

KEKにおける原子核物理のロードマップ

第一版

核物理委員会

素核研将来計画検討タスクフォース

2020年6月1日

1 21世紀における原子核物理の課題

原子核物理学は、今から遡ること百年以上前のラザフォードによる原子核の発見に始まる、歴史をもった学問領域である。20世紀における先端加速器の発達と測定器技術の向上、それと並行した素粒子・原子核物理学の進展とを歯車として原子核の描像も大きく変遷してきた。陽子と中性子を構成要素とする伝統的な原子核の描像は、これらのハドロン粒子を構成するクォークとグルーオンのダイナミックな世界へと進化を遂げた。宇宙初期のビッグバンにおいて実現したと考えられていた高温のクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態は、RHICやLHCといった高エネルギー重イオン衝突型加速器によって再現され、その特異な性質が明らかになりつつある。近年観測が可能となった連星中性子星合体からの重力波は、中性子星中心部の超高密度ハドロン／クォーク物質の物性を教えてくれるに違いない。

また、人類によって積み上げられた、これらの原子核物理学の知識は、宇宙初期の約3分間に何が起きたのか、太陽を代表とする星の燃料が何であるかを突きとめ、星の内部での元素合成のシナリオを作りあげてきた。不安定核 (RI) ビームという武器を手にした人類は、原子核の研究対象領域を一気に拡げ、中性子ハローや中性子スキンといった中性子過剰な核に特徴的な構造を発見した。また、新しい魔法数に見られるようにその広い領域に目をやると従来の常識を打ち破るような新奇な構造が出現したりする。

その結果、物質を織りなす原子 → 原子核 → ハドロン粒子 → クォークという階層世界の存在が明らかになった。一方、この物質の階層構造を形成する基となるクォークとグルーオンの世界を記述する力学は量子色力学 (QCD) として確立している。このQCDは、クォーク・グルーオンからなる $10^{-19}\text{m}(10^{-4}\text{fm})$ のマイクロの世界から、半径 10^4 m の巨大な原子核である中性子星の世界までの 10^{23} にも及ぶ大きくスケールの異なる物質を記述する力学と考えられている。このQCDによって織り上げられた多様な物質・宇宙の進化と成り立ちを解明していくことが、これからの原子核物理学の中心課題であり、以下のような基本的な疑問に象徴される。

- 宇宙で目にする物質はクォークからどのように生成されてきたのだろうか？
- クォーク多体系の多様な存在形態の全容はつかめたのだろうか？
- 中性子星のような高密度物質は何からできているのか？
- ハドロン質量の起源は理解できたか？
- クォーク、ハドロン、原子核という階層構造を支配する相互作用を十分理解できたのか？
- 重元素合成はどこで起きているのか？

図1は、原子核物理学の研究の目標を、日本における研究の動向と関連させて模式的に示したものである。不安定原子核ビーム施設 (RIBF/KISS-2)、大強度陽子施設 J-PARC、海外での高エネルギー重イオン衝突実験 (LHC ALICE) などを駆使して、ストレンジ物質、中性子物質、QGP などの特徴的なクォーク・ハドロン物質の研究を通じて、元素合成、超高密度物質、超高温物質を解明し、量子色力学 (QCD) が織りなす多彩な物質世界を明らかにする。

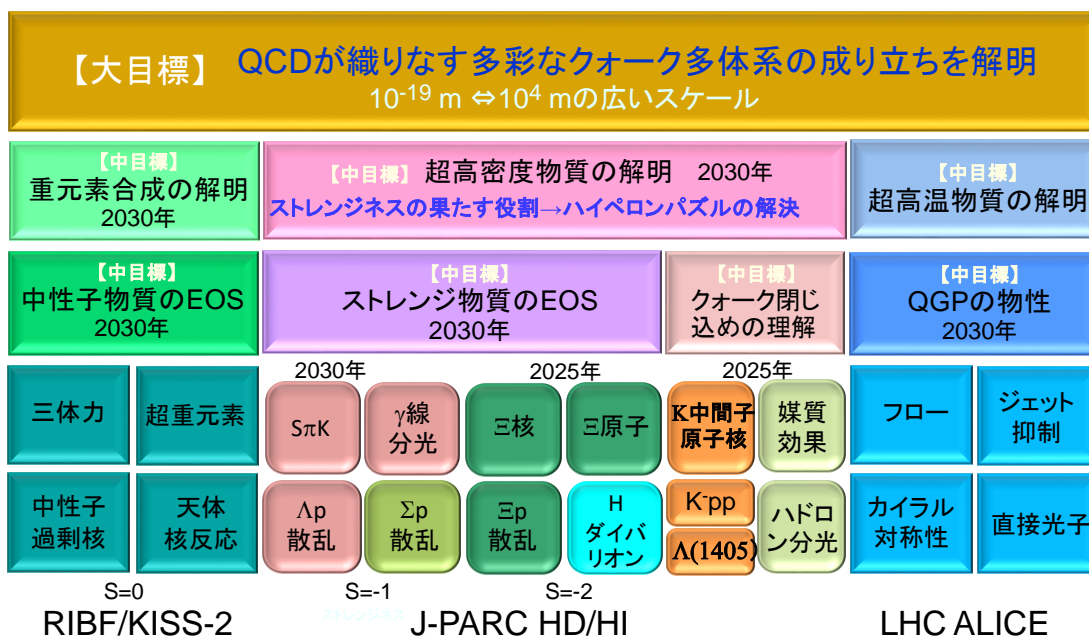


図 1: 原子核物理学が目指す目標と、日本における研究の動向。不安定原子核ビーム施設、大強度陽子施設 J-PARC、海外での高エネルギー重イオン衝突実験などを駆使して、量子色力学(QCD)が織りなす多彩な物質世界をストレンジ物質、中性子物質、QGPなどのクォーク・ハドロン物質の研究を通じて解明する。なお、この図では J-PARC における研究課題を中央下部にやや詳しく記載している。

1.1 我が国における原子核分野の大型計画の現状

原子核物理学の研究のための大型加速器施設としては、大強度陽子加速器、高エネルギー電子加速器、高エネルギー重イオン加速器、不安定原子核ビーム加速器という4つの潮流がある。我が国においては、茨城県東海村の J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) と埼玉県和光市の RIBF (Radioactive Isotope Beam Facility) という二つの大型加速器施設が稼働している。J-PARC では 30 GeV の大強度陽子シンクロトロンにより大強度 K^- ビームを生成し、2009 年より始まったストレンジネスの入った原子核の研究が本格化してきている。理化学研究所の RIBF では 2007 年より稼働し始めた大型超伝導リングサイクロトロンにより中性子過剰な不安定原子核ビームを生成し、超重元素探索、特異な構造をもった原子核の研究、宇宙における元素合成の謎に迫る研究が大きく進展している。2020 年における日本学術会議による「マスタープラン 2020」の策定においては、原子核分野からは、

1. 大強度陽子ビームで極める宇宙と物質の起源と進化
2. RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進
3. J-PARC における重イオン加速による超高密度ストレンジネス核物質の研究

という3つの大型施設計画を提出した。原子核コミュニティとしては、従来に引き続き、J-PARC ハドロン実験施設の高度化と RIBF の高度化を最優先課題と位置づけた。結果と

して、このうち 1. 大強度陽子ビームで極める宇宙と物質の起源と進化 (ハドロン実験施設の拡張計画を主とする) は、31 件の重点大型研究計画に選ばれた。また、

4. 高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ相の解明

5. 電子・イオン衝突型加速器 (eIC(Electron Ion Collider)) 計画

という 2 つの国際共同研究である大規模研究計画を提出した。前者は、超高温・高密度下のハドロン/クォーク物質を生成し、クォーク・グルーオン・プラズマへの相転移機構、その相構造や物性などの探究を目的とする。後者は、陽子および原子核の三次元的内部構造や原子核内部におけるグルーオン飽和の解明を目指すものである。

これまで、高エネルギー重イオン加速器と高エネルギー電子加速器を用いる研究については、基本的には海外の加速器施設での国際共同研究によって進めることとしてきた。今回もこれを踏襲したが、新たに J-PARC での重イオン加速が提案されたことは、今後の検討を要する。また、今回申請を見送った、東北大学電子光理学研究センターや大阪大学核物理研究センターの将来計画についても真摯な議論が必要とされる時期に来ている。

1.2 海外における大型加速器計画の動き

ヨーロッパでは 2017 年に NuPECC により Long Range Plan 2017 が策定された。これによれば、ヨーロッパのフラッグシップ計画は FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research) である。FAIR については、建設予算の分担に関して、ドイツのローカル政府が不足分をカバーするということが最終的に建設が認められ、建設が開始された。しかし施設建設計画のスケジュールはまだまだ予断を許さない状況であり、ビームが出るのは 2025 年過ぎではないかと言われている。1) 原子プラズマ物理、2) 高密度核物質、3) Rare Isotope 実験、4) 反陽子ビームによるハドロン分光、の 4 つの大きな研究の柱が謳われている。ヨーロッパでは FAIR より小さな domestic な計画として、GANIL の SPIRAL2 もコミッション中である。また、EURISOL なども計画されている。高エネルギー重イオン衝突加速器としては、CERN の LHC ALICE 実験がしばらく走り続けることが既定路線である。

米国では、NSAC によって 2015 年に Long Range Plan が策定されている。彼らの最優先課題は、電子・重イオン衝突型加速器 (eIC) である。この計画では、核内でのグルーオン分布を精密に調べる。陽子スピンへのグルーオンスピンの寄与を決定するとともに、未解明のカラーガラス凝縮状態を研究することを目的としている。その建設時期は、2025 年以降となるはずで、それまでに、電子加速器施設ジェファーソン研究所 (J-Lab) のビームエネルギーを 12 GeV に増強し (既に稼働中) て、陽子内部のパートン分布の 3 次元構造やグルーボールやハイブリッド粒子などの探索が進行している。最近になって eIC の建設サイトが BNL に選ばれたところである。またこれと並行して、ミシガン州立大学に FRIB(Facility for Rare Isotope Beams) の建設が進められており、正式には 2022 年頃の完成予定とされているが、2021 年頃に早まりそうな勢いである。

2 J-PARCにおける原子核ハドロン物理の現状と将来

施設概観

J-PARCの主リング陽子シンクロトロンでは30 GeVのエネルギーをもつ陽子ビームが遅い取りだし方式で取り出され、 K 中間子、 π 中間子、ミューオンなどの様々な二次粒子ビームの生成に利用されている。(ニュートリノビームは速い取り出し方式で別途取り出される) 2019年現在で50 kWのビームパワーをもつ陽子ビームが取り出されている。2019年末には95 kW対応の生成標的に交換されて、ビームパワーの増強が期待されている。また、2021年には主リング電磁石電源の更新が予定されており、より安定で時間構造が滑らかなビーム取り出しとなる予定である。100 kWを超えるような大強度のビームに備えて、新しい冷却方式の生成標的の開発も進められている。遅い取り出しビームは、ハドロン実験ホールに導かれてビーム輸送ビームライン上でランバートソン電磁石によりごく一部のビーム(現在は、1時間当たり 1.2×10^{13} 陽子)を高運動量ビームライン(High-p)へ導くと同時に、残りの一次陽子ビームは二次粒子ビーム生成標的(T1)に照射される。T1標的からは、荷電 K^- ビームが、K1.8/K1.8BRと呼ばれるビームラインに取り出される。1段目の静電セパレーターの下流で左右にビームが振り分けられK1.8BRと呼ばれる最大運動量1.1 GeV/cのビームラインか、もう一段の静電セパレーターを通して最大運動量1.8 GeV/cのK1.8というビームラインに取り出される。T1標的からは中性電荷 K 中間子ビームライン(K_L)も分岐しておりK1.8/K1.8BRとの同時取り出しが可能である。

K1.8ビームラインでは、最近ではストレンジネス(S)=-1の Λ ハイパー核の γ 線分光(E13)や、 $\Sigma^\pm p$ 散乱実験(E40)が実施されてきた。また、 $S=-2$ の二重 Λ ハイパー核探索がハイブリッドエマルジョン法(E07)により行われたところである。これからは、 Ξ ハイパー核(E70)や H ダイバリオン探索(E42)、 Ξ 原子からのX線測定(E03)などの実験プログラムが予定されている。一次陽子ビームパワーの増大とともにやっと本格的な実験が可能となってきた。K1.8BRビームラインでは $K^-(\bar{K})$ と原子核との束縛状態としての $S=-1$ のハドロン多体系の研究が進められている。最も軽い系と捉えられる $\Lambda(1405)$ の構造の研究(E31)や、基本となる K^-pp 束縛状態の実験(E15)が行われ、成果が上がっている。より精密な測定へ向けて検出器とビームラインのアップグレードが計画されている。高運動量ビームラインは2020年5月より稼働を開始し、ハドロン粒子の質量の起源に迫るベクトルメソン質量の核媒質中での変化を調べる実験(E16)が今始まったところである。

J-PARCで目指す原子核物理

現在J-PARCでは、ストレンジネス原子核物理学を主な中心課題として研究を推進している。本格化してきたマルチストレンジネス原子核の研究は、世界でもJ-PARCが圧倒的強みをもつ課題であり、ストレンジ物質の状態方程式(EOS)を解明するために不可欠なものである。ストレンジネス $S=-1$ のバリオン間相互作用の短距離での振る舞いと合わせて、J-PARCの中期的な基幹的研究テーマとなっている。その目指すところは、中性子星の内部に存在すると考えられている高密度物質の解明である。これには、不安定核ビーム実験施設で進められている中性子物質のEOSの解明に向けた研究との連携や、スーパーコンピュータを使った第一原理計算や大規模シミュレーション、格子QCD計算などとの連携が不可欠であり、実際にこうした連携研究も近年進んできた。さらに中性子星の研究は、原子核物理学を要として、重力波を含む天文観測や天体物理学、素粒子物理学、物性物理学

などにもまたがる壮大なサイエンスとなっている。ストレンジネス核物理については、以下 2.1, 2.2 節で詳しく述べる。

J-PARC での原子核物理のもう一つの柱は、ハドロンの質量の起源と構造とを理解するための研究である。QCD に基づいてクォーク・グルーオンからハドロンの階層が形作られる仕組みを解明することは、素粒子物理学と、ハドロン・原子核・原子分子とつながってゆく「物質科学」との間をつなぐ極めて基本的な課題である。2.3 節に述べるように、J-PARC では高エネルギーのハドロンビームを用いた実験によって今後大きな発展が期待される。

一方、2.5 節で述べるように、J-PARC で重イオンビームを加速することによって、極めて高密度の核物質を直接生成して、ハドロン相からクォーク相への高密度領域での相転移を探索することができる。この研究は、ヨーロッパでの LHC ALICE 実験で進められる高温 QGP の研究とともに、QCD の作り出すクォーク多体系の相構造 (QCD 相図) の全体像を解明することにつながる。こうして、図 1 の「QCD によってもたらされる多様な物質宇宙の解明」という大目標に迫ることが期待される。

2.1 ストレンジネス核物理: $S=-1$

Λ ハイパー核の構造研究は古くから行われてきたが、特に 1990 年代に KEK-PS で SKS スペクトロメータを用いて行われた (π^+ , K^+) 反応の分光実験は、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ から ${}^{208}_{\Lambda}\text{Pb}$ までの広い質量数範囲で核内の Λ 一粒子軌道を明らかにし、 ΛN 相互作用の強さの明確なデータを与えた。一方、90 年代末からは Λ ハイパー核精密ガンマ線分光実験により p 殻 Λ ハイパー核 ($A=7-16$) の束縛状態の詳細なレベル構造が keV オーダーの高精度で測定され、そこからスピンに依存する ΛN 相互作用の大きさが定量的に求められた。このように核構造のデータから逆に 2 体相互作用の情報を定量的に引き出すことは、従来の核物理の歴史にはない異例の手法だが、これが成功したことはハイパー核研究の大きな成果だったと言える。しかし最近になって、中性子星内部を理解するには、 YN の 2 体力だけでなく YNN のような 3 体力の情報が不可欠であることがわかった (次節参照)。多体効果の大きい原子核のデータのみからでは 2 体力と 3 体力を明確に区別して引き出すことは不可能であり、そのため次節に述べる高精度の ΛN 散乱実験が必要となる。一方、広い質量数範囲のハイパー核の精密データも一層重要となっている。特に、3 体力を引き出すのに必要なのは、核物質中の Λ の束縛エネルギーの密度依存性であり、後に第 2.1.3 節で述べる $S\pi K$ 計画によって、広い質量数のハイパー核で Λ 一粒子エネルギーを精密に測定する必要がでてきた。

2.1.1 ハイペロン散乱実験

核子多体系である原子核の構造を研究する上で、詳細な二核子間の散乱データとそれを基に構築された現実的な核力モデルは必要不可欠な武器である。同様にハイペロン核子 (YN) 相互作用はハイパー核構造を調べる上で非常に重要な基礎データであり、またこの核力の特に短距離での振る舞いを記述するクォーク描像に基づいた理論モデルを検証するためにユニークな役割を果たす。これらを調べるにはハイペロンと陽子の散乱実験がもっとも直接的であるが、ハイペロンの短い寿命のために実験的に難しくデータが非常に乏しいというのが長きにわたる問題であった。これを解決すべく高統計で Σp 散乱事象を同定し、微分断面積を導出することを目的に E40 実験が K1.8 ビームラインにて実施された。この実験では液体水素標的をハイペロンの生成およびハイペロン陽子散乱の標的として用い、終状態の

粒子を検出することによって運動学的に散乱事象を同定する新しい手法を用いた。これにより過去のイメージング法を用いた手法では不可能であった大強度の二次中間子ビームを十分に使用することが可能になり、また高強度下で動作する検出器および読み出しシステムのアップグレードによって、十分に Σp 散乱事象を同定することが可能であることが示された。理論の進展について触れると、格子 QCD シミュレーションによる QCD の第一原理計算に基づいたバリオン間相互作用の進展は急速に進んでおり、また、chiral effective field theory では実験的に決定されなければならないパラメーターが幾つか存在するものの、それを決定することによって多体力まで計算できるフレームワークが YN 相互作用にも拡張されている。これら実験および理論の双方の進展によりさらに信頼性の高い二体の相互作用を構築することは、短距離部分を含む核力（バリオン間力）の本質的理解をもたらすとともに、今後のハイパー核物理の研究の土台をより強固にするものである。

太陽質量の2倍の中性子星の発見によって明らかになったいわゆるハイペロンパズル(2.1.3節参照)を解決するためには、特に星の中心部の高密度領域で大きな役割をもつ ΛNN 三体力の解明が不可欠であるが、次節に述べるようにしてこの三体力の情報を Λ ハイパー核の構造から引き出すためには確固とした二体の ΛN 相互作用を構築する必要がある。 ΛN 相互作用を広い Λ の運動量領域にわたって Λp 散乱実験から導出するために、K1.1 ビームラインの新設、および高運動量ビームラインにて2次粒子ビームの供給を可能とする性能向上が必要である。K1.1 ビームラインにて $1.1 \text{ GeV}/c$ の π^- ビームを用いて $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応により液体水素中で大量に Λ 粒子を生成し、散乱事象を周囲の検出器で検出する。この $1.1 \text{ GeV}/c$ では Λ の生成断面積が最大となり、また生成された Λ が生成平面に対してほぼ100%偏極するという特徴を持つことにより、 Λp 散乱のスピンの観測量の導出からスピン依存力の情報を得ることも出来る。一方で、K1.1で標識化できる Λ の運動量は $0.8 \text{ GeV}/c$ 程度までである。粒子間距離が 0.5 fm よりも短いような短距離での性質を求めるには、 $1.5 \text{ GeV}/c$ 程度までの Λ の運動量での Λp 散乱実験が必要となる。高運動量ビームラインに二次ビームを導き、 $8 \text{ GeV}/c$ 程度の π^- ビームを用いて $\pi^- p \rightarrow K^{*0}(892)\Lambda$ 反応で生じる $K^{*0}(892) \rightarrow K^+\pi^-$ を前方の汎用磁気スペクトロメーターで同定することによって、 $0.3 \text{ GeV}/c$ から $2 \text{ GeV}/c$ までの広い運動量範囲の Λ を標識化することが可能となり、短距離における ΛN 相互作用を実験的に決定することが可能となる。

ΛN や ΣN に関しては、1970年代におけるバブルチェンバーによる Λp および Σp 散乱の断面積のデータが少ないながらも存在したことがバリオン間力の理論模型を構築する上で必須であった。一方で、 Ξp 散乱に関してはほぼ皆無である。エマルジョンでの Ξ ハイパー核のイベントから ΞN 相互作用は引力的であることが分かってきており、今後本格的に Ξ ハイパー核分光が K1.8 ビームラインにて展開されて行くが、それと共に二体の ΞN 相互作用を Ξp 散乱からも調べるのが重要となる。10 M/spill に迫る大強度の K^- ビームを比較的良い K/π 比で供給することが出来れば Ξp 散乱実験も現実的となる。K1.8 ビームラインは2段の静電セパレーターを有し、非常に優れた K/π 比のビームを供給するが、ビーム長が約 46 m と長く、現状の 50 kW では K^- ビーム強度は 1 M/spill 程度に留まっている。一方で、K1.8BR ビームラインにて $1.8 \text{ GeV}/c$ のビームが供給出来れば、ビーム長が約 30 m と短くなり、現状の 50 kW でも約 5 M/spill の K^- ビームを1段の静電セパレーターで粒子分離された状態で供給することが出来る。今後の遅い取り出しのビーム強度の向上に伴い 10 M/spill の K^- ビームを用いて Ξp 散乱も可能となる。現在は K1.8BR の最大ビーム運動量は $1.1 \text{ GeV}/c$ となっているが、これは最終のビームライン電磁石の性能で決まっており、この電磁石を超電導化して $1.8 \text{ GeV}/c$ のビームを導くというビームラインの性能向

上が必要である。

2.1.2 ハイパー核ガンマ線分光

γ 線分光によって得られる超精密なハイパー核構造の情報は、次世代のハイペロン散乱実験や高分解能(π^+, K^+)分光と組み合わせて考えると、以下のような新たな意義をもつてくる。K1.1ラインにおいて、(K^-, π^-)反応および(π^-, K^0)反応によってさまざまな Λ ハイパー核を大量に生成し、E13実験で用いられた高計数用ゲルマニウム検出器群 Hyperball-J で γ 線を測定することで、以下のようなユニークな研究を行うことを予定している。

核内 ΛN 相互作用の詳細な情報

$S\pi K$ 計画での Λ ハイパー核質量の分解能は0.3 MeV(FWHM)程度だが、ハイパー核にはレベル間隔0.1 MeV以下の微細な構造があるため、次節で述べるように0.1 MeV以下の高精度の Λ 束縛エネルギーのデータから、 ΛNN 3体力の情報を引き出すには、 ${}_{\Lambda}^{40}\text{Ca}$, ${}_{\Lambda}^{89}\text{Y}$, ${}_{\Lambda}^{208}\text{Pb}$ などの対象となるハイパー核の低励起状態の構造を γ 線分光で精密に測っておく必要がある。さらに、これらの核での Λ 一粒子状態間のE1遷移($p_{\Lambda} \rightarrow s_{\Lambda}$)を測定して s 軌道と p 軌道の一粒子エネルギーの差を精密に測ることで、 $S\pi K$ 実験を補強する高精度情報が得られ、3体力の導出に貢献する。最近、J-PARC E13実験で ${}_{\Lambda}^{19}\text{F}$ の γ 分光に成功したが、 ${}_{\Lambda}^{208}\text{Pb}$ にいたるさらに重いハイパー核の γ 線分光も技術的、統計的に可能であることがわかっている。

軽い Λ ハイパー核(${}_{\Lambda}^4\text{He}$, ${}_{\Lambda}^4\text{H}$)の Λ 束縛エネルギーに極めて大きな荷電対称性の破れ(CSB)があることを、最近の γ 分光実験(E13)が明らかにした。CSBは、 u, d クォークの質量差を起源とするが、これが原子核にどう表れるかを説明できないということは、我々がハドロン間相互作用をクォークレベルから一貫して理解できていないことを示している。(K^-, π^-)反応および(π^-, K^0)反応で p 殻の鏡像 Λ ハイパー核のペアを作り γ 分光でそれらの構造を精密に測ることで、CSBの起源を理解する手がかりが得られる。

さらに一般的にいて、散乱実験により2体 ΛN 相互作用が精度よく決まると、軽いハイパー核の精密データと少数厳密計算とを比較することによって、核内の ΛN - ΣN 相互作用や、アイソスピン0および1の ΛNN 3体力の情報を引き出すことができる。特にアイソスピン1の3体力(Λnn 力)は中性子星内部の理解にとって重要であり、JLabでも最近 Λnn 核の探索実験が行われたが、J-PARCでは ${}_{\Lambda}^3\text{H}$ ($T=1$), ${}_{\Lambda}^7\text{He}$, ${}_{\Lambda}^{11}\text{Be}$ などの中性子過剰ハイパー核の構造を γ 分光で精密に測ることでこれを調べたい。

核内 Λ 粒子の性質変化

核内での核子の構造は自由空間にあるときとは異なっていることがEMC効果によって示唆されており、核内の核子はサイズが膨れるなどの変化を受けている可能性がよく議論されるが、低エネルギーの現象で核子の性質や構造が核内で変化していることを示す明確な実験データはない。核内深部にある核子1個の性質を他から切り離して調べることは困難だが、 Λ 粒子は核子とは別粒子で核子からのパウリ効果を受けずに原子核の最深部にとどまれるため、こうした研究に向いている。その一つとして、核内での Λ の磁気モーメント

の変化を測定することを計画している。磁気モーメントの直接測定は困難だが、ハイパー核の基底状態 2 重項の間の M1 遷移 (Λ のスピン反転に伴う遷移) の遷移確率から Λ の核内 g 因子が導出できる。現ハドロン施設で K1.1 ラインを建設し、(K^- , π^-) 反応で ${}^7_\Lambda\text{Li}$ を生成してこれを調べる実験 (E63) の準備が進められている。 g 因子の核内での変化が観測できれば、原子核の質量数やアイソスピンを変えた実験をハドロン施設拡張後の K1.1 ラインで行い、 g 因子変化の起源を解明することを目指す。

なお、核内では Λ の構造変化により Λ のベータ崩壊時の axial coupling constant (g_A) が変わりベータ崩壊率が核内で最大 2 割減少する可能性が指摘されている。ハイパー核のベータ崩壊率を測定する実験も将来 K1.1 ラインで行うことを検討している。

2.1.3 $S\pi K$ 計画

近年、注目を浴びている原子核物理学における重要課題として「ハイペロン・パズル」がある。我々が現在持っているハイペロンと核子との相互作用の情報に基づく、中性子星の中心部といった飽和核密度 ρ_0 の 2-3 倍を超えるような高密度核物質中では、ハイペロンが出現することが自然に帰結されるが、その際、状態方程式はソフト化され、中性子星の最大質量は太陽質量 M_\odot の 1.5 倍程度以下となることが帰結される。ところが、観測によると宇宙には太陽質量の 2 倍程度の重い中性子星の存在が現在までに 3 例、確認されており、現在の核力・バリオン力の理解には重大な見落としがあることが分かった。

つまり、高密度領域における我々の核物質の理解が不十分であることを意味している。従来のストレンジネス核物理の研究は、中・長距離レンジ (1~2 fm) でのバリオン間相互作用の性質を明らかにしてきた。これまでに蓄積された膨大な原子核の知見と合わせることで、通常の核密度における原子核および原子核物質の性質は、概ねよく記述できているが、今後は、高密度条件下で重要となるバリオン間相互作用の短距離部分を探る必要がある。この課題認識の下、提案するのが本 $S\pi K$ 計画 (Supra-precision (π^+ , K^+) 反応分光) である。

中性子星とは、星が丸ごと 1 つの原子核となり、宇宙で最も密度が大きく、中性子数 \gg 陽子数となりアイソスピンのバランスが激しく崩れた極限状態にある巨視的な物体である。この中性子星を系統的に研究するためには、これまで原子核物理学で培われた知見を駆使した研究が必須であり、現在の原子核物理の妥当性を試す試金石となっている。中性子星は宇宙元素合成に関しても重要な役目を果たし、従来、超新星の中でのみ生じると思われていた r 過程による重い元素の合成が、中性子星合体によっても生じるという理論モデルが提唱された。2017 年には中性子星合体による重力波 (GW170817) が観測され、そこでは r 過程元素合成が生じていると考えられる観測結果が得られ、大きな話題となっている。これまでのパルサー観測に加え、重力波という新たな中性子星の観測手段が切り開かれつつある。しかし、中性子星深部の構造を調べ、ハイペロン・パズルを解決することは観測的手段だけでは難しく、ラムダ粒子という最も軽いストレンジクォークを含むバリオンを原子核内部に不純物として生成し、中性子星深部のミニチュアであるハイパー原子核を地上で作り出し、精密分光することが必要である。ハイペロン・パズルの解決を目指した理論モデルには様々な物があるが、ハイペロンが発生することにより、重い中性子星を支えるには柔らかくなりすぎる状態方程式が何らかの理由で硬くなってはならない (場合によってはハイペロンが発生しない自然なメカニズムが必要とされる)、というのはモデルに依らない一般的な認識である。中性子星の状態方程式を硬くするために、最も有力なシナリオが、高密度で重要になるハイペロンを含んだ三体斥力の導入である。三核子の間

の力が単なる二体力の重ね合わせではないことは既に通常原子核の研究で明らかであり、こうした三体力（三体で初めて働く力）がハイペロンまで拡張したバリオン間力においても重要な働きをすると考えるのは、極めて自然である。短距離における核力（バリオン間力）の振る舞いは近年の格子 QCD(Quantum Chromo Dynamics) 計算の発展により、急速な理解が進みつつあり、これを検証するためのデータも 2.1.1 節に述べるハイペロン・核子散乱実験によって今後蓄積することができる。一方、3 体力については、格子 QCD 計算は極めて難しい。しかし、高精度の 2 体散乱データとともに、ハイペロン核子の多体相互作用を反映する高精度で系統的なハイパー核データを取得することにより、chiral effective field theory の手法で 2 体力および 3 体力のパラメータを決定し、3 体斥力の性質を定量的に明らかにすることができるかと期待される。

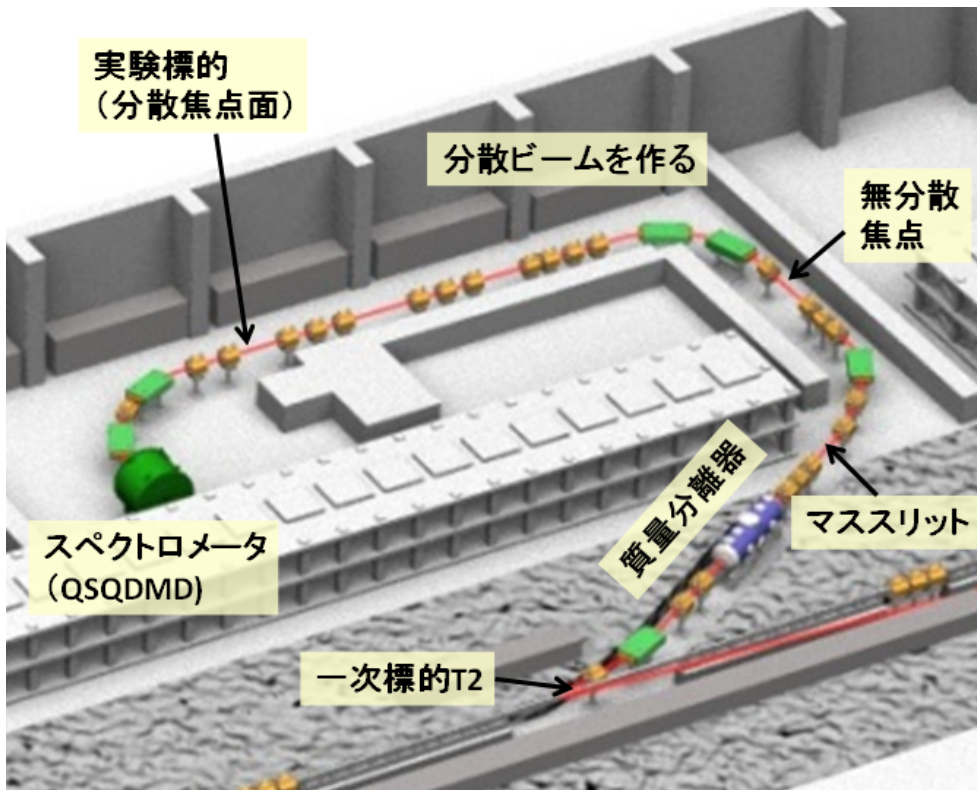


図 2: $S\pi K$ プロジェクトで提案する HIHR ビームライン。

J-PARC $S\pi K$ プロジェクトの中核をなす HIHR ビームライン (図 2) では、これまで実現されたことのない大強度の π^+ 中間子ビームを使い、 (π^+, K^+) 反応によりラムダハイパー核を効率良く、大量に生成することができる。ここで得られる π 中間子の強度は圧倒的であり、1 粒子毎の運動量測定は現在の最先端測定技術を持っても難しい。しかし、ビーム光学の粋を凝らした「運動量分散整合法」により、1 粒子毎の入射運動量を測定することなしに世界最高分解能のハイパー核反応分光が可能になる。中性子星という高密度状態極限状態において大きな役割を果たす ANN 3 体斥力であるが、加速器実験で生成可能ハイパー核の質量に対する影響はわずかに数 100 keV 程度と予想され、従来のハイパー核反応分光法による質量分解能である 1~2 MeV では決定的な結論を導くには不十分である。HIHR では数 100 keV 程度の分解能を達成し、ハイパー核の質量を数 10 keV の確度、精度で決定

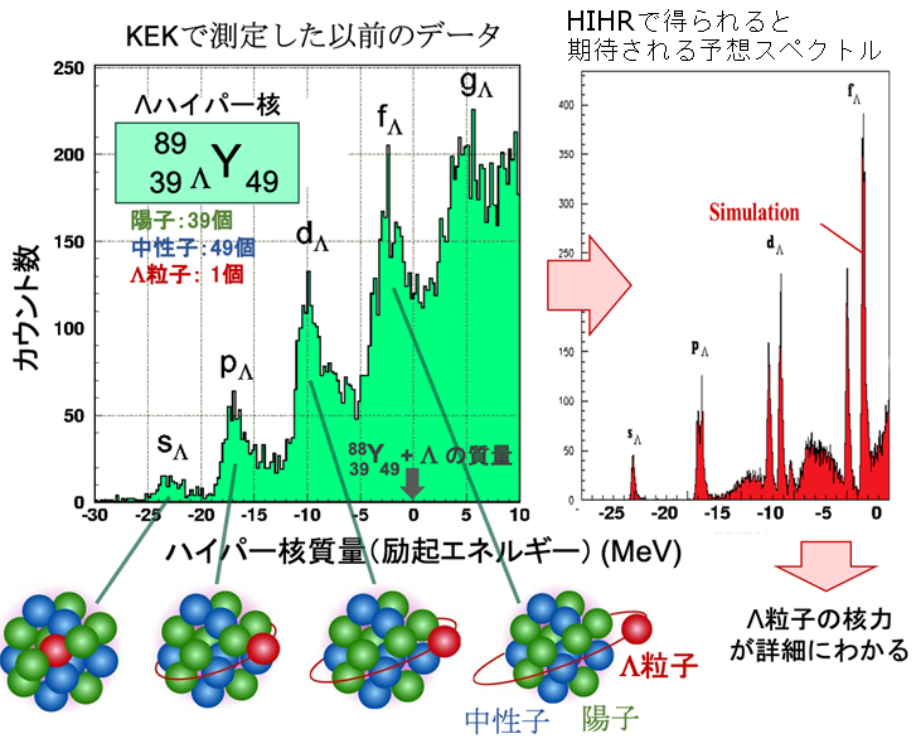


図 3: 従来の π^+ ビームを用いた場合と HIHR ビームラインで得られるラムダハイパー核質量分布の比較。

できる。図 3 は、過去に KEK において (π^+, K^+) 反応分光で得られた ${}^{89}_{\Lambda}\text{Y}$ ハイパー核の質量分布と HIHR で運動量分散積分法を導入して実施する新しい (π^+, K^+) 反応分光法によって得られる ${}^{90}_{\Lambda}\text{Zr}$ の予想スペクトラムを示したものである。過去の ${}^{89}_{\Lambda}\text{Y}$ のスペクトラムでも Λ 粒子の角運動量状態に対応する単粒子状態が綺麗に観測されているが、HIHR では分解能が一桁良くなることによりこれまで観測不可能であった微細な構造を観測することが可能になる。HIHR においてラムダハイパー核質量精密分光を様々な標的を用いて系統的に実施することによりバリオン力の理解が飛躍的に深まり重い中性子星の謎 (ハイペロン・パズル) を解決することができる。

さらに、HIHR と大立体角、高分解能磁気スペクトロメータを組み合わせることで、様々な質量領域のハイパー核の精密反応分光を展開することが可能になる。比較的軽い核では、現在 4 体系 (${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$) でホットなトピックとなっている荷電対称性の破れ (アイソスピン依存性) や $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 結合の研究を系統的に展開し、中重～重いハイパー核の研究から ΛNN 3 体斥力の効果を明らかにすることが可能である。これによりバリオンから、中性子星というサイズスケールが大きく異なる量子多体系を統一的に理解するという原子核物理の大目的に迫ることができる。

S π K プロジェクトで展開される物理は既に国際的にも注目を浴びており、世界中におけるハイパー核研究の拠点米国ジェファーソン研究所 (電子ビーム)、ドイツ FAIR (反陽子ビーム) などでも相補的な研究プロジェクトが進んでいる。S π K プロジェクトを推進し、これらの研究所と健全な競争、国際協力を展開することで、国際的な視野を持った若手研究者の育成という波及効果も期待できる。

SπK プロジェクトでは、HIHR ビームラインの建設と共に現在の二次粒子生成標的を新たに一つ追加 (T2) することにより既存の T1 標的を用いた K1.8/K1.8BR ラインと同時に HIHR、さらに前述したハイパー核 γ 線分光、ハイペロン核子散乱実験によるバリオン間相互作用短距離部分を研究する別手法を展開する K1.1 の 3 つのビームラインの同時稼働が可能になる。これにより各ビームラインにおけるセットアップ切り替えに必要な準備時間を大幅に短縮し、ビーム利用率を 3 倍以上に改善することができる。

2.1.4 K 中間子原子核

ストレンジネス物質の EOS 探究の一つの方向性として、反 K 中間子と核子や原子核間の相互作用に注目した研究が行われてきた。反 K 中間子と核子間には強い引力的相互作用が働くことから、反 K 中間子が実粒子として核子と共に原子核を構成する粒子束縛状態の存在、すなわち K 中間子原子核の存否は非常に興味深い研究の一つといえる。我々は、この研究成果を足掛かりとして、低エネルギー QCD の世界における中間子-核子相互作用、また、その先にある超高密度物質中でのクォーク多体系の物理の理解を目指す。本研究はその第一歩である。

特に、最近の成果の一つ、K1.8BR ビームラインで行われた E15 実験では、陽子 2 つと反 K 中間子が束縛した最も単純な構造を持つ K 中間子原子核 “ K^-pp ” の存在が明らかになった。この束縛状態は、束縛エネルギーが通常の軽い原子核の 10 倍近く (~ 50 MeV) にも達する非常に強く結合している状態であること、さらに、形状因子の測定よりこの状態の空間サイズは 1 fm を下回るほど非常に小さいことが示唆された。一方、K1.8 ビームラインで行われた E27 実験では、E15 が観測した状態よりも深い束縛エネルギー (~ 100 MeV) を持つ “ K^-pp ” 束縛状態の存在可能性を報告している。これらの観測事実は、 K 中間子原子核 “ K^-pp ” は非常にコンパクトな状態で、その密度も通常原子核密度をはるかに超える高密度物質である可能性を強く示唆するものである。更なる詳細研究、特に観測された束縛状態の量子状態 (スピン・パリティ)、その崩壊モードの同定、及び、さらに大きな原子核と反 K 中間子の束縛状態の存否などの系統的な研究を早期に進め、 K 中間子原子核の全容解明が今望まれている。

実は K 中間子原子核には、その存在自体に非常に興味深い物理的観点が存在する。これまでに知られている原子核などの物質は、核子のみを構成要素として持つ。ハイパー核はその枠組みをフレーバー SU(3) へ拡張したものであるといえる。一方、 K 中間子原子核は通常は中間状態として背後に潜む “中間子” を、さらに、反物質である反 K 中間子を構成要素とする全く新しい物質状態であると考えられる。すなわち、 K 中間子原子核がどこまで広がりを見せるのか? という問いは、まさにハドロンの多様性を追求するためのユニークな実験場となる。

本研究を飛躍的に推進させるためには、K1.8BR ビームラインの高度化 (ビームラインを短くすること、及び、Final focus 位置でのビームサイズを小さくすることで、 K^- ビーム利用強度を 2 倍に増強する) と、大型高性能 4π スペクトロメーター建設が必要不可欠である。図 4 として、計画中の大型高性能 4π スペクトロメーターの概念図を示す。これらの機能高度化を基盤とし、 $\Lambda(1405)$ と考えられる $\bar{K}N$ 状態から $\bar{K}NN$ 、 $\bar{K}NNN$ 、 $\bar{K}NNNN$ までの軽い K 中間子原子核を系統的に調べ上げる計画を推進する。この計画で得られる成果 (様々な原子核を使った K 中間子原子核の束縛エネルギーと幅、崩壊比、形状因子など) と理論的考察と合わせることにより、 K 中間子原子核の内部構造を明らかにする。さらに

は、よりコンパクトな形状をしていると予想される、2つの陽子と2つの K^- が束縛した “ K^-K^-pp ” 束縛状態などの探索へ向けた計画も練られている。このような研究は、大強度 K^- ビームが使用可能な J-PARC のみで実施可能なユニークな研究の一つである。

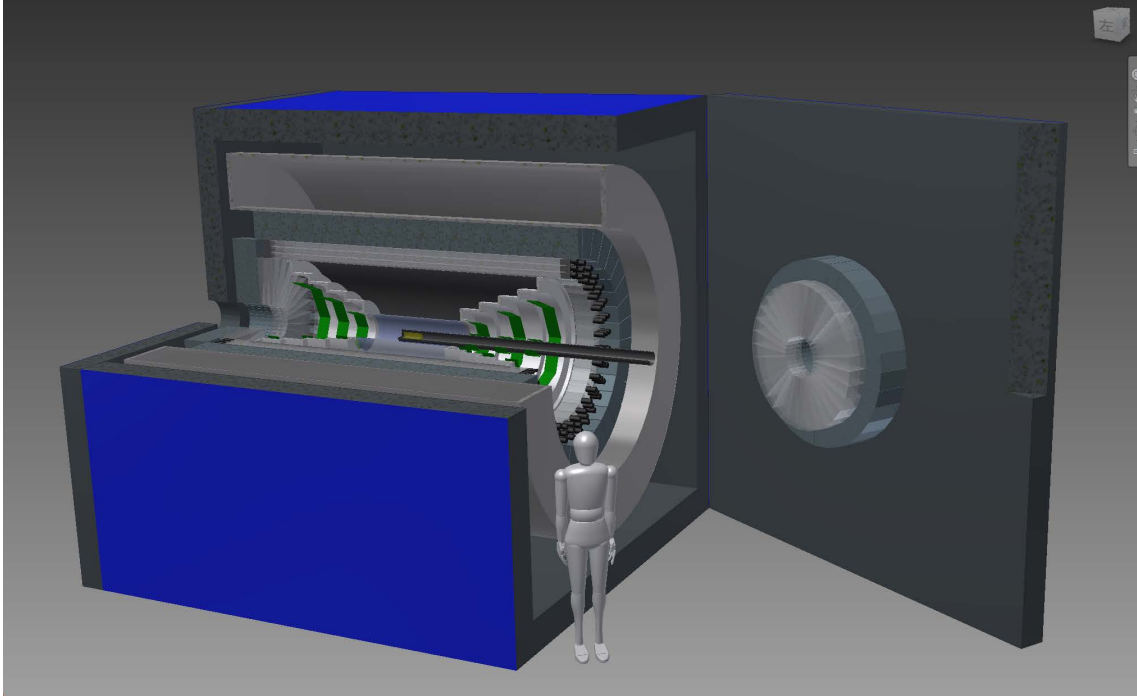


図 4: K1.8BR ビームラインに建設を計画する大型 4π スペクトロメーター概観。反応で生ずる荷電粒子及び中性粒子を、可能な限り全て検出するよう設計されている。

2.2 ストレンジネス核物理: $S=-2$

ストレンジネス $S=-2$ の系は、素過程反応 $p(K^-, K^+) \Xi^-$ 反応で $S=-2$ の Ξ^- を生成し、 Ξ^- を介することで生成される。この素過程反応断面積の大きさは、 K^- の入射運動量が $1.8 \text{ GeV}/c$ で最大となるため、この K^- ビームに最適化された K1.8 ビームラインで実験は行われる。このビームラインは、二組の静電セパレータを有し、高い K^-/π^- 比を実現すると同時に、 $QQDQQ$ 磁石系から構成されるビームラインスペクトロメーターにより運動量分解能 $\Delta p/p=1 \times 10^{-3}$ を達成している。

主リング陽子シンクロトロンから取り出されるビームパワーが 39 kW を達成する頃から、ストレンジネス $S=-2$ の研究が可能となり、ハイブリッド・エマルジョン法による二重 Λ ハイパー核や Ξ ハイパー核の生成・探索実験 (E07) が実施された。これまでに新しい事象がいくつか見つかかり、既に報告されている。

Ξ 原子を生成してその X 線遷移の強い相互作用によるエネルギー・シフトと幅を測定する実験 (E03) もこれと並行して準備が進められている。原子核表面でのポテンシャルの形状に敏感な測定となることが期待されている。

$\Xi N - \Lambda\Lambda$ のバリオン系は、その質量が約 $27 \text{ MeV}/c^2$ しか離れていない特徴的な系である。 (K^-, K^+) 反応により同時に Ξ ハイパー核と二重 Λ ハイパー核を励起できることが理

論的に示唆されている。興味深いのは、この際に励起される二重 Λ ハイパー核状態が基底状態ではなく、励起状態となっていることである。 H ダイバリオン¹の存否も含めて $S=-2$ のバリオン多体系は多彩なスペクトルを現す可能性がある。

2.2.1 ハイブリッド・エマルジョン実験

ハイブリッド・エマルジョン実験では、ストレンジネス $S=-2$ の Ξ^- 生成を磁気スペクトロメータ系で同定した上で、エマルジョンに入射し、スペクトロメータ系で測定した Ξ^- の情報を用いて、エマルジョン中の Ξ^- を追跡して、興味ある二重 Λ ハイパー核などの事象を探索・詳細な解析を行う。この実験に先立ち、エマルジョンの新しい探索・解析法として、全スキャン法の開発を進めていた。この方法は、高速イメージ取り込みと画像解析によって、二重 Λ 殻や Ξ 核の生成及び崩壊に特徴的な3つ以上のバーテックスを持つ事象を探し出す。この新方法を KEK 12GeV-PS E337 実験でビーム照射したエマルジョンに適用したところ、 Ξ^- が吸収され、2つのシングル Λ 核に崩壊するツイン事象が見つかり、その詳細解析の結果 Ξ^- が ^{14}N に明らかに原子軌道の束縛エネルギーより深く束縛した Ξ ハイパー核状態とわかった (Kiso event)。シングル Λ 核が基底状態か励起状態かが区別できないため、その束縛エネルギーを一意に決定できなかったが、この事象により、 Ξ ハイパー核が存在し、 Ξ の原子核ポテンシャルは引力であることが明らかになった。その背後にある ΞN 相互作用は平均的に引力ということである。

E07 実験のビーム照射は K1.8 ビームラインで、2016 – 2017 年に行われた。2020 年 4 月現在、ハイブリッド法による1回目のスキヤニングはほぼ完了した。1回目のスキヤニングでは、スキヤニング時間をそれほど掛けずに済むような Ξ^- 候補を選んで行った。これまでのスキヤニングでは、新しい二重 Λ 核の核種 ($^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$, $^{11}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$, $^{12}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ の3候補だが、 $^{11}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ が最も可能性が高い。)が見つかった (Mino event)。また、Kiso event と同じ $\Xi^- + ^{14}\text{N}$ の束縛系の事象 (Ibuki event) も見つかった。Kiso event とは違い、不定性なく Ξ^- の束縛エネルギーは 1.27 ± 0.21 MeV と測定された。 $\Xi^- + ^{14}\text{N}$ の束縛系の事象は、他にも観測されており、統計的な解析によって、 ^{15}C 核の複数の状態やその幅などの情報が得られると期待される。今後は、より多くの事象を見つけることを目標に、スキヤニング条件を拡げた2回目のハイブリッド・スキヤニングや全面スキャン法による事象探索が行われる。

$\Lambda\Lambda$ 相互作用 (正確には、その 1S_0 相互作用) は、Nagara event ($^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$) により、弱い引力と判ったが、Mino event や今後発見されるであろう二重 Λ 核によって、これを確認する、あるいは、相互作用の大きさが Λ 以外のコア核の違いによって変化があるのか?さらには、原子核データから裸の相互作用を導き出す際の留意点などより詳細かつ厳密な議論が可能となる。 $\Lambda\Lambda$ 間相互作用では、P 波の相互作用も興味深い。しかし、P 波相互作用の情報を得るには、 Λ の1つが p 軌道に励起した状態を観測する必要があるため、エマルジョンによる研究ではなく、後述する反応分光によって二重 Λ 核の励起状態を直接生成・観測する方法が有望であろう。

エマルジョン、その他の分光実験で、特に観測したい二重 Λ 核は4, 5 体系の $^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$, $^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$, $^5_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ である。これらの核では、陽子あるいは中性子の s 軌道が fully occupied でないため、 $\Lambda\Lambda$ - ΞN mixing が抑制されず、 $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用の影響がその質量に現れることが期待されている。これらの二重 Λ 核の観測により $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用の大きさが引き出せる。

2.2.2 三原子 X 線分光

負電荷を持った粒子は、電子に代わり、原子を形成する（エキゾチック原子）ことが可能である。ハドロンは電子より重いので、その拮りは電子よりコンパクトであり、原子核からの電磁相互作用の他に強い相互作用の影響を受ける状態（原子軌道）もある。状態遷移の X 線測定によって、エネルギーシフトや状態幅の増大を観測し、強い相互作用の情報を引き出すのがエキゾチック原子の X 線分光法である。この手法は、これまで、 K^- や Σ^- に適用されているが、 Ξ^- に適用するのが、三原子 X 線分光である。強い相互作用の影響を受ける Ξ^- の原子軌道は、原子核の表面から外側に存在するので、この方法は、 Ξ^- の原子核ポテンシャルの表面から外側に敏感であり、原子核内部のポテンシャルに敏感である Ξ ハイパー核分光と相補的である。

上記 E07 実験において、ゲルマニウム検出器 Hyperball-X を標的・エマルジョン上流に設置して、世界で初めて三原子 X 線分光を試みた。エマルジョン中の Ag, Br 原子とダイヤモンド標的中の炭素原子が対象である。残念ながら、X 線を観測できるほどの統計は得られなかった。

三原子 X 線分光に特化した実験として、J-PARC E03 実験がある。この実験では、鉄の三原子の (7,6)→(6,5) 遷移、及び (6,5)→(5,4) 遷移に伴う X 線の測定を行う。強い相互作用の影響がない場合には、X 線のエネルギーはそれぞれ、176keV, 286keV と予想され、深さ $-24-3i$ の Woods-Saxon 型の Ξ^- ポテンシャルを仮定した場合、後者は、4 keV 程度のレベルシフトと 4 keV 程度の吸収幅が予想される。当初の実験プロポーザルでは、(6,5)→(5,4) 遷移の X 線を 2500 カウント以上測定することを考えていたが、step-1 実験として、まずはその 10%の統計を取得する実験が間もなく行われる。この統計では、レベルシフトや幅の拮りが無い 176keV の X 線は検出可能である。一方、 ~ 286 keV の X 線は、ポテンシャルの深さ（実部）や虚部（吸収）の大きさによっては、有限のレベルシフトや幅の増大の観測が期待できる。step-1 実験の結果を見た上で、次の戦略、例えば、原子（大きさ）を変化させた系統的な測定を行うなど、を考える。

特に軽い原子の三原子分光の目的として、 Ξ^- 粒子がどの原子軌道で吸収されるかを実験的にはっきりさせることも重要である。前述のエマルジョン実験において、ダブル Λ 核の質量や $\Lambda\Lambda$ 間相互作用の大きさは、 Ξ^- がどの原子軌道から吸収されたかに依存する。これまでの解析では、理論で予想される原子軌道（3D）で吸収されたとして、その束縛エネルギーを用いており、もしも Ξ 吸収が起きた原子軌道が 3D 軌道と違うとこれまで報告された $\Lambda\Lambda$ 間相互作用の大きさは正しくないことになる。そのため、炭素を対象とした三原子 X 線分光を次に述べる Ξ ハイパー核分光実験と同時にを行うことを検討している。

2.2.3 三ハイパー核分光

Ξ ハイパー核の構造や、 Ξ の原子核ポテンシャルの核内部を調べる方法が、(K^- , K^+) 反応分光である。この方法による Ξ ハイパー核の研究は、過去には、KEK 12GeV-PS や BNL AGS で ^{12}C を標的として行われたが、実験の分解能や統計が十分ではなく、状態をピークとして観測することはできなかった。しかし束縛領域にも連続状態（準自由生成過程）からの漏れ込みよりも多くの事象が観測され、引力的な Ξ^- 原子核ポテンシャルを強く示唆した。

J-PARC では、分解能を向上させた実験（E05）が提案され、2015 年に SKS を用いて、分解能 5.4 MeV(FWHM) で、 $^{12}\text{C}(K^-, K^+)_{\Xi}^{12}\text{Be}$ 反応の測定が行われた。最終的な結果と

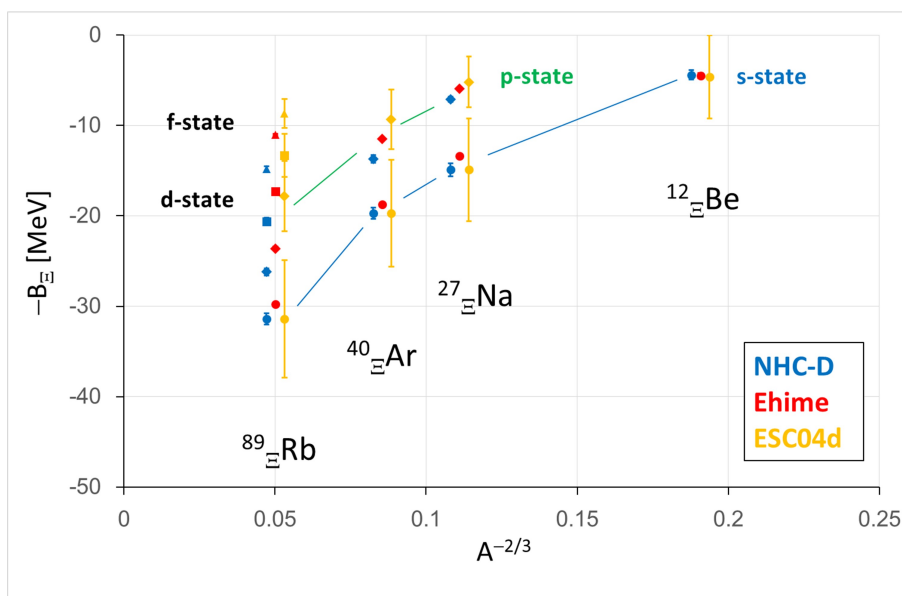


図 5: いくつかのバリオン間相互作用模型による Ξ^- -原子核ポテンシャルによる Ξ^- の単一軌道エネルギーと幅。

はなっていないものの、 Ξ の束縛領域に、BNL AGS の結果と矛盾のない事象が観測された。分解能が圧倒的に向上したにもかかわらず、スペクトルの形状は非常に似ており、複数の状態が存在する、あるいは状態幅が広い可能性もあり、はっきりした結論を得るには、さらに分解能を向上させた測定が必要である。そのため、*QQD* 構成の高分解能スペクトロメータ S-2S を用いた $^{12}\text{C}(K^-, K^+)_{\Xi}^{12}\text{Be}$ 反応分光実験 (E70) が予定されている。ビーム強度と小さい生成断面積を補償するため、比較的厚い標的を使用する場合には、スペクトロメータの性能だけでなく、標的の厚さも測定分解能を決定する大きな要因となる。そこで、E70 実験では、アクティブファイバー標的を用いて、標的でのエネルギー損失を補正する。補正した場合には、1.7 MeV(FWHM)、補正をしない場合でも 3 MeV(FWHM) の分解能が得られると見積もられている。

$S = -2$ 分光の将来

Ξ ハイパー核分光の手法が確立したら、この分光実験をいくつかの軽い核および中重核に拡げていくことが重要である。 Ξ -原子核平均ポテンシャルの中での一粒子準位がどのようにふるまうかを測定し、原子核物質中での Ξ ポテンシャルの深さを決定することは、高密度物質中でのストレンジネスの役割を理解する上で大切な測定である (図 5)。

一方、通常の原子核の研究でもそうであるように、軽い核の分光においては、相互作用のスピンの依存性や 3 体力などの影響が、その構造に特徴的に現れる。 Ξ 核の準位構造を通じて、 ΞN 相互作用の詳細を調べることが可能である。アイソスピン 0 の Λ とは違い、 Ξ のアイソスピンは 1/2 であるので、 ΞN 相互作用には、そのスピン・アイソスピン依存性による 4 つの項が現れる。最近の格子 QCD 計算によると、特にアイソスピン依存性が大きいとされている。そこで、次のステップとして、これらの依存性を実験的に解

明を目指す。

スピン・アイソスピンに依存しない項は、 $\alpha + \Xi$ (${}^5_{\Xi}\text{He}$, ${}^5_{\Xi}\text{H}$) あるいは、 $\alpha + \alpha + \Xi$ (${}^9_{\Xi}\text{Be}$, ${}^9_{\Xi}\text{Li}$) のポテンシャル深さを測定するのが直接的であるが、これらの核種は、安定核種標的を使う (K^-, K^+) 反応では直接生成できない。代わりに、 ${}^7\text{Li}(K^-, K^+){}^7_{\Xi}\text{H}$ ($\alpha + 2n + \Xi^-$) や ${}^{10}\text{B}(K^-, K^+){}^{10}_{\Xi}\text{Li}$ ($2\alpha + n + \Xi^-$) を測定することが提案されている。これらの例では、 n の波動関数は外側に広がっているため Ξ^- との相互作用に与える影響は小さいと考えられている。このように理論との協力による精密構造計算との比較により、 ΞN 相互作用の詳細を決定していくことが考えられる。

Ξ^- は負電荷を持つので、中重 Ξ ハイパー核においては、クーロンポテンシャルの深さが強い相互作用によるポテンシャルと同レベルに大きくなり、いわゆる Coulomb Assisted Bound States が形成されるようになる。この状態は、質量数とともに束縛が深くなり一方で転換幅は狭くなることが期待されている。

加えて、 $S = -2$ のハイパー核系は、 ΞN と $\Lambda\Lambda$ の系が 27 MeV 程度しか離れていないという特徴を持つ。そこでこの二つのチャンネル間に $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用を通して、強い相互作用による結合があると、二つの系はチャンネル結合により強く結合したバリオン系ということになる。実際に、理論的には $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用によって (K^-, K^+) 反応をつかって直接ダブル Λ 核が生成されることが予言されている。これによると、 Ξ ハイパー核の基底状態が 1^- 状態にあるため、これと結合して励起されやすいダブル Λ ハイパー核のスピン・パリティは同じ 1^- 状態となり、これは、ダブル Λ ハイパー核の基底状態 (0^+) ではなく、2個あるうちの1個の Λ が $\ell = 1$ の p -軌道に励起された励起状態である。この励起強度が大きいとすると (K^-, K^+) 反応を使ったダブル Λ 核の励起状態の研究という新しい分野が開拓されることとなろう。

S-2S により (K^-, K^+) 反応で $S=-2$ の系の生成さらにはその状態を標識化しうえてその崩壊を標的周辺に設置した別の検出器で測定する実験も検討・提案されている。P75 実験では、 ${}^7\text{Li}(K^-, K^+){}^7_{\Xi}\text{H}$ 反応で生成した ${}^7_{\Xi}\text{H}$ を S-2S で同定した上で、高い分岐比で生じる ${}^7_{\Xi}\text{H} \rightarrow \Lambda\Lambda {}^5_{\Lambda}\text{H} + 2n$ 崩壊からの ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ の



という連続弱崩壊を、S-2S の上流・標的周辺に設置したソレノイド電磁石と TPC で構成された大立体角スペクトロメータで測定し、特に反応 1 の π^- の運動量測定により、 ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ の分光を行う (崩壊 π 分光法) 計画である。目的は、 $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用の大きさの決定である。最初のステップとして ${}^7_{\Xi}\text{H}$ の収量を測定する実験が認められた。ある程度よい分解能で測定できれば、収量に加え、 Ξ^- の束縛エネルギーも決定でき、前述した ΞN 相互作用のスピン・アイソスピン非依存項の大きさも決定できると期待される。

2.2.4 $\text{SU}(3)_f$ 一重項の大きさと H ダイバリオン

$S=-2$ のバリオン間相互作用で特に重要で興味深いのは、 $\text{SU}(3)_f$ 一重項である。クォーク描像に基づくモデルによるとバリオン間力 (核力) の短距離部分は、クォーク間のパウリ排他律とグルーオン交換によるカラー磁気力で説明できる。クォーク間のパウリ排他律が働かず、カラー磁気力が引力となる $\text{SU}(3)_f$ 一重項では、大きな引力芯が予想される。この状態に対応するのは、 $uuddss$ の 6 クォーク状態の H ダイバリオンであり、その実験的な観測・

確認は、この描像の証明であり、その質量の測定は、この項の大きさの実験的決定となる。 H ダイバリオン探索はこれまで様々行われてきたが決定的なデータは存在しない。最新の格子 QCD 計算は、 ΞN しきい値付近に H ダイバリオンが存在すると強く示唆されている。

J-PARC E42 実験は、K1.8 ビームラインスペクトロメータおよび KURAMA スペクトロメータでダイヤモンド標的での (K^-, K^+) 反応を同定し、そこから崩壊する荷電粒子を大立体角のハイペロンスペクトロメータで測定する。

$$H \rightarrow \Lambda + p + \pi^-$$

$$H \rightarrow \Lambda + \Lambda$$

$$H \rightarrow \Xi^- + p$$

の崩壊モードでの探索を行うことによって、 $\Lambda\Lambda$ しきい値以下から、 ΞN しきい値以上にわたる広い質量領域で H ダイバリオンを高感度で探索する。

2.3 高運動量ビームラインを用いた計画

ハドロン物理学の大きな目標の一つは、クォーク・グルーオンの相互作用を記述する QCD から出発して、ハドロンの相互作用や内部構造を理解することである。

2.3.1 原子核中のハドロン質量の測定

ハドロンの内部にはクォークが存在するが、大きな研究テーマの一つが、その質量の問題である。Higgs 粒子により生み出されるクォークの質量は、数 MeV/c^2 程度であるのに対して、内部にクォークを 3 個含む陽子は、 $940\text{MeV}/c^2$ 程度の質量を持ち、それは元々のクォークの質量の約 100 倍に相当する。この陽子の質量がいったいどこから来たのか、それが原子核・ハドロン物理学の大きな研究テーマの一つとなる。

この陽子やハドロンの質量を生み出す機構が、『対称性の自発的破れ』である。『対称性の自発的破れ』の本質は、相互作用の基底状態である『真空』の性質が、温度や密度といった媒質の内部変数に依存して変化し、それによって『真空』からの励起状態である粒子の性質が変化するという点にある。ここで、強い相互作用が生み出す複雑な『真空』構造と質量獲得にとって重要なのが、カイラル対称性であり、ハドロンは、強い相互作用が近似的に持つカイラル対称性が自発的に破れることで追加の質量を動的に獲得すると考えられている。

このハドロンが質量を動的に獲得する機構と『真空』の関係は、理論的な研究や Lattice QCD による計算などで明らかになりつつあるが、具体的に、どんな媒質下でどの程度の質量が獲得されるのか、という対称性の破れのスケールを決める情報を得るためには、実験的な研究が必須である。特に、有限の密度を持った媒質に対する研究は、Lattice QCD による計算が難しく、実験による探索的な研究が中心となっている。原子核は、有限密度を持った強い相互作用をする媒質と考えられるので、原子核中でハドロンの性質を測定することにより、密度による QCD 媒質の性質変化を測定できると考えられる。

有限密度媒質としての原子核を用いた実験的研究は、J-PARC、理研、ドイツ GSI 研究所などで精力的に展開されている。ドイツ GSI 研究所では、 π 中間子の性質を原子核中で測定する実験が実施された。 π 中間子は質量が軽く、カイラル対称性が自発的に破れる際に生じる南部-ゴールドストーンボソンだと理解されている。そのため、 π 中間子の性質は、媒

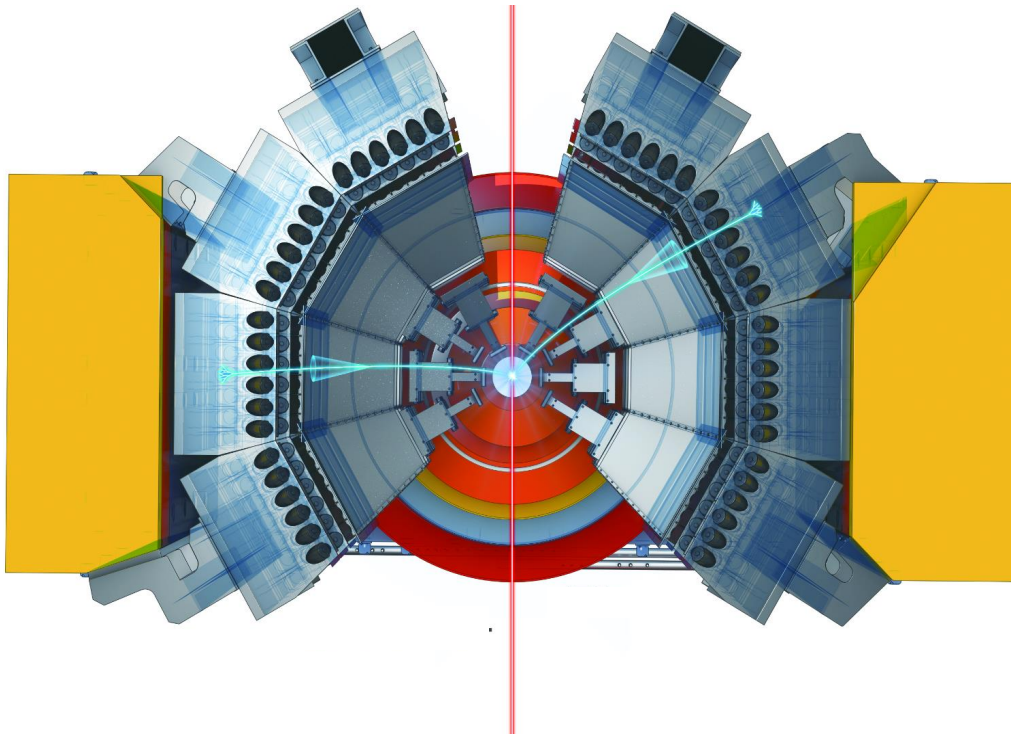


図 6: J-PARC ハドロン実験施設高運動量ビームラインに建設したスペクトロメータの模式断面図。磁石内に内側からシリコン検出器、GEM Tracker、Hadron Blind Detector、鉛ガラス検出器が設置される。

質の性質を強く反映していると考えられる。この実験で、早野、板橋らは、その性質を利用し、原子核中でカイラル対称性が回復していることを定量的に示した。

さらに、直接的にハドロン質量の媒質による変化を捉えようとした実験が J-PARC において遂行されている。初田らの理論的研究によると、ベクター中間子の質量分布は、媒質中でのカイラル対称性の破れの秩序変数である反クォーク・クォーク凝縮量と密接な関係があることが示唆されている。そのため、原子核などの有限密度媒質中では、カイラル対称性が部分的に回復し、その結果、ベクター中間子の質量分布が変化すると考えられている。既に、KEK-PS E325 実験において、延興、武藤らは、原子核内で ρ 中間子の質量変化を示唆する実験結果を得た。これを受けて、J-PARC において、四日市、成木らを中心に、得られる統計量を飛躍的に増大させ、定量的に質量変化を測定する実験が進行中である。J-PARC の実験においては、大強度の 30GeV 一次陽子ビームとそれに対応した大立体角のスペクトロメータ (図 6) の建設を行った。この実験は、2020 年よりビーム調整、データ収集を開始する予定であり、今後、J-PARC において安定的にビームが供給されることが非常に重要である。

2.3.2 チャームバリオンによるバリオン内部構造の解明

ハドロン内部の構造をクォーク相互作用から理解することも大きな研究テーマの一つである。特に、陽子、中性子などのバリオン内部には 3 つのクォークが存在するが、その構

造を理解することは、物質の成り立ちをクォークレベルから理解するために本質的に重要である。

ある系の相互作用を理解するためには、励起状態（エネルギー準位）の測定を行い、ポテンシャルの形を推定していくというのが、一般的によくある方法である。実際に、 J/ψ 粒子などのチャーモニウムと呼ばれる重い中間子において、その励起状態を同定することで、クォーク・反クォーク間に働く相互作用の性質が明らかにされた。しかし、この方法をバリオンに適用した場合、軽いバリオンの励起状態には、従来の素朴なクォークモデルの予想に反する実験結果が多くあり、バリオン内部のクォーク間相互作用や構造について、十分な理解が得られていない。これは、バリオン内部には3つのクォークが存在することで、より複雑な系となっていることが、実験的にも理論的にも大きな困難となっている。

この状況を打開するための新たなアプローチとして、チャームを含むバリオンに注目した実験が野海らによって提案されている。この実験は、J-PARC 課題採択委員会に提案され、E50 実験として採択（Stage-1 実験）されている。チャームを含むバリオンは、チャームクォーク自身の重さにより、軽いクォーク間の相互作用による励起とチャームクォークとの相互作用による励起が容易に区別できる。そのため、チャームを含むバリオンの励起準位を詳細に測定し、各励起状態がどの相互作用により励起されているかを調べることで、軽いクォーク間の相互作用や軽いクォークとチャームクォークとの相互作用を定量的に測定することが可能となる。特に、軽いクォーク間の相互作用はダイ・クォーク相関と呼ばれ、ハドロン物理においては、理論的に存在が示唆されていたが、確固たる実験的証拠が得られていなかったものであるが、本実験で新たな実験的知見が得られると期待される。近年、ダイ・クォーク相関は、QCD 相関の高密度領域において、重要な役割を果たす可能性が指摘されており、一刻も早い実験の開始が待ち望まれている。

本実験では、ある質量領域においてチャームを含むバリオンの励起状態を網羅的に測定することが重要である。そのため、高エネルギー π 中間子ビームと欠損質量法を用いた測定を行う。新設された一次陽子ビームラインの分岐部に二次粒子生成標的を設置し、高運動量二次ビームラインとしての機能を加えることで、チャームバリオン生成に必要な高い運動量と十分な強度を持つ π 中間子ビームを得ることができる。また、分散型焦点を設けて高い運動量分解能を実現させたビームライン光学の設計と新規スペクトロメータの開発により、従来より 10 倍優れた質量分解能を持つ測定を行う。図 7 にスペクトロメータを示す。

本実験を推進するためには、一次陽子ビームラインに高運動量二次ビームラインの機能を加えることが必須であり、早急な建設が望まれる。

2.3.3 高運動量二次ビームによる実験

大強度かつ高い運動量分解能 (0.1%) の高運動量ハドロンビームを利用できる施設は世界的にユニークである。ハドロン・原子核物理の国際研究プラットフォームとして高運動量二次ビームラインと大立体角汎用スペクトロメータ (図 7) を整備することにより、既存のハドロン実験施設では供給できない $2 \text{ GeV}/c$ をこえるハドロンビームによって新たな研究が拓かれる。前節で述べたチャームバリオン分光のほか、ストレンジクォークを含むバリオンの研究 (軽いフレーバーを含むバリオン分光)、摂動領域の QCD が援用可能になる高エネルギー反応を用いたハドロン構造の研究 (核子 3 次元構造 (ハドロンのトモグラフィー))、さらには、大量に生成されるハイペロンを利用した高運動量のハイペロン核子間相互作用の研究 (ハイペロン核子散乱) などが推進できる。以下に、それぞれの研究における狙い

チャームバリオン分光用大立体角汎用スペクトロメータ

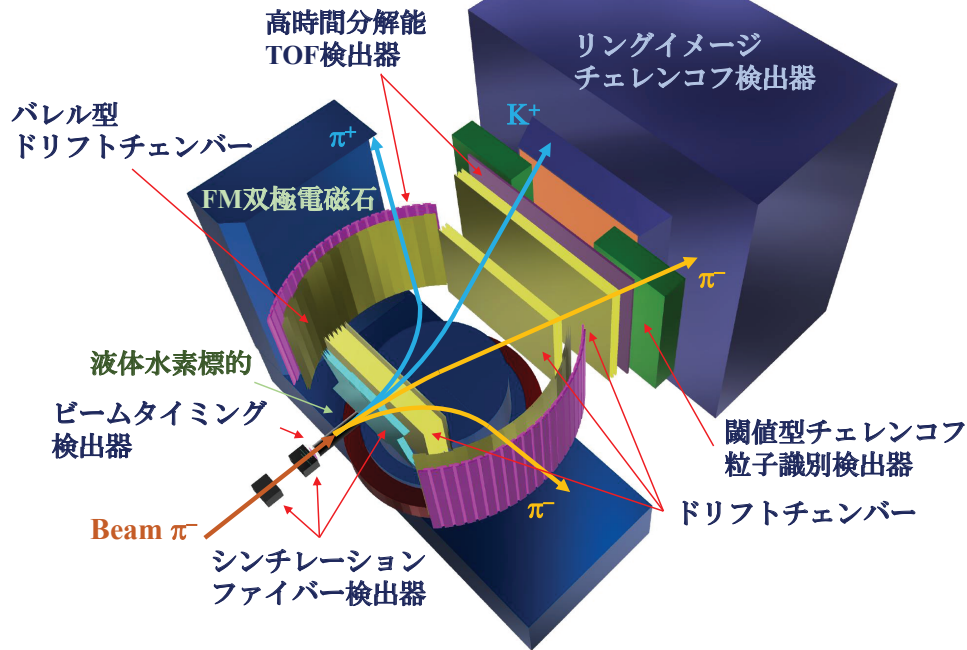


図 7: チャームバリオン分光用にデザインされた大立体角汎用スペクトロメータ

について述べる。

軽いフレーバーを含むバリオン分光

高エネルギー二体ハドロン反応について、数 GeV から数 10GeV の領域における測定データは不足している。一方、二体のハドロン反応を記述する枠組みはいくつかあり、たとえば、Reggeon 交換模型は、いくつかのエネルギーで存在するストレンジ粒子の生成反応断面積や角分布をよく再現する (PRD92, 094021(2015))。前節のチャームバリオン生成の断面積は同じ理論計算の枠組みで 1~10nb と見積もられた。このように、記述が可能な二体のハドロン反応を用いて、ストレンジバリオンの構造について研究することができる。例として、 $\pi^- p \rightarrow \bar{K}^* Y_s^*$ 反応を用いて、ストレンジネス (S)-1 を持つハイペロン励起状態 (Y_s^*) の研究を取り上げる。擬スカラー中間子 (π^-) が入射しベクトル中間子 (K^*) が散乱する反応では、 \bar{K} と \bar{K}^* 中間子交換反応が主要な反応機構となる。 $\Lambda(1405)$ は \bar{K} 中間子と核子の束縛状態 (分子共鳴状態) との見方が優勢になりつつあるが、この反応を用いて $\Lambda(1405)$ を生成する場合、とくに前方散乱 (~ 0 度) ではスピンをもつ \bar{K}^* 交換過程が抑制され \bar{K} 交換過程が優勢になると期待されるので、 $\Lambda(1405)$ と \bar{K} 中間子と核子の結合の強さが議論できる。

一方、同じ反応でも、後方散乱では前方とは違った側面が顕われる。重心系エネルギー (の二乗) s や 4 元運動量移行 (の二乗) t の十分大きな領域 (数 GeV^2 以上) に到達することができる。この領域では、ハドロン反応の微分断面積は、いわゆるクォーク数則に従うことが知られ、反応に関与するすべての粒子のクォーク数を n とすると、 s^{2-n} に比例する。 $\pi^- p \rightarrow K^{*0} \Lambda(1405)$ 反応の微分断面積のエネルギー (s) 依存性を測定することによ

て $\Lambda(1405)$ が通常の 3 クォーク状態かエキゾチックな 5 クォーク状態かを判定できる。

最近、東北大学の電子光物理学研究センターの γ 線ビームを重陽子標的に照射し、 $d\pi^0\pi^0$ 終状態において、 $d\pi^0\pi^0$ や $d\pi^0$ の不変質量スペクトルにダイバリオン状態と見られる構造が報告された (PLB789, 413(2019))。これらはそれぞれ $\Delta\Delta$ 共鳴および ΔN 共鳴と解釈可能である。もしこれらの状態が本当にダイバリオン状態であれば、 $I=3$ のダイバリオンが存在するはずである。高運動量ビームラインにおいて $\pi^+d \rightarrow \pi^-\pi^-(\Delta^{++}\Delta^{++})$ や $\pi^+d \rightarrow \pi^+\pi^+(\Delta^-\Delta^-)$ 反応を用いた $I=3$ のダイバリオン探索実験が検討されている。

重いクォークとしてのチャームの代わりにストレンジクォークを 2 つないし 3 つ持つバリオンにおける構成子の内部相関を調べることは有益である。高運動量二次ビームラインのハドロンビームの主成分は π 中間子であるが、一定の強度で K 中間子が混ざる。高運動量二次ビーム中の K^- を同定することにより、 $K^-p \rightarrow K^{(*)}\Xi^*$ 反応を用いた $S=-2$ を持つハイペロン励起状態の研究が提案されている (LoI: KEK/J-PARC-PAC 2014-4)。 Ξ^* および Ω^* バリオンの励起状態に関する情報は非常に乏しい。ハドロン実験施設の拡張計画で K10 ビームラインが供給する分離純化された大強度 K 中間子ビームを用いた Ξ^* 、 Ω^* の精密分光や ΩN 相互作用の研究へつながる礎となる研究が期待できる。

核子 3 次元構造 (ハドロンのトモグラフィ)

$\pi^-p \rightarrow \mu^+\mu^-n$ 反応における Drell-Yan 過程を用いた核子の 3 次元構造模型：一般化されたパートン分布 (GPD) 模型の検証実験が提案されている (LoI: KEK/J-PARC-PAC 2019-7)。CERN や J-Lab で展開されてきたレプトンビームによる反応に対して J-PARC におけるハドロンビームを用いた (time-like な領域での) 実験は運動学的に相補的である。GPD は、縦方向のパートン運動量分布に形状因子の情報を取り込んだような量であり、ハドロン分光とは相補的なアプローチ (摂動領域の QCD を援用して実験データから非摂動領域の物理量を引き出す手法) によりハドロンの内部構造に迫る。

ハイペロン核子散乱

高運動量二次ビームラインは毎秒 10^8 にも達する大強度 π^- 中間子ビームを供給するので、水素標的との反応でハイペロンが大量に生成される。生成したハイペロンを標的内で再び散乱させることにより、ハイペロン核子散乱実験が可能である。低エネルギーのハイペロン核子散乱は既存のビームラインや拡張されたハドロンホールでの K1.1 ビームラインにおいて計画されているが、高運動量ビームを用いると 1 GeV/c を超えるような高運動量領域のハイペロンが生成できる。運動量の高いハイペロンを生成し、高密度領域でより重要となる P 波領域のハイペロン核子相互作用の研究が提案されている。

2.4 ハドロンホールの拡張計画

学術会議「マスタープラン 2020」において重点大型研究計画の 1 つに選定されたハドロン実験ホール拡張計画は、現在の実験ホールの面積を約 3 倍に拡張し、そこに新たな 2 次粒子生成標的 2 台と 2 次ビームライン 5 本を設置するものである。以下、この拡張計画案をフルスペック案と呼ぶ。フルスペック案は総額 276 億円もの大事業であることから、我々は、2 次ビームライン数は削ることなく事業総額を約 2/3 に削減した拡張計画案を策定した。こ

れを縮小案と呼ぶ。本節では、フルスペック案と縮小案それぞれについて、主に施設、設備面の概要を述べる。

2.4.1 フルスペック案

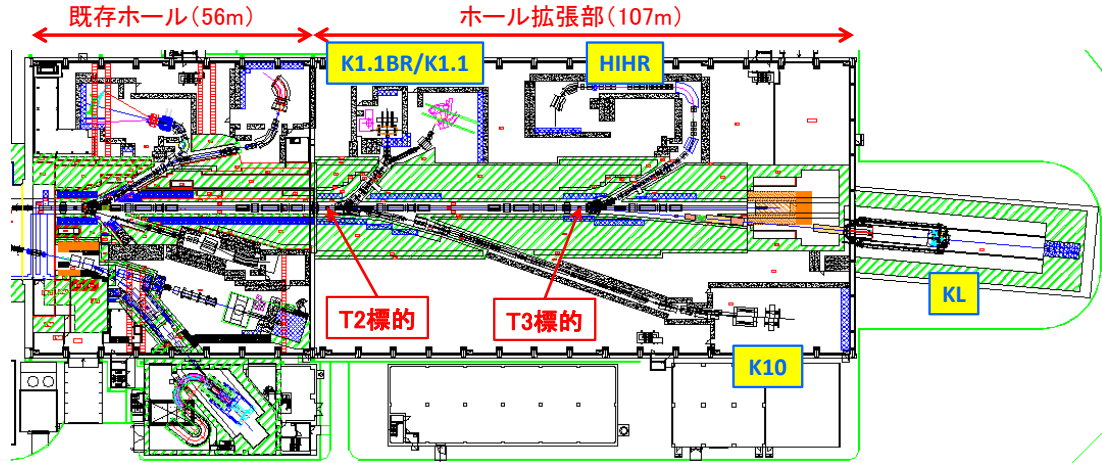


図 8: ハドロン実験ホール拡張計画フルスペック案。

図 8 が拡張計画フルスペック案の計画図である。

既存実験ホールの東西方向（1次ビームライン方向）の長さは56 mであるが、それを107 m 拡張して合計163 mとする。ホール拡張部には、既存1次ビームラインをそのまま延長し、そこに2台の2次粒子生成標的T2、T3を設置する。既存のT1標的からT2標的まで、T2標的からT3標的までをそれぞれ point-to-point の光学で輸送することで、3台の生成標的を串刺しして同時に運転する。T2標的には2次ビームラインK1.1、K1.1BR、及びK10を、T3標的にはHIHRと新KLビームラインを、それぞれ建設する。また、付属建屋として、受電設備のための第2電源棟、冷却水及び排気設備のための第4、第5機械棟、超伝導スペクトロメータ用低温設備のための第2圧縮機棟、測定器準備室や各実験計数室が入る側室を新築する。

各2次ビームラインの性能と特徴を簡単にまとめると、以下の通りである。

K1.1 電磁場共存型静電セパレータを2段装備することで、よく粒子識別された1.2 GeV/c程度までの低運動量 K 中間子を大量に供給するビームラインである。1GeV/c 近傍は、 (K^-, π) 反応による Λ 、 Σ ハイペロンの生成に最適な運動量であり、それを利用したハイペロン-核子散乱実験やシングルハイパー核の精密実験を行う。

K1.1BR 静電セパレータを1段としてビームライン長を短くすることで、K1.1 よりもさらに運動量の低い1.0 GeV/c 以下の K 中間子を効率よく供給するビームラインである。主に静止 K 中間子を用いた実験が想定されており、 K^+ 崩壊での時間反転不変性の破れの探索や、 K 中間子原子 X 線の高精度分光などが提案されている。

HIHR 分散整合という特殊なビーム光学を採用することにより、これまでの高エネルギー2次ビームラインではせいぜい千分の一の分解能であったのを、さらに一桁あげて一万分の一の分解能を実現する。大強度かつ高分解能の π ビームを用いた、 $S = -1$ ハイパー核の精密分光や中性子過剰ハイパー核の分光などが提案されている。

K10 最高 10 GeV/c までの粒子識別された 2 次ビームを供給するビームラインで、粒子識別の方法によって 2 つのオプションが提案されている。ES オプションでは、総長 27 m の静電セパレータを用いることで、最高 4 GeV/c 程度までの K 中間子や 6 GeV/c 程度までの反陽子を供給できる。もう一方の RF オプションでは、2 台の RF セパレータを用いることにより、最高 10 GeV/c までの K 中間子や反陽子を供給できる。チャーム核や $S = -3$ 核の研究といった、従来の 2 GeV/c 以下の K 中間子ビームでは届かなかった重いバリオン系での特色ある研究が展開できる。

新 KL 取り出し角度を既存の KL ビームラインの 16 度から 5 度に変更することで、中性 K 中間子収量の画期的な増大をはかる。これにより、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊の初観測を超えて、その崩壊分岐比の精密測定が可能となる。

2.4.2 縮小案

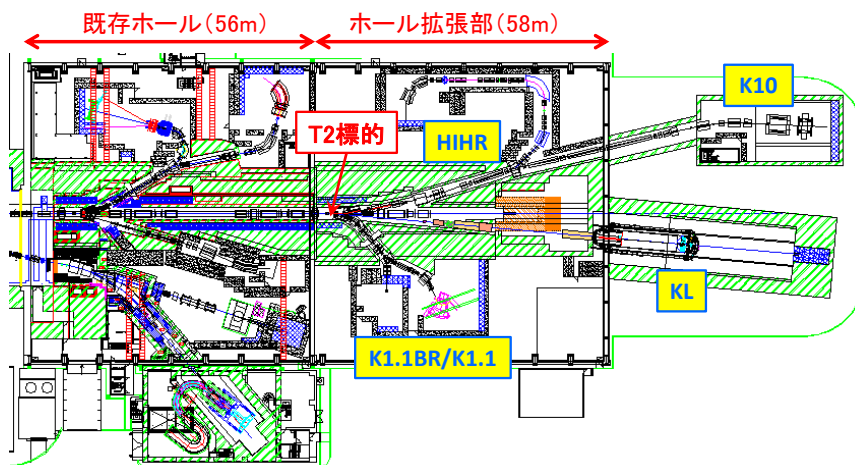


図 9: ハドロン実験ホール拡張計画縮小案

縮小案の計画図を図 9 に示す。

フルスペック案との最大の違いは、ホール拡張部の長さを 107 m から 58 m へと短くし、新規追加の生成標的は 1 台のみとしたことである。しかしながら、HIHR と K10 ビームラインの上流部を共有化し途中で分岐する形にすることにより、2 次ビームラインの総数はフルスペック案と同じである。上流部を共有するので、HIHR と K10 とで同時に実験を行うことができなくなる一方、その分一度に必要な電力と冷却水量が半分近くまで減るため、受電設備や冷却水設備を大きく削減することができ、新築する機械棟や電源棟の数も減らすことが可能となる。その他、側室や第 2 圧縮機棟も省略し、コンテナで代用する。以上のような削減を行うことにより、事業総額を 200 億円以下まで圧縮することが可能である。

2.5 J-PARC での重イオン加速とその物理

ハドロン物理学の大きな目標の一つは、強い相互作用によるクォーク多体系の相構造を明らかにするところにある。強い相互作用の相構造 (QCD 相図と呼ばれる) 温度と密度 (バリオン化学ポテンシャル) の関数として、クォーク多体系は様々な形態を取ることが理論的

に予想されている。図 10 に QCD 相図を示す。この様々な形態の物質相を実際に生成して、直接的に研究しようというのが、高エネルギー重イオン衝突実験の研究テーマである。

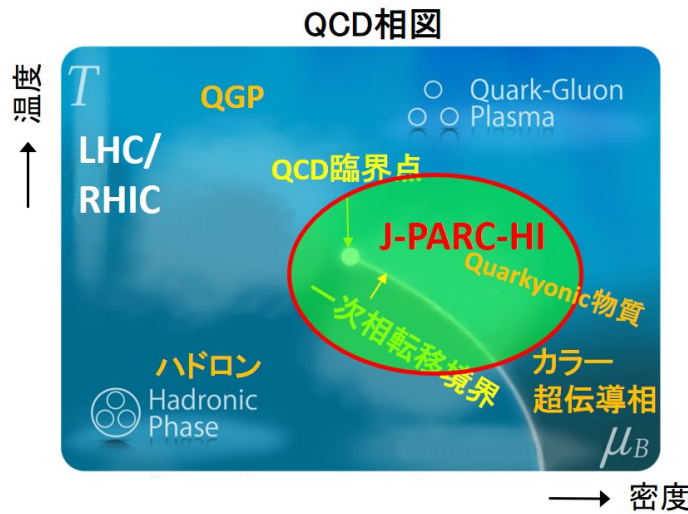


図 10: QCD 相図

既に、RHIC や LHC における高エネルギー重イオン衝突実験によって、高温・低密度領域においてハドロン内部のパートンが自由度を獲得する新たな物質相の存在が示されている。高密度領域においては、カラー超伝導相やクォーク・クォーク凝縮相などより多様な形態の物質相の存在が理論的に示唆されている一方で、実験的な探索、研究が待望されている。特に、核子当たり 15 - 25 GeV の原子核衝突では、衝突後の高密度状態の生成時間に比べてエネルギー散逸が遅いため、実験で到達可能な最高密度のクォーク・ハドロン物質の生成とその相構造の研究が可能になると期待される。

現在は、RHIC-STAR 実験において衝突エネルギーを変化させた測定が精力的に行われている。その中で、クォーク相とハドロン相の相転移や相転移線の端点にあたる臨界点 (Critical End Point) が探索されている。高エネルギー重イオン衝突実験で得られた知見をもとに、粒子相関の測定、揺らぎの測定、レプトン対を用いた測定など、過去の AGS 実験では測定が困難だった方法を用いることで、新たな実験的知見が得られている。しかし、粒子相関や揺らぎの測定には、高統計が必要であるため、STAR 実験などの衝突型加速器を用いた実験ではなく、高い反応頻度を達成できる固定標的実験の実施が重要となる。J-PARC での重イオン加速計画は、この要請に応えるものである。

さらに、高強度の重イオン加速器を用いることで、ストレンジネスを含む粒子を大量に生成し、ハイパー核、ストレンジレット、ダイバリオンなどのマルチストレンジネス系の探索を強力に推進することが出来る。

J-PARC の重イオン計画では、世界最高強度となる 10^{11} Hz のビーム強度を目指している。そのためには、加速器施設のアップグレードが必要である。J-PARC 加速器群のうち、RCS と MR は比較的小規模の改修により原子核加速が可能となる。前段の入射器として線形加速器とブースターの新設が原研により検討されている。RCS への入射方法や RCS での加速などの加速器側の課題は、J-PARC 加速器グループの原田らを中心に検討され、実現可能な方法が提案されている。図 11 に重イオン加速のためにアップグレードする加速器の概念図を示す。

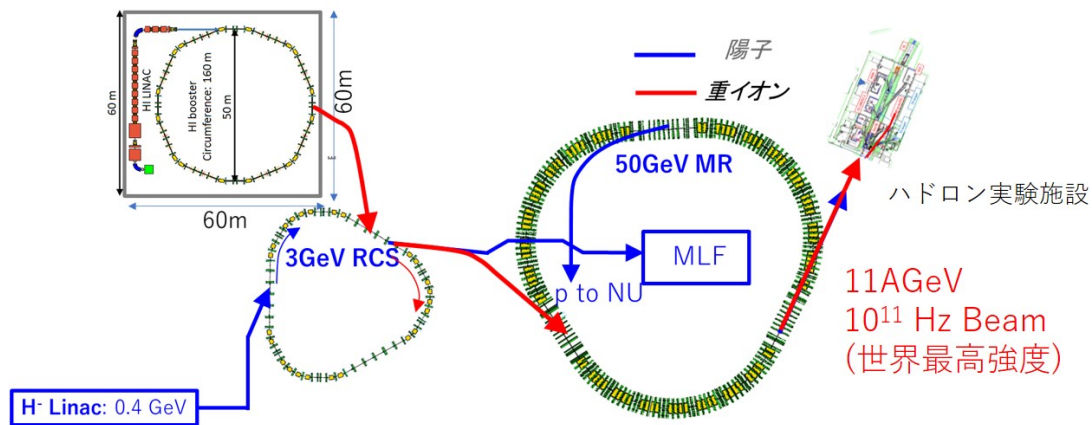


図 11: J-PARC の重イオン加速器の概念図

これに加え、建設コストを抑えて早期に実験を始動するため、最小限の線形加速器と旧 KEK-PS ブースターの移設案も検討中である。これにより、ビーム強度は当初案の 1/1000 となるが、2025 年 までに実験開始してドイツ GSI 研究所 FAIR 加速器の CBM 実験と充分に競合可能となる。本案には KEK の協力が不可欠であり、支援を要望する。

実験は、ハドロンホールに新設された 1 次陽子ビームラインに実験装置を設置して行う。重イオン研究推進グループによって、実験装置の検討が行われている。J-PARC の大強度という特徴を生かして、光子・レプトン対の測定、重クォークなどのレアプローブの測定、マルチストレンジネス測定、ストレンジレットなどの新たな粒子、状態の探索などが研究可能となる。

さらに、重イオン衝突で到達可能な最大密度を実現するためには、次章で述べるように、加速器メインリングの将来的な 50 GeV アップグレードを強く希望する。

2.6 J-PARC 加速器の将来のオプション

2.6.1 50 GeV アップグレード

J-PARC Main Ring (MR) は、最大エネルギー 50 GeV として設計・建設された。しかし、ニュートリノ実験では、このエネルギーは ν_μ の τ appearance 測定を行うには不十分であり、 ν_μ の disappearance および e appearance の測定のためにビームエネルギーでなくビームパワーを重視することとなった。また、ハドロン施設でのストレンジネス核物理実験では、1–2 GeV/c の K^- ビームの強度が重要であるが、それは陽子ビームエネルギーを上げて 30 GeV 程度で飽和する。さらに電気代が加速エネルギーのおよそ二乗に比例する。これまで、50 GeV 運転を必要とする強力な実験の提案がなかったため、MR は 30 GeV で運転を行ってきた。

重イオンビームを MR で加速して高密度物質の生成実験を行う場合は、陽子 30 GeV 相当から 50 GeV 相当にエネルギーを上げることによって、より高密度の物質が生成できるようになり、クォーク物質への相転移を発見する可能性が高くなる。陽子 50 GeV 相当のエネルギーはウランビームで 19 GeV/A に相当し、重イオン衝突で到達しうる最大密度が実現する。FAIR では、現在 SIS100 シンクロトロン（陽子 29 GeV 相当）の建設が進められ

ているが、最大密度を目指して当初予定していた SIS300 加速器（ウランで 34 GeV/A、陽子で 75 GeV 相当）の建設計画はとん挫している。そのため、J-PARC MR を 50 GeV 相当に upgrade して重イオンビームを加速すれば、世界最大のビーム強度でかつ世界最高の密度を達成できる究極の加速器となる。そこで我々は、重イオン加速が実現したのち、MR の 50 GeV upgrade を提案する。

他にも 50 GeV upgrade によって可能になる研究として、以下がある。

- ~ 10 GeV 以上の高運動量 K^\pm, π^\pm, \bar{p} ビームによるハドロン実験: High-p ライン、そしてハドロン施設拡張後は K10 ラインにおいて、チャーム・ハドロン分光実験、 $S=-3$ のハドロン分光・ハイパー核実験、核内チャーム中間子の実験等を計画している。これらは、陽子ビームエネルギーが 30 GeV より 50 GeV の方がビーム強度が上がり有利である (図 12)。

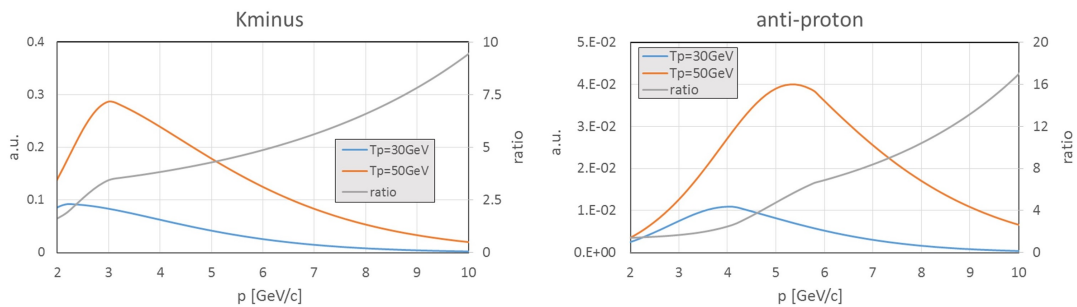


図 12: Sanford-Wang Parameterization による陽子エネルギー 30GeV, 50GeV での K^- 及び \bar{p} の収量の比較。

- 1 次陽子ビームを用いた di-lepton 実験: 核子内のクォーク分布を Drell-Yan 過程で生じるレプトン対を測定して調べる実験が行われてきた。100 GeV 以上の高エネルギー陽子ビームで x の小さな領域を測定してきたが、 $x \sim 0.3$ 程度の大きな x 領域は十分なデータがない。J-PARC での測定が期待されるが、30 GeV 陽子ビームでは断面積が小さすぎて実験が困難であった。50 GeV であれば実験が可能となる。

MR の偏向電磁石は、50 GeV 相当に励磁すると磁場が飽和し始めるため、一様磁場の領域が狭まり大強度ビームを加速できない可能性が指摘されてきた。磁石の作り替えが必要になると数百億円の高額の予算が必要になるが、もし現在の磁石でも 50 GeV 相当の運転が可能であれば、電磁石の電源の増強および電源ケーブルの引き直し等で対処できるため大幅に予算は下がる。50 GeV upgrade に向けて、磁石の作り替えが必要かどうかの検討を今から KEK に進めていただくことをお願いしたい。

2.6.2 ストレッチャーリング

30 GeV (または 50 GeV) のストレッチャーリングを新設し、そこに MR の陽子ビームの一部 (例えば 5 サイクルのうち 1 サイクル分) を入射して、遅い取り出しで高い duty factor でハドロン実験にビームを供給することにより、速い取り出しのニュートリノ実験と遅い取り出しのハドロン実験が同時に実施でき、現状と比べて、ニュートリノのビーム量を減らすことなくハドロンのビーム量を 4 倍程度に増やすことができる。

J-PARC 加速器グループでは以前より技術的可能性を検討しており、MR と同じトンネル内にリングを設置し超伝導ラインで MR からビームを入射する方法も提案している。ただ、建設費が大変高額で、運転費も高い。今後、ハドロンとニュートリノの双方で J-PARC の意

義が一層高まったときに、ハドロンビーム量を大幅に増やすための切り札として、KEKに引き続き検討をお願いしたい。

3 KISS2 —ウランの起源を目指して—

原子核物理学の現代の重要課題の一つは白金やウラン等の重元素の起源の解明である。Fowler(1957)らによる、宇宙における爆発的な速い中性子捕獲過程 (r-過程) 仮説が支持されているが、その起源天体や、具体的な原子核反応経路は未だ解明されていない。重元素の起源の研究は、重力波や天体分光学などの「観測」と、関与する原子核の特性を調べる「実験」と、そのデータを演繹し反応ネットワークを追う「理論」計算という3本柱からなる。重元素合成に関与する原子核は、多くが未確認の短寿命中性子過剰核であり、質量・半減期・励起状態・崩壊様式などの実験データは極めて乏しく、その充実が強く求められている。

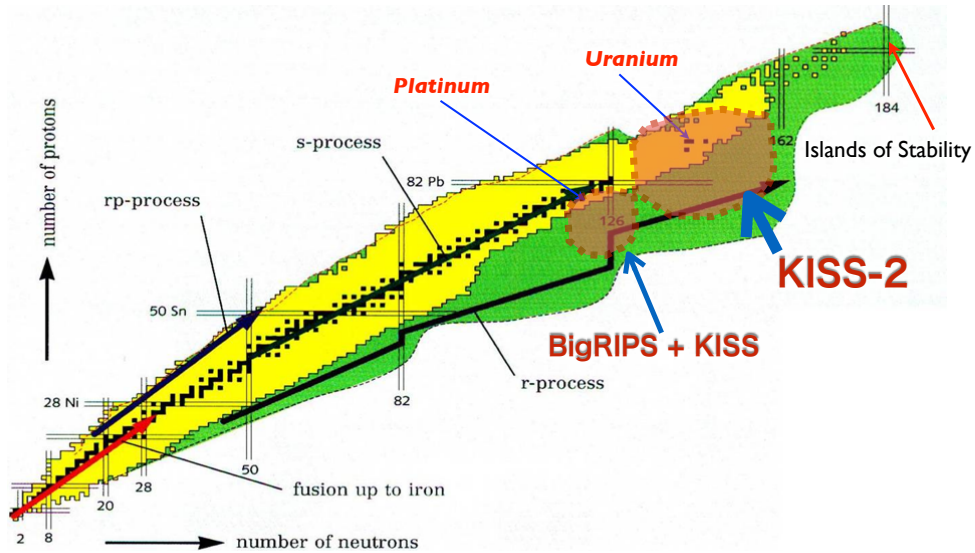


図 13: 核図表に示した重元素合成の経路と KISS2 で測定を計画している原子核

これまで白金に代表される質量数 195 付近に高い存在比をもつ元素の起源については、KISS を初め、世界中の施設で一大目標として挑戦されてきたが未だ到達できていない。これは、該当する中性子過剰核を生成する装置と、それを分離・同定・分光する装置の不整合にあることがわかってきた。最近、RIBF の入射核破砕反応分離器 (BigRIPS) と、KISS のガスセル+MRTOF 機構を組み合わせ生成した低エネルギー短寿命核ビームによる核分光実験で到達できる目処が立ち、本計画の第 1 段階として数年以内に達成できる見込みである。

自然界に存在する最も重い元素であるウランの起源の解明は、究極の目標である。r-過程でウランに到達する経路の原子核は、いまだだれも到達できていない“Terra Incognita”にある。この領域は、世界中の主力施設で用いられている入射核破砕反応や飛行時核分裂反応で生成された高エネルギー短寿命核ビームによる核分光実験では原理的に到達することができない。そこで注目されているのが、KISS で開拓研究を行ってきた、多核子移行反応による低エネルギー短寿命核ビームによる核分光実験である。図 14 左は Cm 標的にウランビー

ムを照射した場合の標的近傍の生成核分布の理論計算であり、核図表上でウランの南東領域の原子核（すなわちウランの起源に関わる原子核）を生成できることがわかる。しかし、この反応による生成法における困難な問題は、多種多量の原子核が同時に生成され、広い角度分布（図 14 右）とエネルギー分布でかつ比較的低エネルギーで得られることである。

この困難な問題に対する最初の挑戦（KISS）では、反応生成物をアルゴンガスセル中で停止・中性化し、レーザーによる共鳴イオン化によって元素（Z）を選択して再イオン化し、質量分離器で質量数（A）を選択して特定の原子核を取り出す方法を開発し、一定の成果を上げることができた。しかしながら、効率および能率の点でウランの起源に挑戦するには依然不十分であった。

KISS2 では、この困難な問題を解決するための“Game changer”技術として、高周波を用いたガスセルと、多重反射型質量分光器（MRTOF）を採用する。この技術は東京大学原子核研究所由来の独自のものであり、反応生成物を取って早々には分離せずに、質量分光器で多数の原子核を一気に測定することを可能にする。ただし、この形式のガスセルに入射するイオンは、 10^7 ion/s 程度以下のレートである必要があるため、一次ビームを分離する前段分離器が必須である。

図 15 は、KISS2 装置の概念図である。まず、1) ガス充填式ソレノイド型一次ビーム分離器で、反応生成物を 30-40%の効率でガスセル装置に入射させると同時に一次ビームをダンプし、次に 2) 高周波イオンガイドガスセルにおいて反応生成物イオンを熱化してイオントラップに蓄積する。この蓄積されたイオンは、直接、3) 第 1 MRTOF 質量分光器にて質量測定する場合と、一旦 30 keV に加速して、4) 質量分離器で粗分離してから分光実験をする場合がある。この質量分離器は、高分解能で単一質量数イオンを取り出すモードと、複数の質量数イオンを同時に導くモードがある。分離後は、5) ガスセルクーラーバンチャー（GCCB）によって再度イオントラップに蓄積するが、ガスセルでの減速過程で 2 価のイオンに変換されると共に不純物分子イオンは分解され、高精度分光に最適なイオンとして、6) 第 2 MRTOF 質量分光器に導かれる。ここで精密質量測定を行うと共に、7) $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ 分光器と組み合わせて、半減期・励起準位構造・核異性体分岐比、遅発中性子崩壊分岐比等を測定する。

従来の KISS に比べて、一次ビーム分離器を導入することで 100 倍の強度の一次ビームを使用することができ、中性化・共鳴再イオン化の過程を省くことで 10 倍程度の効率が期待でき、さらに同時に多数の異なる原子核の測定を実行できるため 10 倍以上の測定能率が得られる。合わせて 1 万倍のゲインが期待できることになり、未知の領域に大きく踏み出す

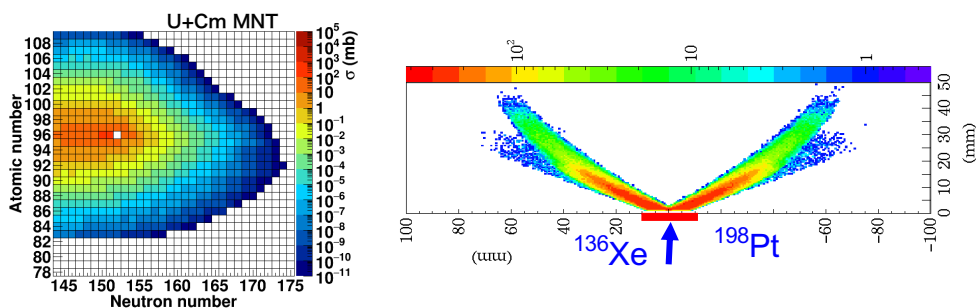


図 14: Cm 標的に U ビーム照射した多核子移行反応で生成される原子核 (左)、多核子移行反応生成物の典型的な角度分布 (右)

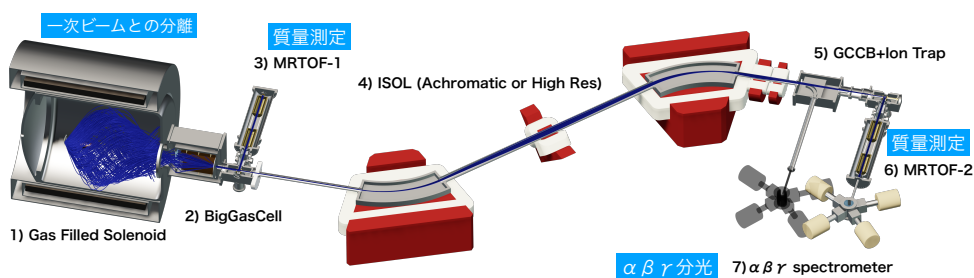


図 15: KISS 2 概念図

ことを可能にする装置となる。

第1段階では、理化学研究所 RIBF の BigRIPS 施設に高周波ガスセル装置と MRTOF 質量分光器を組み合わせ、ウランの入射核破砕反応で生成できる中性子数 $N=126$ 近傍の中性子過剰核の質量・半減期・遅発中性子分岐比を網羅的に測定し、プラチナの起源を解明する。並行して、KISS 施設および GARIS-II 施設において高周波ガスセル装置と MRTOF 質量分光器を用いた多核子移行反応への適用試験を実行する。

第2段階では、KISS2 の一次ビーム分離器であるガス充填型ソレノイド (GASOL) もしくは、大型ガス充填型反跳核分離器 (BigGARIS) の建設を行うと同時に、後段の質量分離器・MRTOF 装置群・ $\alpha\beta\gamma$ 分光装置群を整備し、KISS2 施設を完成させる。その装置で多核子移行反応 ($U+U$, $Am+U$, $Cm+U$ 等) を用いてウランの南から南東方面の原子核の質量・半減期・遅発中性子分岐比・自発核分裂分岐比等を測定し、ウランの起源の解明に寄与する。

多核子移行反応は、新しい超重元素や安定の島へ到達できる可能性が期待されるため、それを狙った施設は世界各地で計画が立案されている (ドイツ GSI、中国 HIAF 等)。しかしながら、KISS に於ける多核子移行反応の開拓研究を通じて得た反応機構の理解と、厄介な多核子移行反応生成物の分離・分光法を根本から変える高周波ガスセル + MRTOF 質量分光器の技術は、KEK 和光原子核科学センターの圧倒的な優越点である。

4 高エネルギー重イオン衝突および電子イオン衝突

冒頭で述べたように、高エネルギー重イオン加速器や高エネルギー電子加速器を用いる実験研究については、これまで外国の加速器施設での国際共同研究による推進を基本としてきた。とはいえ、これらの研究のマスタープラン 2020 学術大型研究計画への採択にも示されるように、KEK を始めとする国内コミュニティによる支援に値することは自明である。本章ではこれらの現状と将来展望を概観し、併せて国内からの支援の必要性と重点項目を議論する。

高エネルギー重イオン衝突実験

世界の趨勢と日本グループの取組

本分野は、超高温・高密度下のハドロン/クォーク物質を生成して、クォーク・グルーオン・プラズマへの相転移機構、臨界点を含む相構造、解放クォーク相の物性から、極初

期宇宙の進化シナリオ検証やカイラル対称性に起因するハドロン質量起源まで、QCD が支配する素粒子多体系の性質解明に挑むものである。クォーク・グルーオン・プラズマの実験的探索は 1970 年代の米国 LBL Bevalac まで遡り、その後、米国 BNL AGS (核子対あたり重心系衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}} \sim 5$ GeV) や欧州 CERN SPS ($\sqrt{s_{NN}} \sim 20$ GeV) などを経て、2000 年代に BNL RHIC ($\sqrt{s_{NN}} \sim 200$ GeV) において存在確証を得た。この間、KEK が所管する日米科学技術協力事業を含め、日本グループが常に世界的にも主要な貢献を果たしてきた。

現在、RHIC において探索に終止符を打った後、世界における高エネルギー重イオン衝突実験の中心は、より高い衝突エネルギーにより高温・大容積・長寿命・純粋な解放クォーク物質を生成する LHC ($\sqrt{s_{NN}} \sim 5$ TeV) である。原子核衝突に特化した ALICE 実験を中心に、陽子相互衝突による素粒子物理学実験を元来の主眼とする ATLAS, CMS 両実験が加わり、さらに LHCb 実験も独自の検出器特性を活かし前方物理やハドロン物理に参画して、活況を呈している。日本からも、筑波大学、東京大学 (原子核物理学研究センター)、長崎総合科学大学、奈良女子大学、広島大学 (以上、五十音順) が、ALICE の正規共同研究機関として主要な役割を担っている。

一方、相構造の探究には高密度領域を探索可能な AGS/SPS 相当のエネルギー領域での実験が有用である。高い自由度を有する RHIC 加速器を用い、筑波大学が参画する STAR 実験が衝突エネルギー走査プログラムを進めている。日本グループが中核の一翼を担った PHENIX 実験は 2016 年にデータ収集を完了したが、次期計画 sPHENIX が 2021 年稼働を目指しており、理化学研究所と奈良女子大学が参画する。

他の将来計画としては、ドイツ GSI FAIR が挙げられる。2025 年に陽子 30 GeV/c 相当の第一次計画 SIS-100 開始を目指し、CBM 実験の準備が進む。従前にはない高統計を実現する固定標的実験である。一方で陽子 90 GeV/c 相当の第二次計画 SIS-300 は現時点で見通しが立たないと聞く。現在のところ日本から FAIR への正式な参画はなく技術協力に留まるが、2025 年に予定される RHIC の最終停止に伴い、中間エネルギー領域に物理興味を持つ研究者らの STAR 実験からの移動もあり得よう。なお、J-PARC における原子核加速計画は FAIR をさらに大幅に上回る大強度高統計を目指す。

さらに CERN が検討する次期大型ハドロン加速器 FCC での原子核衝突プログラムも議論が始まっている。

国内からの支援の必要性和重点項目

上記の中でも、ALICE 実験は日本グループの近年の取組の中核であり、現時点で 2030 年までの実験稼働と参画継続が確定している。2019 年から 2020 年に掛けての LHC 第 2 期長期停止 (LS2) において、多面的な検出器高度化と 2 桁ものデータ収集系高速化を進め、2021 年から計画する第 3 期運転 (Run 3) では日本グループが開発建設に参画する主飛跡検出器高度化、前方飛跡検出器新設、共通読出回路系高速化などを導入する。当該物理分野における近年の重要発見である陽子相互や陽子原子核などいわゆる小さい衝突系での解放クォーク相生成の予兆に決着が期待される他、クォーク物質の相構造、クォーク相の詳細物性、カイラル対称性回復現象、エキゾチックハドロン生成など、重要かつ多彩な物理の解明を目指す前途が開けている。さらに 2025 年からの第 3 期長期停止 (LS3) において筑波大学などが推進する超前方検出器の導入が ALICE 実験内で正式承認され、後述する電子イオン衝突とも強く関連する低 x_F の物理への新展開も見込む。

一方で、かつての米国 BNL AGS 加速器における実験から RHIC PHENIX 実験までを支えた日米科学技術協力事業が縮小され、継続的な研究資金支援体制が失われたことにより、大型共同実験研究における実験参加費が参加研究機関の大きな負担となっている。ALICE 実験の場合は博士号を持つ研究者 1 名あたり年額約 100 万円が必要であり、科研費などの短期的な外部資金によって参加を維持しつつ新たな研究開発をも進めていくには困難も伴う。大学共同利用機関である KEK 素核研には継続的な後ろ盾としての役割を要望したい。

また、ALICE 実験への参加各国には上記に加え、計算機資源の貢献割当が課せられる。2020 年現在で日本に求められている貢献は CPU 能力 18 kHS06, ストレージ 1.8 – 2.0 PB に上り、短期外部資金での負担は容易でない。さらに今後の高統計データ収集に合わせ、シミュレーションを含む計算量とデータ量の更なる需要増が見込まれる。KEK 素核研には計算機センターなどを通じて、少なくとも地域拠点級の Tier 2 以上の提供を望む。

ALICE 実験は素核研の既存大型プロジェクトである ATLAS 実験と LHC 加速器を共有するが、積年に亘り日本グループが世界的にも主要な貢献を果たしてきた高エネルギー重イオン衝突物理学の知見に基づき、広範な横運動量領域の多種粒子の測定により高温解放クォーク相の包括的理解を担う独立分野の主要実験である。今後、素核研が主体として取り組む計画の一つとして、上記 2 点のいずれかについてでも人員配置を含めた検討を願う。

高エネルギー電子イオン衝突実験

世界の趨勢、日本グループの取組、国内からの支援と協力の必要性

本分野は、陽子および原子核の三次元的内部構造および原子核内部でのグルーオン飽和などを明らかにし、QCD 物理の新領域を拓き、原子核・ハドロン物理の拡大を目指すものである。

アメリカの原子核物理学の次期将来計画として偏極電子と陽子または原子核の衝突型加速器が計画される。2020 年 1 月には建設地として BNL が選定され、数年後の建設開始と 2030 年頃の実験開始が予定されている。山形大学、理化学研究所などの研究者を中心とする日本グループもこの計画に参画し、世界各国の研究者と共同して物理および検出器の議論を開始した。今後 10 年間程度で実現する世界唯一の新たな衝突型加速器となる可能性があり、核子構造や重イオン衝突の系統的理解を経て高エネルギー物理学の精度向上にも寄与し得る。従って、現時点で KEK 素核研に対し具体的な要望の段階ではないものの、物理および検出器の検討において ATLAS 実験の日本グループを始めとする高エネルギー実験研究者とも協力の議論が望まれる。

5 原子核物理のロードマップのタイムライン

J-PARC ハドロンホールの拡張計画 (HD EX) は、建設全体で 6 年計画であり、約 2 年半のビーム停止期間が必要である。これは、ビームダンプの移設と一次ビームライン系の機器設置などのために、どうしてもビームを停止しなければならない時期が生じてしまうことによる。そこで、できるだけこのビーム停止時期 (BS) の前に効率よく成果が上がる実験データを取得することが肝要となる。

2020 年度には K1.8 ビームラインで E40 ($\Sigma^{\pm}p$ 散乱), E03 (三原子 X 線), E42 (H 探索) 実験が KURAMA スペクトロメーターを使ってデータ取得が実施予定である。2021 年

KEKにおける原子核物理ロードマップ（スケジュール）

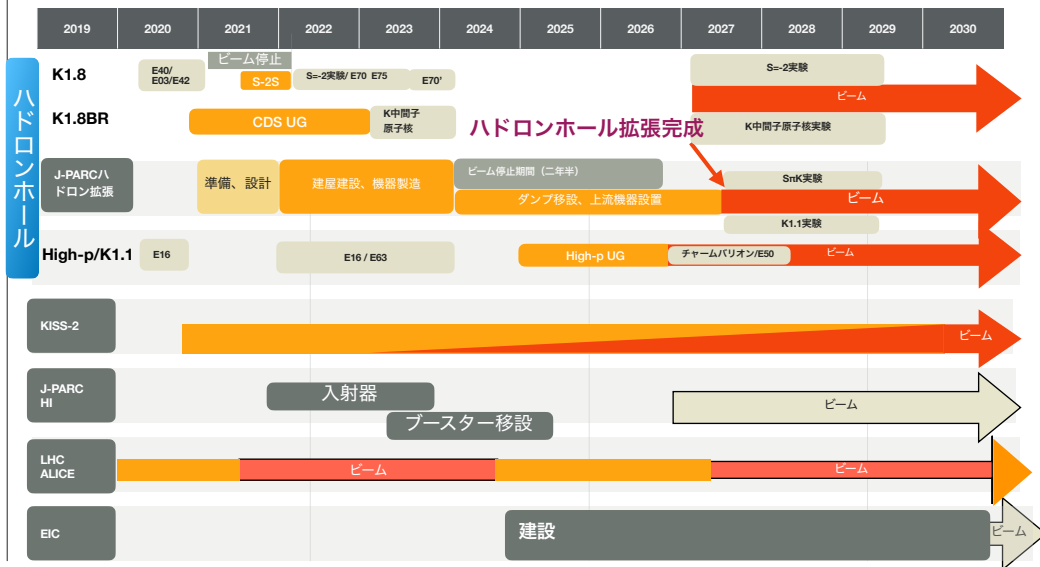


図 16: 原子核物理のロードマップのタイムライン（案）。

度には主リング電磁石電源の入れ替えが予定されている。2022年度にはK1.8ビームラインにS-2Sスペクトロメーターが設置され、E70（ Ξ ハイパー核分光）などがデータ取得を行う。

K1.8BRビームラインでは、K中間子原子核の本格的な実験がビームラインと検出器をアップグレードして計画されており、HD EXによるBS前（2023年度）に実施できることを期待したい。2027年頃に拡張されたハドロン実験ホールに新たなビームが供給できる予定であり、HIHR、K1.1という新しいビームラインが稼働を始める。

高運動量ビームラインは、E16（核媒質中 ϕ 中間子の質量スペクトル測定）がコミッションを開始した。その後は、二次ビームの供給を可能にして、E50（チャームバリオン分光）など、K1.8では得られない $2\text{GeV}/c$ 以上の2次粒子ビームを用いたハドロン原子核研究を推進する。HD EXに伴うビーム停止期間を利用し、高運動量ビームラインの二次ビームライン化を進め、E50が走る環境を整えたい。

高エネルギー重イオン衝突実験はLHC ALICE実験を中心に進むはずであり少なくとも2030年頃まではこれが重要である。J-PARCでの重イオン加速は、入射器建設とKEK旧ブースター移設などを2025年度頃までに完成させることができれば、ハドロンホール拡張後に重イオン加速が可能となるかもしれない。

KISS-2計画は、10年間で10億円の予算が手当てできれば2030年頃から新しい実験が開始できる。

6 原子核コミュニティからの KEK ロードマップへの要望

既設のハドロンホールが有するビームライン (K1.8, K1.8BR, High-p) について、そこから最大限の成果を生み出すよう、原子核コミュニティとしても努力を惜しまないつもりである。しかし、原子核コミュニティとして以下のような大型プロジェクトについて素粒子原子核研究所に要望し、KEK のロードマップ作成にあたり考慮していただきたいと考える。

- ハイペロン・パズルに象徴される高密度ハドロン物質の性質解明に向けて、 $S\pi K$ 計画を含むハドロンホールの拡張に着手すること。原子核コミュニティは、これを最優先で要望・支援する。
- 並行して既存ビームライン K1.8BR や High-p の性能向上を目指すこと。原子核コミュニティはこれに協力する。
- ウランまでの重元素合成の解明に向けて KISS-2 計画を推進すること。
- 海外での高エネルギー重イオン衝突実験の推進のための支援体制を整備すること。
- J-PARC 主リングでの重イオン加速、エネルギー増強、ストレッチャー、などの将来のアップグレードを検討すること。

これに加えて、加速器科学を推進する KEK は、次世代のエレクトロニクス、IT 技術、先端測定器などの基盤技術開発を大学のコアとなって推進することが、将来を切り拓く鍵であると考えられる。

A 素核研将来計画検討タスクフォースメンバーリスト

(氏名)	(所属)
永江 知文	京大理 (座長)
田村 裕和	東北大理
中村 哲	東北大理
大西 宏明	東北大電子光理学センター
田中 万博	KEK 素核研
小沢 恭一郎	KEK 素核研 (幹事)
上坂 友洋	理研仁科センター
志垣 賢太	広島大先進理工
三輪 浩司	東北大理
鵜養 美冬	KEK 素核研
和田 道治	KEK 素核研
野海 博之	阪大核物理研究センター
佐久間 史典	理研仁科センター
高橋 俊行	KEK 素核研
澤田 真也	KEK 素核研
高橋 仁	KEK 素核研