ストレンジネス核物理の流れ：KEK-PS から J-PARC へ

永江　知文
原子核ハドロン物理学研究室

1. ストレンジネスと原子核物理

通常の原子核は陽子と中性子から構成され、クォークのフレーバーでいうとアップ(u)とダウン(d)という２種類のフレーバーから成るクォーク多体系である。そこには、ストレンジネスという自由度が顕わに顔を出すことはない。

しかし、高温や高密度での核物質のように、ややエキゾティックな状態を考え出すと、ストレンジネス自由度の理解がたちまち重要となってくることがわかる。その極端な例として、量子色力学の基底状態として最も安定なのは、通常の原子核ではなくて、u, d, s の三種類のクォークからなるクォーク物質なのではないか、という「クォーク物質仮説」に対して、我々は確固たる答えを持っていないのが現状である。原子核密度の数倍を超えるような高密度状態が実現していると予想される中性子星の内部において、ストレンジネスがどのような役割を演じているのかに答えを出すことも、原子核ハドロン物理学の大きな課題の一つといえる。

我々が研究を進めているストレンジネス原子核物理は、そのような研究の流れとみることができる。

2. ハイパー核研究の歴史

ハイパー核は、1952 年に宇宙線によって生成されたハイパーフラグメントとして原子核乾板のなかで発見された。V 粒子として、ストレンジネスを持つΛ粒子や K 中間子が発見されてから、間もなくのことである。

その後、加速器によって生成される K^- 中間子を利用してハイパー核の研究が進められる。K^- 中間子を原子核乾板中に止めると、K 中間子原子を経由し K 中間子が原子核へ吸収されることによりいろいろなハイパーフラグメントが生成される。そのハイパー核種の同定には、Λハイパー核の基底状態からの弱崩壊が用いられた。200 ps 程度の寿命の間に数十 μm 程度飛んでから崩壊す

るという特徴的な崩壊パターンを見つけ、崩壊点でのエネルギー保存からΛハイパー核を同定する。あまり重いハイパー核では中性子の放出により、見えないエネルギーがあるため同定が困難となることが多く、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$から${}^{15}_{\Lambda}\mathrm{N}$までの軽いΛハイパー核の束縛エネルギーが測定された。また、弱崩壊の崩壊様式を利用して、基底状態のスピンとパリティの同定も、いくつかのハイパー核について行われた。

ハイパー核の励起状態の研究は、1970 年代になってヨーロッパの CERN-PS で、In-flight による(K^-, π^-)反応が利用されることとなって初めて可能となった。この反応は、標的原子核内の中性子をΛ粒子に転換する。特定の K 中間子入射運動量を選ぶと、生成されるΛ粒子の運動量をゼロにすることができる。この特徴を生かして効率よくΛハイパー核の束縛状態を生成するわけである。ハイパー核のエネルギー準位は、missing-mass の測定により行うため、Λ粒子が p 軌道（軌道核運動量 1 の状態）に入った準位のエネルギーを調べることが可能である。その結果、Λハイパー核におけるスピン軌道スプリッティングが、通常核に比べて桁違いに小さいということが発見された。核子間のスピン軌道相互作用に比べて、Λ核子間のそれが小さいということは、新たな知見であった。そこで、Σ核子間のスピン軌道相互作用は、どうなっているかに大きな興味が持たれた。しかし、Σ粒子が核内にあると ΣN→ΛN という強い相互作用による転換が起こるために、Σハイパー核準位は不安定であり数十 MeV 以上の広い幅を持つことが予想された。すなわち、Σハイパー核は、存在したとしても分光学は成り立たないであろうと考えられた訳である。ところが、CERN-PS の K 中間子ビームがシャットダウンされる直前に行われた実験では、幅 10 MeV 以下のΣハイパー核の励起状態が観測されたのである。

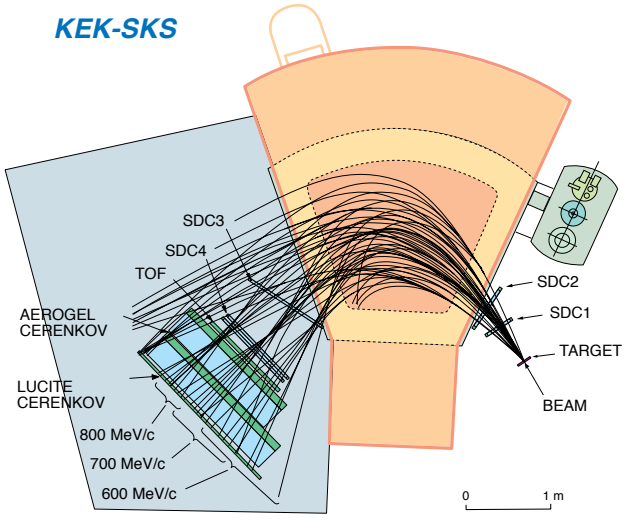
このΣハイパー核の幅の問題が中心課題となっていた時期に、我が国でのハイパー核研究が、KEK 12 GeV 陽子シンクロトロン(PS)によって開始された。

3. KEK-PS での研究の進展-米国 BNL-AGS での日米協力も交えて

KEK-PS でのハイパー核研究は、1984 年頃から、東大の山崎グループによって開始された。KEK-PS の K^-中間子ビーム強度は、米国 BNL の AGS 加速器でのそれに比べて２桁以上弱かったために、昔の静止(K^-, π^-)反応を使ったΣハイパー核の研究からスタートした。CERN-PS での実験データ以来、米国の BNL でΣハイパー核の実験が引き継がれ、いろいろな核で幅の狭いΣハイパー核の

励起状態が報告されていた。KEK-PS でも炭素標的において似たような状態が観測されたと始めは報告されたが、後に統計を上げた測定を行ったところ確認できなかった。このように出だしは必ずしもスムーズではなかった。しかし、思いがけず、北大の原田・赤石によって予言された${}^{4}_{\Sigma}$Heの束縛状態の発見（早野、應田ら）をもたらすこととなった。

Σハイパー核の研究は、その後、やはり In-flight(K^-, π^-)反応を用いるべきだということになり、BNL-AGS で日米の協力により進められた。AGS のビーム強度は、この時期、年々増強が行われ、高統計のデータが得られるようになった。一連の実験によって、非束縛領域における幅の狭いΣハイパー核の励起状態の存在は否定され、一方、束縛状態として${}^{4}_{\Sigma}$Heの存在が確立した（永江、福田ら）。



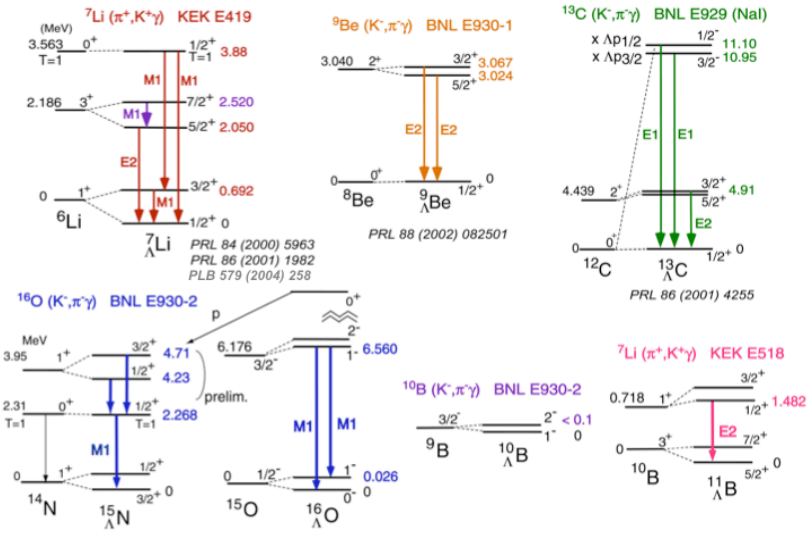
SKS スペクトロメーター

(π^+, K^+)反応をΛハイパー核分光に利用しようというアイディアは、米国の BNL-AGS において実証され、${}^{89}_{\Lambda}$Yまでの Λ粒子の一粒子準位が見事に測定された。この反応は、K^-ビーム強度において BNL-AGS に後れをとる KEK-PS にとって有利な反応であった。ハイパー核分光を行うには、入射 π ビームの運動量を解析する必要があるため、使用できる π ビームの強度は、加速器ビーム強度ではなく、測定器の能力によって制限される。この意味では、BNL-AGS も KEK-PS も同じ条件である。そこで、散乱 K 中間子を捉える高性能のスペクトロメーターがあれば、BNL-AGS を凌駕できるのである。大型の超伝導電磁石からなる SKS というスペクトロメーターの建設が、旧東大原子核研究所中間エ

ネルギー部（本間、橋本、永江ら）と KEK（新冨、土井、青木ら）との協力によって進められた。2 MeV_{FWHM} という SKS が実現したエネルギー分解能と 100 msr という大立体角は、ハイパー核分光において日本が世界をリードする基礎を築いたといえる。

SKS によって、Λハイパー核の質量数領域は、$^{139}_{\Lambda}$La、$^{208}_{\Lambda}$Pbへと大きく拡がった。また、p 殻領域でも $^{7}_{\Lambda}$Li、$^{9}_{\Lambda}$Be, $^{13}_{\Lambda}$C、$^{16}_{\Lambda}$O などについて新たな高分解能スペクトルが得られた。$^{9}_{\Lambda}$Be では、Λハイパー核に特徴的な対称性を持つ状態の観測に成功した。エネルギー分解能は、その後の実験において改良が進み 1.45 MeV が達成された。また、(π^-, K^+)反応を使ったΣ^-生成実験や、中性子過剰なΛハイパー核の生成実験も試みられるようになった。この実験によりΣ^-原子核ポテンシャルは、中重核領域で斥力的であることが示された（野海、Saha ら）。

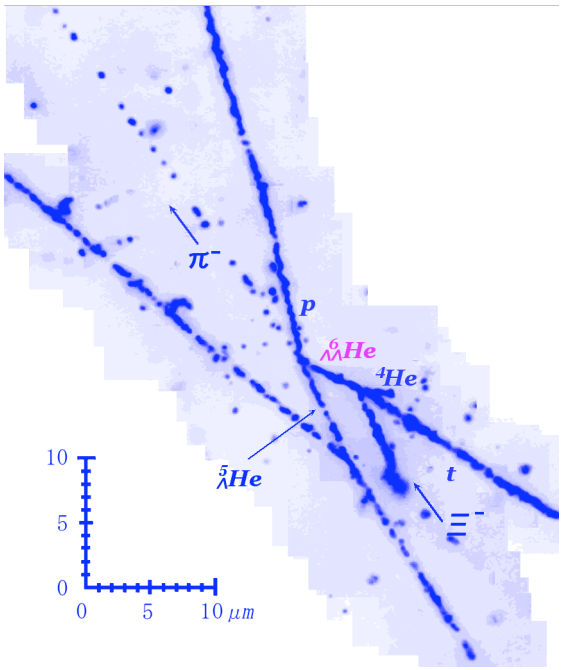
(π^+, K^+)反応は、コインシデンス実験においても優れていることが実証された。その一つが、Λハイパー核の弱崩壊における放出中性子の測定に成功したことである。二個のバリオン間の弱相互作用の研究として、Λハイパー核の非中間子弱崩壊プロセスは、ユニークな研究対象である。なかでも、そのスピン・アイソスピン構造には不明な点が多かったが、SKS を用いた中性子の直接測定により、この問題は大きな進展を見せた。もう一つのコインシデンス実験の例は、ハイパー核ガンマ線測定の成功である。



測定されたハイパー核ガンマ線のまとめ（田村）

ハイパー核のガンマ線分光は、この分野の研究者の夢であったが、実験的な困難のためなかなか成功に至らなかった。田村、谷田らは、14 台のゲルマニウム検出器からなる Hyperball を建設し、SKS を用いて最初のハイパー核ガンマ線実験を成功させた。いったんガンマ線が観測されてしまうと、その後は、BNL-AGS での(K^-, π^-)反応による一連の測定にも成功し、p 殻領域での精密ハイパー核ガンマ線分光が花を開いた。

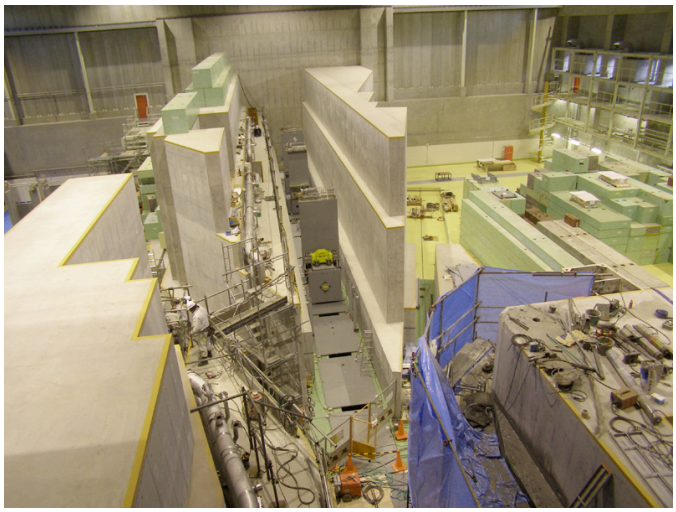
ストレンジネス量子数 S=-2 の系の研究では、K^-強度において勝る BNL-AGS が先んじる格好で、特に理論的に注目されていた H ダイバリオン(uuddss)の探索が精力的に行われた。しかし、残念ながら H ダイバリオンは発見できなかった。一方 KEK-PS では、原子核乾板と磁気スペクトロメーターを組み合わせたハイブリッド・エマルジョン法による二重Λハイパー核の研究が仲澤、今井らを中心に進められた。それまで、二重Λハイパー核の存在を示す証拠は、古い原子核乾板中の２事象のみであった。KEK-PS E176 実験での新たな１事象の発見は、これを裏付ける大きなステップとなった。しかし、その束縛エネルギーの決定には次の実験 E373 を待たねばならなかった。この実験では有名な長良事象を発見し、${}^{6}_{\Lambda\Lambda}$Heを同定してその束縛エネルギーを決定することに成功した。



長良事象

4. J-PARC での期待

大強度陽子加速器施設 J-PARC は、茨城県東海村に建設が進む次世代の加速器施設である。3 GeV 陽子シンクロトロンからの陽子ビームは、中性子やミュオンビームの生成に利用され、物質生命科学の研究が中心に行われる。50 GeV 陽子シンクロトロンからの陽子ビームは、世界最高強度の K^- ビームやニュートリノビームの生成に利用され、原子核や素粒子物理の研究が中心に行われる。K^- ビームが利用可能となるハドロン実験ホールは、平成 19 年の 7 月に完成したところである。現在、平成 20 年度内のビーム取り出しに向けて、ビームラインの整備が急ピッチで進められている。



建設が進むハドロン実験ホールの内部

このハドロン実験ホールでの新しい実験については、実験課題審査委員会が開かれ、たくさんの実験提案が既に認められている。その中でも、まず最初に実施すべき実験としてリストアップされたのが、所謂 Day 1 実験と呼ばれている次の５つの実験である。

E05: Ξハイパー核の分光実験（永江）
E13: ハイパー核ガンマ線分光実験（田村）
E19: (π^-, K^-)反応によるペンタクォーク探索実験（成木）
E17: K 中間子 ^{3}He 原子からの X 線の測定実験（早野、應田）
E15: K 中間子原子核の探索実験（岩崎、永江）

この中でも、Ξハイパー核の束縛状態を見つけようとする E05 実験は、S=-2

のマルチストレンジネスの研究の糸口となる実験であり、大きな成果が期待されている。BNL-AGS では成し得なかった(K^-,K^+)反応による S=-2 の分光にチャレンジするものである。このために既存の SKS スペクトロメーターを改良することが着々と進められている。

次世代のハイパー核ガンマ線分光のために Hyperball-J と呼ばれる新たなガンマ線検出器システムの建設も行われている。Λハイパー核中でのΛ粒子の磁気能率の変化に関心が持たれている。

K 中間子と原子核との相互作用は、最近になって大きく注目されるようになった。その引力の大きさが 50 MeV なのか 100 MeV なのか、はたまた 150 MeV なのかという強さには不定性があるものの、強い引力であることが予想されている。その引力によって K 中間子と原子核との束縛状態が形成されると、原子核が強く収縮する可能性が指摘されている。この系は、中間子と原子核という新たな束縛状態のパラダイムを切り開くものであり、ストレンジネスの入ったハドロン多体系としても極めてユニークなものである。J-PARC において、その存否が確定することが待たれている。

5. まとめ

KEK-PS での 20 年以上にわたる研究の成果は、利用できるビーム強度のハンディキャップを様々な検出器系の工夫により克服しながら実現されてきた。また、これには我が国の実験と理論の強い協力があったことも強調しておきたい。これから実験が開始されようとしている J-PARC では、大強度の K^-ビームと高性能の検出器系を組み合わせることにより、これまで不可能であったような新しいスペクトロスコピーが切り開かれようとしている。

京都大学の我が研究室は、これらの実験の牽引力となるべく実験準備を進めているところである。