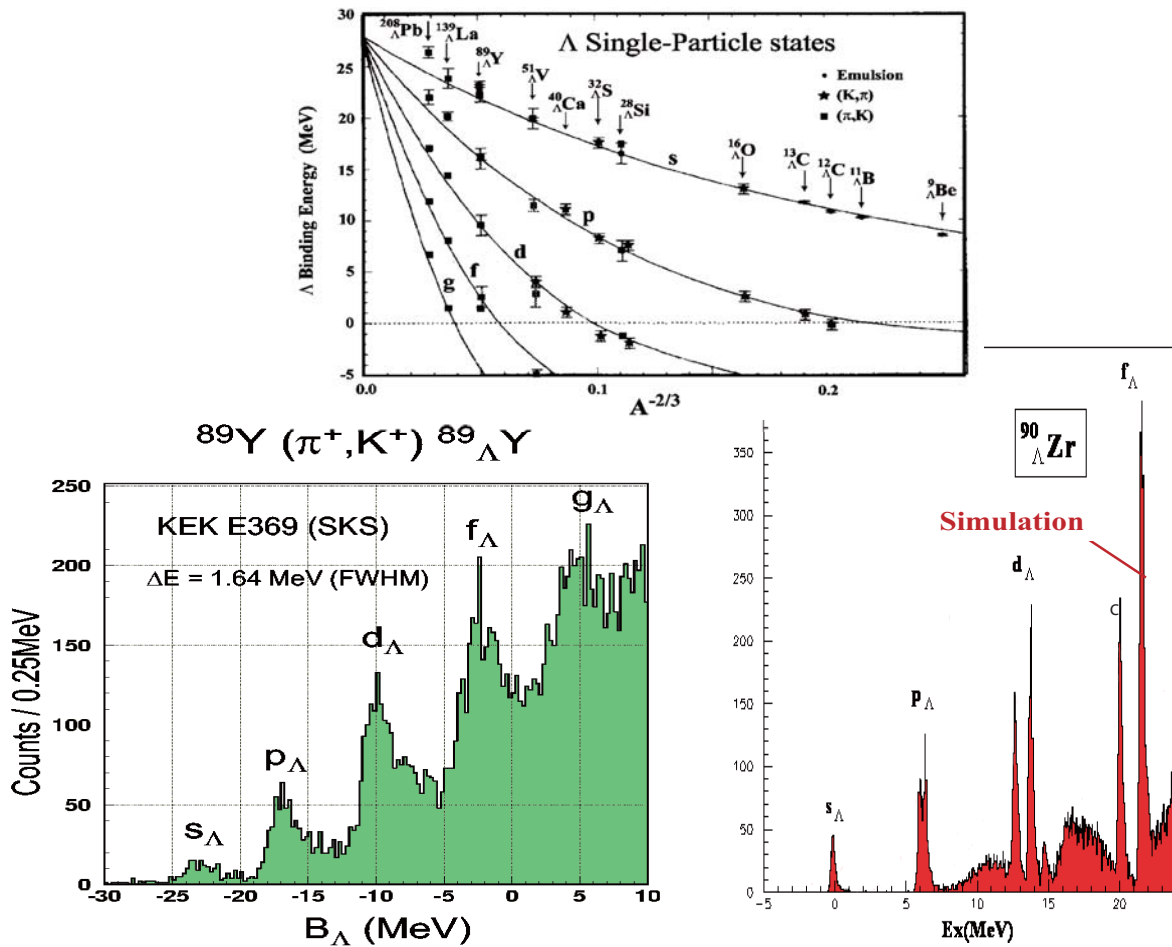


図 7: (上) Λ ハイパー核データから得られた Λ 単一粒子軌道のエネルギー [5]。 (左下) (π^+, K^+) 反応によって SKS で測定した $^{89}_{\Lambda}\text{Y}$ のスペクトル。 Λ の単一粒子軌道が観測されている [11]。 (右下) 野海氏が提案している大強度高分解能ラインを用い、 (π^+, K^+) 反応でハイパー核 $^{90}_{\Lambda}\text{Zr}$ を生成したときの予想スペクトル。

にも、 Λ ハイパー核の精密なデータが今後大きな役割を果たすことと思う。

素粒子物理と、原子核 – 原子分子 – 凝縮物質・生体物質と連なる物質科学との間に大きな溝があることは、物理屋として許し難いといしか言いようがない。クォークからハドロンが作られる謎と、ハドロン(バリオン)から原子核が作られる謎を理解したい。ハドロン、核力、原子核のそれぞれに内在する根本的な問題を、ストレンジネスを使って少しずつ解いていきたいと思っている。

4 おわりに

私がこの分野に入った頃には、核研所長は山口先生に代わられていた。私は杉本先生と直接お話しした記憶がないが、中井先生の言葉の端々から、物理に厳しい杉本先生のイメージができあがっていた。たまにお会いしても恐れ多くて口を利けなかったのである。

私が学部4年の頃、中井先生がハイパー核のセミナーをしようと言い出したことがあったが、ピンと来なかったし、山崎先生がビームラインを転極してハイパー核のデータを取ったときも何が

面白いのかまったく分からなかった。しかし、山崎先生や杉本先生、中井先生が昔夢中になっていた(と聞いている)インビームガンマ分光や磁気モーメント測定を、私は今ハイパー核を対象に夢中になってやっている。杉本先生・中井先生からは、実験家として厳しく徹底的に取り組むことを学び、山崎先生からは想像力を展開させて物理を楽しむことを学んだ。いずれもまだ足下にも及ばないが、こうして大先生方から薫陶をいただいていたことを大変有り難いことと思う。

参考文献

- [1] T. Yamazaki et al., Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 102.
- [2] R. S. Hayano et al., Phys. Lett. B231 (1989) 355;
原田融, 日本物理学会誌 48 (1993) 804.
- [3] T. Nagae et al., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 1605;
永江知文, 原田融, 日本物理学会誌 53 (1998) 274.
- [4] T. Hasegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 224;
T. Hasegawa *et al.*, Phys. Rev. 53 (1996) 1210.
- [5] O. Hashimoto and H. Tamura, Prog. Part. Nucl. Phys. 57 (2006) 564.
- [6] H. Bhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 4321;
O. Hashimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 042503
- [7] S. Ajimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 3471;
S. Ajimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4052.
- [8] 中井浩二, 日本物理学会誌 61 (2006) 731.
- [9] 藤井優, 三好敏喜, 橋本治, 日本物理学会誌 59 (2004) 772.
- [10] H. Tamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5963.
- [11] H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. C64 (2001) 044302.
- [12] 田村裕和, 谷田聖, 日本物理学会誌 56 (2001) 419.
- [13] K. Tanida *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 1982.
- [14] 鷓養美冬, 田村裕和, 日本物理学会誌 67 (2012) 14.
- [15] H. Akikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 082501;
H. Tamura *et al.*, NUcl. Phys. A754 (2005) 58c.
- [16] M. Ukai *et al.*, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 232501;
M. Ukai *et al.*, Phys. Rev. C 77 (2008) 054315.
- [17] S. Ajimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 4255.

- [18] D. J. Millener, J. Phys. Conf. Ser. 312 (2011) 022005.
- [19] H. Tamura, Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 02B012.
- [20] 「日本の核物理の将来レポート」原子核研究 57 Suppl. 2 (2013) 101.
- [21] H. Noumi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 072301.
- [22] P.K. Saha *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 052502.
- [23] S. N. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 012502.
- [24] H. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett 87 (2001) 212502; K. Nakazawa and H. Takahashi, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 335.
- [25] T. Yamazaki, Nucl. Phys. A446 (1985) 467c.
- [26] T. Yamazaki, Phys. Lett. 160B (1985) 227.