

2006年4月28日

大阪大学 核物理研究センター  
センター長  
土岐 博 殿

2004年8月の核物理研究センター研究計画検討専門委員会において将来計画ワーキンググループ（大西 明 委員長）に付託された審議事項を答申いたします。

当ワーキンググループは、核物理において日本および世界のセンターとして重要な役割を果たしてきた大阪大学核物理研究センター（RCNP）の将来像を議論するため、2004年2月に開催されたRCNP 研究計画検討専門委員会（研計委）において同委員会が主体となってこれを立ち上げることが決定されました。さらに同年8月の委員会においてRCNP 内部からのメンバーを半数としたワーキンググループが発足し、約1年半にわたって議論を重ねていただきました。その間、研計委においてもワーキンググループの途中経過報告を受け、研計委の委員による質疑や批判に対してさらにワーキンググループで議論を進めてもらうというプロセスを繰り返しました。その結果として、「Photon beam と Hadron beamを活用し、原子核構成要素の実体を明らかにすることによって、クォーク多体系としてのハドロン物理、ハドロン・核子多体系としての核物理を追求する」という最終提言に至りました。本研計委はこの提言を尊重し、これを基礎としてより具体的なRCNP の将来像が描かれることを希望します。本研計委としましても、今年度中にはRCNPの将来計画に関するワークショップ等を開催し、将来計画に対する機運を、RCNP・研計委が協力して盛り上げていくことを提案させていただきたいと思っております。

2006年度 RCNP 研究計画検討専門委員会、委員長  
中村隆司



# RCNP 将来計画 WG からの提言

保坂、中野、酒見、堀田、二宮、民井、大西\*、櫻木、與曾井、上坂、澤田

2006 年 4 月 10 日

## 提言

本将来計画 WG は、RCNP が photon beam と hadron beam を活用し、原子核構成要素の実体を明らかにすることによって、クォーク多体系としてのハドロン物理、ハドロン・核子多体系としての核物理を追及することを提言する。

- 中間子・バリオン多体系としての原子核の性質をハドロンビームによって解明する。例えば、核内に実在的、あるいは仮想的に存在する 粒子をはじめとする様々な中間子の分布・性質を核内での有効核力・核子の波動関数と関連づけて明らかにする。また、これを実現するための実験施設について検討する。
- ハドロンというクォークが閉じ込められた状態の実体と、その複合性に起因するハドロン構造と相互作用の多様性を理解するため、反応機構を押さえた上でハドロン分光を展開する。そのために、レーザー電子光ビームラインの増設拡充を図る。
- 上記の物理を確実に推進するため実験理論共同研究体制を拡充する。そこでは、RCNP が中核となって全国の研究者との共同研究を進める。

歴史的に有効核力の和として記述されてきた原子核の「平均場」は、ハドロン物理から見れば「仮想的な中間子の場」、QCD からは「真空中凝縮した  $\bar{q}q$  の場の変化」等の様々な言葉で説明されてきた概念である。しかしながらそれらに対する首尾一貫した理解はこれまでの研究によっても十分に解明されていない。理論と実験の連携のもとその実体を解明し、「クォーク・ハドロン多体系」としてハドロン物理・原子核物理の Grand Design を作り直すことは、クォーク・グルーオン、ハドロン、原子核のそれぞれの階層の関連を明らかにすることを通じて、QCD のレベルから原子核を統一的に理解することとなり、現在の原子核物理学の重要な課題である。このことは様々な階層で普遍的にみられる、現代物理の最も本質的な概念である対称性の自発的破れに関する理解を飛躍的に深めることになる。ここでは、上の 3 つの方向での展開を進めることを提言する。さらに若手の育成を含めて、関連分野まで含めたコミュニティーの発展に寄与できる研究センターとなることを合わせて提言とする。

---

\*委員長

# Contents

1	RCNP が目指すべき物理	4
2	RCNP で今後展開していくべき原子核物理学の課題	6
2.1	ハドロンビームによる研究	6
2.2	実光子ビームによる研究	7
3	必要と考えられる施設・人材・体制	8
3.1	ハドロンビーム施設	8
3.2	実光子ビーム施設	9
3.3	核物理研究センターの人材と体制について	9
3.4	外部の核物理研究グループとの協力体制について	10
4	まとめ	12
A	RCNP が目指すべき物理についての補足	13
A.1	強い相互作用をする粒子を見る	13
A.2	原子核の階層	14
A.3	統一理解に向けて	15
A.4	原子核 (クラスター) から原子核へ	16
B	RCNP でのこれまでの成果 (I): — リングサイクロトロン	18
B.1	原子核の特徴的なスピンアイソスピン励起状態	18
B.2	中間エネルギーでの反応過程と、核内反応過程の研究、核力の研究	19
B.3	原子核のクラスター構造	19
B.4	原子核の密度分布、中性子スキン、変形核構造	20
B.5	原子核のスピンアイソスピン応答と凝縮	20
B.6	遷移行列要素と天体核反応	21
C	RCNP でのこれまでの成果 (II) LEPS	22
D	日本、および世界の加速器施設での物理学	22
D.1	他の陽子加速器施設での物理学	22
D.1.1	Saturne2	22
D.1.2	COSY	23
D.1.3	LAMPF	24

D.1.4	LISS	24
D.1.5	概括	25
D.2	他の研究施設での核物理学	25
D.2.1	RI ビームファクトリー	25
D.2.2	J-PARC での核物理	26

# 1 RCNP が目指すべき物理

原子核とその構成要素であるハドロンはともに強い相互作用に支配された系であり、その性質を解明することは、ハドロン・原子核物理のみならず、素粒子物理や天体・宇宙物理などの関連分野の発展につながる。そのため、定量的にコントロール可能な学問体系を整備することが重要な課題である。まず原子核を強く相互作用する核子と中間子の多体系と捉え、中間子交換による核力から、平均場や対相関でみられる中間子場の実体に対する首尾一貫した理解を目指す。ハドロン物理においては、中間子の生成消滅反応にともなって作られる励起状態や、エキゾチックハドロンの性質を解明し、原子核物理との融合を図るとともに、クォーク・グルーオン動力学の理解を進める。これらの研究は通常環境にあるハドロンや原子核の研究であり、通常と異なる環境に置かれたエキゾチックな状態の研究の基盤となる。

これまで原子核物理では多くの側面が研究されてきた。殻模型の独立粒子性が広い範囲で機能する一方、変形核やクラスター構造など集団運動の側面が多くみられる。また、中間子凝縮も予想されている。静的には質量数と原子番号を、動的にはエネルギーや運動量、温度や核子密度等をパラメータとして、ある「相」から別の「相」への転移がおこる、かつこれらを実験的にも検証できる非常にユニークなシステムといえる。現代物理学の最も重要な概念である対称性の破れをいろいろな局面で検証することにもなる。この系の基盤となるのが核子と強く相互作用する中間子である。核力の主要な部分は中間子交換によって記述される一方、中間子の生成に伴って様々なバリオン状態も作られる。これらハドロンの物理はQCDによって記述されるもので、原子核物理の研究は究極的には量子色力学の非摂動力学の理解につながるものである。このように、「原子核」、「ハドロン」、「クォーク・グルーオン」の3つの階層の物理に対して一貫した理解を目指すことが重要である。このことは、様々な環境で変化するハドロン・ハドロンの動力学の基礎になる。

低エネルギー領域における非摂動量子色力学の最も特徴的な性質は、カラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的な破れである。その結果、ハドロンの質量が生成されるとともに、質量が殆どゼロのパイ中間子が出現する（南部－Goldstone ボソン）。パイ中間子と核子の相互作用はカイラル対称性によって規定される。さらに、核力の引力は中間子のスカラーモードによって、テンソル力の一部はベクトルモードによって作られる。従って、中間子が原子核とハドロンの物理に果たす役割は極めて重要である。しかしながら、核物理においては従来中間子の自由度が核子と同等にあからさまに扱われることは余りなく、核物理の様々な相の現象はそれぞれの領域で比較的独立に理解されてきた。同様の事情はハドロン物理においても見られるばかりか、最近のエキゾチック状態の研究は、従来の理解を越えた新しい概念の必要性を示唆しているかのようである。

これらの問題に取り組むため、RCNP では、ハドロンビームと光ビームを用いて、様々な原子核標的に対していろいろなエネルギーと運動量移行領域で、非弾性反応・中間子生成・バリオン生成反応等の実験研究を検討する。同時に理論研究を推進し、クォーク・グルーオン、ハドロン、原子核の現象を共通の基盤に基づいて理解することを目指す。

リングサイクロトロンでは、高品質ビームと高精度スペクトロメータを用いた精度の高い核分光学が行われ、スピン・アイソスピンの物理で重要な成果をあげてきた。これは、パイ中間子の物理と直結している。同様の手法を発展させ、スピンやアイソスピン量子数を制御しながら中間子生成反応を行ない、原子核中に存在する様々な中間子（あるいは中間子相関）の性質を探ることができる。精度の高いデータを提供することで、ガモフテラー共鳴で見られたような、これまでにない新しい現象が見つかるかが期待できる。

LEPS における偏極 GeV 光子を用いた実験では、ファイ中間子やオメガ中間子、ハイペロン生成の他、ペンタクォークなどのエキゾチック粒子の探索で極めて重要な成果をあげてきた。とりわけ、ペンタクォークの議論をとおして、ハドロン物理に対する理解が十分でないことが明らかにされた。現在の前方検出器に加えより広い立体角の測定器を用意することで、反応の入り口と出口をおさえた

観測が可能になる。それによって反応機構を押さえながら、ハドロンの動力学を明らかにすることができる。

以上の物理を進める上で、実験と理論研究の密接な連携が不可欠である。そのため、実験・理論、および研究分野に対する適切な人員配置が重要である。特に重要な分野に対して、必要な時期に十分な資源を投入できるような柔軟な体制が望まれる。また若手の育成も重要で、特に全国的な視野に立った支援を検討する必要がある。

## 2 RCNP で今後展開していくべき原子核物理学の課題

### 2.1 ハドロンビームによる研究

原子核は、強く相互作用する核子と中間子の多体系である。中間子交換によって記述される核力と、平均場や対相関を通して見られる中間子場の役割に対して、首尾一貫した理解を進める必要がある。

核力の主要部分は中間子交換によって記述される。前節で見たようにこれに最も大きく寄与する中間子はパイ中間子である。さらに原子核の束縛には、 $2^-$  のスカラーモードが引き起こす引力やベクトルモードの担うテンソル力も重要な役割を果たしている。これらの中間子あるいはモードは、核子間で仮想的 (virtual) に交換されるものであり、それらの空間的 (space-like) 成分を見ていると言える。

一方で、原子核反応においては、中間子の生成・束縛や、吸収が行なわれることもある。残留核を中間子と結合していた初期状態に残すコヒーレント中間子生成反応は、初期状態に仮想空間に存在していた中間子にエネルギーと運動量を与えることにより実空間に移す (叩き出す) 反応と捉えられる。中性子星のような高密度核物質中では、中間子凝縮状態の存在可能性が議論されており、これは静的な状態での中間子の存在を意味する。逆に、中間子原子の生成反応は、外部からの相互作用により生成した中間子を原子核の場に留める反応である。これらの反応は、中間子の実的・時間的 (time-like) 成分を見ていると言える。

ハドロンビームによる研究では、この空間的成分と時間的成分の両側面から中間子の関与する現象を探ることで、これまで核子の有限多体系と見なされてきた原子核を、核子と中間子の多体系として理解することを目的とする。

原子核中に存在する仮想中間子の性質を調べるために、コヒーレント中間子生成実験を行う。軽イオンビームを用いて、原子核中に存在する仮想中間子をソフトに叩きだし、放出中間子を検出すると同時に、偏極ビームによる反応選択性を用いて残留核の量子状態を決定する。この反応過程では、残留核は叩き出された中間子と結合していた量子状態にとどまると考えられる為、低励起離散状態を探索する。パイ中間子やオメガ中間子の分布関数の測定は、原子核平均場の理解、そして真空構造の解明へとつながる。残留核が基底状態の場合は、入射ビームから放出される仮想パイ中間子と原子核の散乱と考えられる。実パイ中間子ビームでは調べられないスピン応答に敏感な運動学的領域にアクセスでき、原子核内のパイ中間子相関やデルタ - 空孔間の短距離相関を調べることが可能になる。この研究では仮想中間子をソフトに叩き出し、スピン縦方向応答関数の寄与が主となる  $0^\circ$  を含む超前方測定が重要となる。異なる中間子の生成断面積の比や原子核依存性を測定することで、不定性が大きい核構造や反応機構の情報を相殺して、仮想中間子の分布関数を精度よく抽出することができる。

また、GeV 領域の軽イオンビームの特徴を活かし、中間子生成反応の素過程や素過程に近い反応を始めとするハドロン物理を推進する。例えば、 $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$  反応は、閾値近傍でイータ中間子生成断面積が非常に大きいことが知られている。生成された多数のイータ中間子を用いて、 $\eta$ <sup>3</sup>He 準束縛状態の探索やイータ中間子の稀崩壊実験を中心とした「イータ中間子物理」が可能になる。またこの反応には、核子の  $1/2^-$  の励起状態  $N(1535)$  が強く関与していると考えられていて、この励起状態の研究に有効である。スピン・アイソスピン制御が可能なハドロンビームの特徴を活かして、Roper 共鳴  $N(1440)$  や  $N(1710)$  等の核子の励起状態に焦点を置いた「アイソスカラー・核子共鳴の研究」を展開する。核子と同じ量子数をもつ Roper 共鳴の性質を明らかにすることで、核子の圧縮率の抽出など、核子構造の研究を深めることが可能になる。現時点では、Roper 共鳴が一つの共鳴か、複数の共鳴の複合なのか、さらには共鳴でないのかでさえ明らかではない。アルファ粒子、重陽子等のアイソスカラー粒子による非弾性散乱を用いて、アイソスカラー励起状態を選択的に励起し、かつ崩壊粒子をも検出することで Roper 共鳴を明確に識別し、その性質を詳細に調べる。 $N(1535)$  と Roper の物理は、 $\Delta(1232)$  とあわせて、バリオンのカイラル対称性の問題とも密接に関連していて、静的な性質の他中



間子との結合などのダイナミカルな性質を調べるのが重要である。

これらの研究は、これまで核物理研究センターにおいて進められてきた研究の柱の一つである「核内でのパイ中間子場の増大」に代表されるスピン・アイソスピン核物理の自然な展開であるとともに、LEPSにおいて実光子ビームで進められているハドロン物理を、ハドロンプローブを用いて相補的に進めるものである。

実験的には、「高分解能質量欠損スペクトロスコピー」を行うため、高分解能ビームを使用し、終状態で生成される中間子を検出して残留核の状態を精度よく決定する Exclusive 測定を行う。断面積が小さいコヒーレント中間子生成過程を効率よく調べるためには、大強度かつ高品質のビームが必要である。可変エネルギーで、スピン・アイソスピンを制御する反応選択性をもつ多彩な偏極・非偏極軽イオン ( $p, d, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, {}^6\text{Li}$  等) ビームは残留核の量子状態を決定するのに必要不可欠である。ビームエネルギーとしては、陽子・陽子の散乱により、パイ、シグマ、オメガの各中間子が素過程で生成されるエネルギーまで実験可能とする。対象とする反応が 0 度方向で強く励起される場合が多いので、0 度を含む超前方測定と高分解能・相関測定が可能な装置を建設する。Exclusive 高分解能質量欠損スペクトロスコピーは、核内の仮想的・実的中间子分布を探查する新しい分光学的手法を開拓し、従来の原子核の描像を大きく変革するものである。

## 2.2 実光子ビームによる研究

原子核をクォーク、ハドロンの多体系として理解する上で、構成要素であるハドロン自体の構造を詳細に理解する事が不可欠なのは言うまでも無いが、我々の理解は未だ不十分である。ハドロンの構造や性質を、実光子による実験により、生成反応機構と核内及び核外での崩壊の様子を両面から、総合的に明らかにしていく。

特に、LEPS グループによってペンタクォーク  $\Theta^+$  の存在を示唆するデータの報告がなされて以来、 $qqq$  状態のバリオン、 $q\bar{q}$  状態のメソン以外のマルチクォーク状態が理論的にも実験的にもより現実味を伴って研究されるようになって来ており、マルチクォークハドロンを含むエキゾチックハドロンとしてどの様な状態が存在し得るのかを明らかにすべきである。その際に重要なのは、存在の有無や static な性質だけを調べるのではなく、生成・崩壊機構、運動学的条件の依存性等を丁寧に調べる事でエキゾチックハドロンの構造の理解に結び付ける事である。この事は同時に、量子数が  $qqq$  で記述可能な励起バリオンの構造 (クォーク相関やメソン-バリオン結合状態の可能性等) の解明にもつながると考えられる。

実光子ビームは始状態に陽にはクォーク、反クォークを持ち込まないため、始状態をおさえた上で反応機構を理解する目的には有利である。さらに、直線偏光ビームを有効に利用し  $t$ -チャンネル交換粒子を選択できるという特長を有している。一方で反応断面積が小さく、一つのセットアップでの実験が長期に渡るのが一般的である。実験的には、LEPS の特徴であった前方の高分解能スペクトロメーターに加え、標的まわりを大立体角の検出器で覆うことにより、様々な反応を最小バイアスで同時に測定し、得られたデータから多様な反応を詳細に解析するという手法を取る事になるであろう。

実光子プローブはクリーンである反面、多様性等の点ではハドロンプローブの方が有利であるという事も出来、両者は相補的な関係にある。RCNP ではハドロンビームによる研究と実光子ビームによる研究をあわせてクォーク、ハドロンから原子核への統一的な理解を目指すべきである。

### 3 必要と考えられる施設・人材・体制

#### 3.1 ハドロンビーム施設

目的とする物理を実現するために、加速器・検出器を始めとする実験装置に要請される内容は下記の様なものである。物理内容に関する詳細の検討、実験の feasibility に関する議論を進めるとともに、装置に要請される内容を具体化する必要がある。

##### 加速器に対する要請

- 陽子ビームと水素標的の  $pp$  衝突により、 $\pi, \sigma, \omega$  の各中間子を生成する素過程実験が行なえるエネルギーまでの陽子ビームを可変エネルギーにて供給できること。
- 陽子、重陽子、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  の各軽イオンが加速できること。
- 偏極陽子、偏極重陽子が加速できること。偏極イオン源の製作が可能であれば、偏極  $^3\text{He}$ 、偏極  $^6\text{Li}$  のイオンが加速できること。
- ビームの偏極軸の制御ができること。
- 引出しビームにて  $10^{12}$  粒子/sec 以上のビーム量を供給すること。
- 相関実験に関する要請から、DC ビームもしくは遅い引き出しによるビームを供給することができること。
- 高分解能による測定を可能にする様な、小エネルギー幅、小エミッタンスのビームを供給すること。具体的には、原子核を標的とするコヒーレント中間子生成実験において、終状態原子核の励起エネルギーを  $\sim 1\text{MeV}$  の精度で測定できること。
- 超前方散乱実験を可能にする様な、ハローフリービームを供給すること。

##### 実験装置に対する要請

- 高分解能スペクトロメータを有すること。具体的には、磁気スペクトロメータが想定されるが、散乱  $^3\text{H}$ 、 $^6\text{He}$  を分析可能な高偏向能力を有すること。スペクトロメータの設計にあたっては、他粒子相関実験、Exclusive 測定の実現に重点の 1 つを置くこと、
- Exclusive 測定を可能にする様な、複数のスペクトロメータを同時に使用できるシステム、もしくは、あるいはそれに加えて、崩壊粒子の同時測定を可能にするシステムを有すること。
- $\pi$  中間子などの生成中間子自身もしくはその崩壊粒子の測定を可能にする  $4\pi$  検出器を有すること。
- 超前方測定を可能とすること。より具体的には、中間子生成反応における超前方散乱粒子をタグし、エネルギーを精度よく測定することができること。
- 散乱中性子を高分解能にて測定する装置、施設を有すること。
- 一般的な安定原子核を標的とできること。厚い、具体的には液体もしくは固体の、水素標的を有すること。偏極水素、重水素標的を有すること。

##### その他の要請

- 現有施設および現有の土地に拘らない。有効利用できることは望ましい。

### 3.2 実光子ビーム施設

LEPS における  $\Theta^+$  の発見（まだ世界的に確認されたわけではないが）はマルチクォーク・ハドロン物理の曙である。丁度 KAMIOKANDE が超新星爆発からのニュートリノ検出によってニュートリノ物理の幕を大きく開き、その後 SuperKAMIOKANDE によって飛躍的に発展させたように、クォーク核物理の一層の進展を促すためにより規模の大きい光子ビーム施設の建設を推進する。但し、現時点では新たな専用加速器の建設は視野に入れず、Spring-8 の利用を境界条件とするのが現実的な解であろう。

新ビームラインに対する要請は以下の 2 点に集約される。

#### ● 光子ビームのアップグレード

- － 高エネルギー化：(1) より短波長のレーザー使用によるレーザー電子光の生成 (2) 放射光 X 線の再入射による逆コンプトン散乱 (3) 自由電子レーザー等のコンパクト加速器からの X 線利用
- － 大強度化：(1) 高出力レーザーの使用 (2) レーザー入射オプティクス改良（長距離伝搬非回折ビーム (LRNB) 等）
- － 質の向上：衝突点での蓄積リング内電子ビームプロフィールの整形（強度アップにも有効）

その他、現 LEPS と同様にビームの偏光性は重要。

#### ● 検出器アップグレード

- － 規模と柔軟性：(1) 超前方を含む多目的 4 検出器 (2) 荷電粒子と中性粒子（含光子）の同時測定システム
- － データ収集：最小バイアストリガーを可能にする高速データ収集システム
- － 標的：通常の固体、液体標的に加え偏極標的を使用

大規模検出器のためには、実験ハッチの場所とデザイン（現 LEPS においては実験ホール内にあるため非常に制限されている）をどうするかが非常に重要である。

新ビームライン建設、及びその後の実験遂行、データ解析においては財政面だけでなく必要なマンパワーは現 LEPS を大きく凌ぐものとなり、RCNP 単独の計画としては無理がある。RCNP 主体ではあるが広くいくつかの施設、研究グループとの共同でプロジェクト進めていく体制作りが肝要である。

### 3.3 核物理研究センターの人材と体制について

核物理研究センターは、平成 17 年秋現在、教授 5 名、助教授 6 名、助手 7 名（内 1 名は任期付きの特任助手）、計 18 名の教員ポストと 6 名の技術職員を擁する研究センターである。また、11 名の事務職員が所属している。また、これら以外に、博士研究員（任期つき雇用）が在籍している。この規模は、一大学のひとつの講座や研究グループの規模よりはるかに大きい。他の核物理分野の研究所の例を挙げると、理化学研究所では本林重イオン核物理研究室が 8 名（内 1 名は理論）、桜井 RI 物理研究室が 5 名、旭応用核物理研究室が 5 名の常勤研究員を擁している。東大 CNS は総勢で教員 9 名である。

補遺 B に記述されるように、核物理研究センターは核物理分野においてこれまで数多くの成果を挙げてきた。これはひとえに職員および関係者各位の努力と能力の賜物である。草創期、あるいは

ングサイクロトロン建設時は、実験系の教員のほとんどがなんらかの形でそれらの作業にほとんどの労力を割いていたようである。しかし、例えばリングサイクロトロンの建設が一段落した平成6,7年頃からは、リングサイクロトロン以外のアクティビティが活発になってきた。現在では、リングサイクロトロンの加速器施設の運転維持および研究に主に従事している教員が3名、リングサイクロトロンの実験施設の運転維持および研究に主に従事している教員が4名、SPRING-8/LEPSでの研究や運転維持に従事している教員が4名、双方の実験施設の研究に従事している教員が1名、理論研究に従事している教員が2名、共通基盤技術開発研究（計算機）に従事している教員が1名である。他に、奈良県大塔村（現五條市）でのダブルベータ崩壊の研究、天体核物理の研究等に従事している教員、主に教育に従事している教員がいる。

本ワーキンググループにおいては、今後この報告書にあげたような将来計画を進めていくにあたり、核物理研究センターがどのような人的体制を持つべきかについて議論し、次のような提言を行う。

プロジェクトの数を絞り、人的資源の集中的な投入を行うこと： 現在核物理研究センターにおいて進められているプロジェクトの数はその人的資源に比べて多すぎると思われる。その結果としてどのプロジェクトにも十分な人的資源が配分されていないとすれば、核物理研究センター全体として成果をあげられないだけでなく、それぞれでは優秀である個々の研究者の能力を十分に発揮できていないということにもなる。文字通り核物理研究の中心たるべき核物理研究センターは、今後将来計画を進めていくにあたって、率先して行うべきプロジェクトの数をある程度絞り、人的資源の集中的な投入を行うことが必要であろう。本ワーキンググループとしては、三つ程度の中心プロジェクトをもつことをイメージしている。

もちろん、基礎科学の研究は各研究者の自発的な活動に支えられているものであり、現有のスタッフに対して別の分野の研究を行うことを強制するものではない。むしろ、センターのマネジメント側が新たな人事を行う際に十分に考慮すべき問題であると考えている。加えて、採用時にはあるプロジェクトに従事することを前提として人事を行った場合でも、数年後にはそのプロジェクトを事実上離れ、独立した活動を行う例が見受けられる。これは、そのプロジェクトに魅力がないことによる可能性がある。従って、マネジメント側は、数年以上の中・長期的な視点を持って魅力あるプロジェクトの選定および人事計画を立てるべきである。また、採用後の研究者に対するケアもマネジメントの大きな仕事である。

### 3.4 外部の核物理研究グループとの協力体制について

これまでに述べてきた将来計画を実行していく上では、核物理センター外の研究グループ、とりわけ理論グループとの協力体制を整えることが不可欠である。特に国内の複数の理論グループが一つのシリーズ実験に関与し、議論することが研究の流れを作る上で不可欠といえる。クォーク・ハドロンから核子多体系にわたる核物理研究センターのテーマそれぞれに理論研究者を引きつけることは簡単なことではない。一つの原因としては、研究資金の流れの問題がある。例えばGSIでは、実験課題に連動した資金を理論グループに供給することにより理論グループを引きつけ、理論グループはその資金によって大学院生・ポスドクへの給料を出している。日本ではこうした資金の流れはなく、各大学・研究所の理論グループがそれぞれの資金により研究を進めているため、自由に研究課題を展開できている。これは長期的な理論課題を展開する上ではメリットであるが、実験研究の進展と理論研究の進展を同期させより実りのある結果を出すという点においては改善を要する。

核物理研究センターにおいて外部のグループの関与を促す方策として、以下の3項目を提案する。

- 「スクール」の開催  
以前は菊池スクール等が核物理研究センターで開催され、直接参加した若い研究者がそこから

多くのことを学びその後の分野の発展に寄与したのはもちろんであるが、そこで準備されたテキストが後々まで多くの研究者に利用されているという好例がある。このようなスクールを復活させ、定期的を開催することを提案する。

- 「RCNP 奨学生」の創設

RCNP の中心となるプロジェクトにおいては RCNP 外の研究者の主体的な参画を促す。特に関連する理論研究の積極的な参画は重要で、そのため何人かの全国の大学院生に月（5-10）万円程度の奨学金を出し、スタッフの関与も期待する。これには財源の手当てが必要であるが、一部はリサーチアシスタント経費等を効率的に利用することにより可能となると思われる。

- 「RCNP プロジェクト研究 (仮称)」の創設

RCNP の中心となるプロジェクト研究に加え、それを補い裾の広い研究基盤を形成することを目的として、「RCNP プロジェクト研究 (仮称)」を創設する。プロジェクトの立案、参画、遂行を全国の研究者に呼びかける。これには理論的研究も含まれる。

## 4 まとめ

現在、日本の原子核物理学では RIBF と J-PARC という大きな加速器施設が建設されており、不安定核、 $S = -2(\Xi, \Lambda\Lambda)$  核の生成と性質の解明、宇宙における元素生成の実験室での再現、原子核の構造関数、核内ベクトル中間子の性質等、新しいエキゾチックな対象の生成を通じた原子核物理学の広がりをつくり出そうとしている。

一方で、これらの発展の基本となるのは、通常核と通常の真空におかれたハドロンの性質の理解であり、クォーク・グルーオンからハドロンへ、ハドロンから原子核へという2つの階層に対する一貫した理解を深く進めることが不可欠である。前者においては光子ビームというクリーンな入射チャネルを用意して最小バイアストリガーのデータをとる。そのうえで、超前方と大立体角領域で生成粒子を捉えることによって、反応過程をおさえたとより *exclusive* なデータをとる。このことにより、これまでの研究を質的に凌駕するハドロン物理学の展開をもたらす。またペンタ・クォークの研究からも分かるように新たなエキゾチック・ハドロン等の発見があれば、クォーク・ハドロン物理学の大きなパラダイムシフトをもたらす可能性がある。後者においては核内中間子自体の性質を調べるのみでなく、中間子が媒介する核力を通じて核構造との関連で調べることは、RCNP が培ってきた質の高いビームと精度の高い測定器・測定技術を組み合わせて初めて可能となる重要な課題である。 $\alpha$  粒子や様々な中間子とともに核子対が凝縮し得る原子核はボソン・フェルミオンの混合凝縮系としてとらえられるが、核子対以外の核内での凝縮についてはこれまでに直接的に示された例はない。研究を展開することで新たな発見があるであろう。

## A RCNP が目指すべき物理についての補足

ここでは1章で述べた内容についての補足を行う。

### A.1 強い相互作用をする粒子を見る

ハドロン・原子核のかかわる諸現象では、強い相互作用の結果様々な粒子が仮想的に生成され、核子のみならずこれらすべてが原子核の構成要素となる。これらは真空中に凝縮した  $\langle \bar{q}q \rangle$  と相互作用し、真空の性質を変えながら再び原子核の構成要素の性質に影響を与える。強い相互作用による様々な状態の混合は、ハドロンの言葉では仮想中間子の励起、原子核物理では力の平均場、クォークハドロンの言葉では  $\bar{q}q$  の揺らぎ、sea quark の分布等と表現される。これら仮想的な揺らぎを実粒子としてとり出す、または生成することによって元の系の性質を探ることができないだろうか。また、真空から、あるいは原子核内から生成される場合の特徴の違いから QCD 真空の性質を探ることができないだろうか。

近年注目を浴びているエキゾチックハドロンに関しては、その存在自体が非摂動 QCD の理解に大きな影響をあたえるはずである。現在の LEPS データは存在を強く示唆しているが、その生成過程は極めて特殊な生成機構を必要としているように見える。このことは、エキゾチック粒子がこれまでの我々の想像を超えた特殊な構造をしている可能性を示唆している。同時に我々のハドロン物理に対する理解が十分でないことを強く示唆している。

以上の問題を一つ一つ解き明かすためには、関与する自由度をうまく引き出すために運動量移行や量子数の移行を制御した反応過程を分析することが必要であろう。RCNP ではこれまでエネルギーや運動量、スピン偏極、アイソスピン移行等を制御しながら原子核・ハドロン実験を行ってきた。この技術を最大限に発展させることが出来れば、世界的にユニークな原子核・ハドロンの研究を展開することができる。理論研究の面でも、これまでともに行われてきた原子核とハドロン理論両面の研究を、より QCD のミクロな観点にたって協同して進めることで、より一層の発展が期待できる。これら exclusive 反応の特徴と期待できることをいくつか列挙すると：

- 散乱生成反応の運動学的領域を指定することで、ピックアップ反応、ノックアウト反応、共鳴生成反応等を選択的に調べることができる。ファインマングラフの言葉では、初めの2つは、 $t$  チャンネル反応、 $u$  チャンネル反応と言うことができる。
- 入射、放出粒子のスピンを制御し交換粒子のスピンを特定することができる。このアイデアを進め、前方散乱でパイオンをピックアップすることが出来れば、運動量移行がゼロのソフトなパイオンモード分布を調べることができる。こうして得られる「原子核の axial charge」の情報、パイオン平均場に基づいた核構造の発展の基礎となり得る。
- 例えば重陽子の exclusive 反応では、アイソスピン移行が禁止されるのでアイソスカラーモードに依存した物理を調べることができる。同様に、ヘリウム核の exclusive 反応では、スカラー・アイソスカラーモードを見ることができる。カイラル対称性の観点からはスカラーモードはパイオンモードと同等に重要であり、対称性の破れと回復機構を探る手がかりを与える。
- Exclusive 反応は理論的には coherent 過程の計算を必要とし、入射・標的粒子の構造が反映される複雑な過程であるが、同様の過程をいくつか比較することで構造の情報を相殺することが出来るだろう。
- ハドロン・原子核ビーム、および光子ビームの特性を活かし相補的な情報を得ることができる。ハドロンビームはスピン・フレーバーを運び多様なチャンネルでの応答を見ることが出来る反

面、強い相互作用がそれらを乱してしまう。一方光子は比較的単純ではあるがきれいなデータを取ることができる。ハドロンでは到達できない深い領域の様子を見ることができる。

以上の研究は実験と理論の連携のもとに進めることで、十分な成果をあげることができる。まずは反応機構を明らかにするために、実験データの理論的な解析が必要になる。そしてそれを実現する構造の理解に向けていく。理論的には、現象論的模型、有効模型による解析を進めると同時に、格子 QCD や QCD 和則など基礎理論に基づいた解析を進めるべきである。さらに重要なことは、同じ視点にたつて原子核とハドロン物理を見直すことである。同じ強い相互作用の物理である原子核物理とハドロン物理の連携を深めることで、新しい概念と手法を作り出すことが強く期待される。

## A.2 原子核の階層

原子核はクォーク・グルーオン、ハドロン、核子 (バリオン) の集合体として様々な様相を見せている。「強い相互作用」をする 3 つの階層では QCD、カイラル模型、殻模型等のように取扱いの大きく異なる理論型式により記述されてきた。

- クォーク・グルーオン: これらは構造のない点粒子とみなせ、その性質は標準理論の一部をなす QCD によって説明される。エネルギーのスケールが大きく GeV を越える漸近自由領域においては QCD を摂動論によって扱うことができ、発展方程式により深部非弾性衝突を定量的に記述することができる。またバリオン密度が 0 の状態では格子 QCD によりハドロン相から QGP への相転移が記述できる。
- ハドロン: ところが、クォークからハドロンが形成される低エネルギー領域では QCD に直接基づく解析的な手法が知られていない。この領域では摂動論は適用できず、格子 QCD のモンテカルロ解法か、非摂動効果 (カラーの閉じ込め、質量の生成、カイラル対称性の自発的破れ) を取り込んだ有効理論による研究がなされてきた。前者ではカイラル極限を直接扱えない、複数のハドロンや大きく広がった共鳴状態を記述するには格子のサイズが足りない、後者ではパラメータを含み、適用範囲が限定される、等の問題があるものの、これまでの研究の結果、断片的ではあるがたくさんの知識を蓄えつつある。
- 原子核: いったんクォークからハドロンが作られると、カラー自由度はハドロン内に閉じ込められ、外側の領域ではカイラル対称性の自発的破れにともなって現れる軽い 粒子の交換力が核力の主要部分をしめる。重陽子の束縛や核力から出発して厳密に解ける少数系等では 粒子交換力に含まれるテンソル力が大きな役割を果たすことが知られているが、重い原子核ではテンソル力の直接項は打ち消しあうため、核内での核力はテンソル力を繰り込んだ密度依存の有効中心・スピン軌道力により表すことができ、核子の平均場中の一粒子運動と核子間の弱い残留相互作用により原子核の基底状態と低励起状態を記述できる。

それぞれの領域における運動法則に基づく研究が進んだ結果として、— 原子核の半径は  $A^{1/3}$  に比例し飽和性を示している、原子核の魔法数は 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 である、原子核の低エネルギー集団励起は反転対称な表面振動・回転である、クラスター状態はしきい値近辺に現われる、核力はコア領域を除いて中間子交換であらわせる、強いスラカータイプの引力とベクトルタイプの斥力が相殺し適度な強さの引力を作っている、ハドロンにはバリオン (3 クォーク状態) と中間子 (クォーク・反クォーク状態) がある、これらは SU(6) スピン・フレーバー対称性を良く満足している、パイオンと核子間の相互作用は低エネルギー定理で良く説明できる、 $\bar{u}, \bar{d}$  をもたない  $K^+$  は核子との共鳴状態をもたない、QCD 相転移は弱い 1 次が 2 次である、— 等の経験的な原子核観が形作られてきた。ところが近年の原子核物理学の発展は著しく、ほんの 10 年前には「常識」と考えられていたこれらの多くの事柄が、実験・理論の進展により次々と崩れている。



これらの発展の特徴の一つは実験施設・技術の発展に牽引されていることである。代表的な例としては次のような分野がある。

- 不安定核の物理: 1980年代から大きく進展した「不安定核ビーム」を利用する実験は1次元的な(ある質量数に対してだいたい1つ存在する)安定核近辺での物理を中性子数・陽子数をコントロールできる( $N, Z$ )2次元平面での原子核の物理に拡張した。陽子数にくらべて中性子数が極端に大きな原子核の研究から、核物質密度の飽和性から得られる半径( $\propto A^{1/3}$ )よりもはるかに大きな多数の原子核の存在、魔法数の2, 8, 20, ... から2, 6, 16, ... への変化、しきい値よりも低いエネルギーでのクラスター状態の存在等、様々な「常識」が一般的でないことが示されてきた。この流れの中で、理研のRIBF(建設中)では全ての安定核種を100 A MeV以上で加速して新たに1000-2000種のアイソトープを発見する能力をそなえている。
- ハイパー核物理: ハイペロンを含む原子核の研究ではこの10年間で励起スペクトルの分解能を3桁も向上させ、ハイペロン-核子相互作用の研究を通じてYukawaから始まった核力の理解の再考を促すとともに、ダブル・ハイパー核、深く束縛した $K^-$ 核などの新たな束縛系を見つけて出している。KEK-JAERI(日本原子力研究所)の統合計画であるJ-PARC(建設中)では50 GeV陽子から高強度の二次 $K^-$ ビームをつくり、( $N, Z, S$ )( $S$ =Strangeness)の3次元核図表へ展開することが大きな目的となっている。
- 高エネルギー重イオン反応: 高エネルギー重イオン衝突実験では、世界初の重イオン衝突型加速器(RHIC)が稼動し、素過程段階でパートンが動きだすエネルギー領域での重イオン反応において、QGPの生成が確認されつつある。明らかになってきたRHICエネルギーで生成されるQGPの様相は、「相互作用のないmasslessのクォークとグルーオンが熱平衡状態にある状態」として定義される摂動論的QGPではなく、「強く相互作用しつつも完全流体的に振る舞い、パートンのエネルギー損失を引き起こすsQGP(strongly interacting QGP)」である。RHIC-PHENIX Collaborationには多くの日本人が参加し、中心的な役割を果たしている。
- エキゾチックハドロン: フォトン・レプトンのビームは原子核やハドロンを奥深くから励起させ、短距離での相関やハドロン内のクォーク構造にメスをいれてきた。その結果、ある種の共鳴状態、例えば $\Lambda(1405)$ はクォーク模型の $qqq$ 状態ではなく、 $\bar{K}N$ の相関を強くもつことが示唆された。また、これまでに知られていない粒子の存在がいくつか示唆されている: ベクトル中間子の光生成でみられるスカラータイプのポメロン、ペンタクォーク粒子( )などである。特に生成は非常に限られた条件の元でのみ観測されている可能性があり、これまでの常識では理解できない構造をしている可能性がある。非摂動QCDの多様な様相を示した結果かもしれない。
- クォーク相関: 上記の $\Lambda(1405)$ における $\bar{K}N$ 相関の他、バリオンでは $qq$ (diquark)相関の重要性が指摘されてきた。これは複数のダイクォークが存在できるエキゾチッククォークでとくに重要になる。実際には $qq$ もしくは $\bar{q}q$ 相関の競合を定量的に調べる必要がある。これによってハドロンの構造が決まってくる。理論的には適当なハミルトニアンのもと、エキゾチック状態を正確に解く必要がある。この種の研究は最近始まったばかりである。実験的には、生成崩壊過程、反応機構、中間子との結合を調べることで構造の情報を蓄積する必要がある。

### A.3 統一理解に向けて

これらの発見・発展の多くは異なる階層でばらばらに考えられてきた法則間の矛盾が現れたとみることもできるだろう。例えば、クォークとグルーオンにより記述されるべきQCD真空が核子の存在により変更を受け結果としてハドロンの質量が変化し、結果として核内の有効相互作用が変更を受け、核内で有効中心力・有効スピン軌道力として繰り込めると考えられてきたパイ粒子交換力のテン

ソル部分のあらわな影響により魔法数が規定され、また変化することが示唆されている。これらの事例はクォークから原子核にわたる対象を一貫した方法で扱うべきであることを強く示唆している。

原子核についての描像に大きな変更が必要であるとすれば、上述した発見・発展がなされた「エキゾチックな」系のみでなく、通常の原子核の研究を新たな視点で見直すことが必要であると同時に、豊富なデータ提供による効率のよい進展が期待できる。RCNP では良質のビームと高精度の観測器により「通常核」についての精密なデータを提供してきた。施設の増強により、これまでの成果にもとづいて階層をつなぐ新たな原子核観を得る上での大きな役割を果たせるだろう。

RCNPで行なうべきな研究テーマをいくつか列挙すると：

- 原子核内の平均場：これまでの平均場理論で考えられてきた「中間子の場」を直接見る。例えば、前方領域の散乱でパイ中間子をピックアップすることにより、原子核内の axial-charge 分布を見ることができる。と強く結合する 粒子の生成を利用することも考えられる。さらに、シグマや 粒子のように重い中間子を見ることによって核内の平均場分布の全体像を明らかにする。
- 殻構造の核依存性：パイ中間子交換によるテンソル力が、原子核の殻形成に重要な役割をしていることが指摘されている。1 粒子準位の構造に強い質量数依存性が予想されることから、準位間の遷移をおさえた反応をいろいろな原子核で行なうことによって、この性質を明らかにすることができる。
- マルチクォーク状態： 粒子の他にどのようなマルチクォーク状態が存在可能か。それは  $qqqq\bar{q}$  構造なのか、あるいはさらに多くの  $\bar{q}q$  成分を含んでいるのか。それらはどのような反応機構によって生成され崩壊していくのか。いずれも、QCDの基本的な問題に関係している。
- 励起バリオン：多くの状態は  $qqq$  として記述可能であるが、なかには  $\bar{q}q$  の付加された、中間子・バリオン系とみなせるものがある。理論的には  $\Lambda$  粒子の励起状態でその可能性が議論されている。 $qq$  相関  $\bar{q}q$  相関の物理と強く関係している。実験的には崩壊・生成過程を詳しく調べることによって構造の違いを明らかにできる。
- GeV 領域での未知ハドロンの探索：様々な Exclusive 実験を考案し、従来見えていなかった粒子の存在可能性を探る。例えば  $\Lambda(1405)$  は 2 つの共鳴の重ね合わせかもしれない。ベクトル中間子の光生成では、t-channel に未知の粒子による Regge 軌跡の寄与が見えているかもしれない。これらの粒子が選択的に関与できるような運動量移行、スピン・フレーバー移行等を指定したクリーンな条件の元で研究を行なうことが望まれる。

以上の現象の背景には、QCDに基づいた強い相互作用の物理が存在している。ハドロン中でのクォーク・反クォーク相関、その結果生成される様々なハドロン状態、パイ中間子に支配された核力、その結果生成される核内平均場とそれに基づいた多種多様な原子核構造、これらはいずれも、QCD の非摂動効果の解明なしには理解できない問題である。これらの統一的な理解に向けての研究を推進することが重要である。

#### A.4 原子核 (クラスター) から原子核へ

以下では、原子核物理における近年の進歩、例えば直接解法の進展、殻模型や集団模型基礎付け、中性子過剰核領域への発展、クラスター構造の生成などの問題を通して、核子多体問題の多様性を明らかにすると同時に、多核子系の有効ハミルトニアンがどこまで理解できているかについて概観する。

- 少数多体系の計算手法の進展とクラスター模型・殻模型の展開
  - ・ Faddeev 法/Faddeev-Yakubovsky 法, HH(Hyperspherical Harmonics) 法, Gaussian-Lobe 変分法, COSM(cluster-orbital shell model), Stochastic 変分法, 等の新たな計算手法の進展により, それまで困難であった 4 体以上の少数系の計算が可能になった。一つは, 現実的核力から出発して 3, 4 核子系を直接高精度で解き上げることが可能になり, 手法間の精度の相互比較も行われている。また, 従来は  $^{12}\text{C}=3\alpha$ ,  $^6\text{He}=\alpha+2n$  等に限られていたものが,  $\alpha$  粒子の対称性を壊した  $2\alpha+4N$ ,  $\{(3N) + N+2n\}+\{^3\text{He}+t\}$  等の多粒子配位の計算やハイパー核の 4 体 5 体計算なども可能になり, それに伴って, 核力の  $\ell \cdot s$  力の効果や, YN 相互作用の検証, クラスターの構造と Shell Model 的構造の競合等も陽に議論できるようになった。RCNP リングサイクロトロンで行われてきた実験課題の幾つか ( $A=6$  核の 3 核子クラスター励起, 核内 クラスター励起, ソフト双極励起, 等) はこれらと深く関連している。また, これらと相まって, 分子軌道法 (MO) や多中心クラスター模型により  $x\alpha+yn$  ( $x, y = 2, 3, 4, \dots$ ) 描像での中性子過剰核研究も進展しつつある。
    - ・ 一方,  $sd$ -shell を超える中重核領域でも, VSM(Variational Shell Model) や MCSM(Monte-Carlo Shell Model) などの計算手法により, 平均場の面でも模型空間の面でも従来の Shell Model 計算の枠を超えた計算が可能になっており, 核内有効相互作用や殻構造に関する新たな視点を提供しつつある。
- 核子多体系におけるクラスター構造 / 分子的構造の発現
 

AMD(Antisymmetrized Molecular Dynamics) やパリティ射影ハートリー・フォック法などの進展により, 核子多体系としての原子核の構造を, クラスターや従来の意味の平均場を予め仮定せず, (有効核力からスタートはするが) 核子レベルから直接解き上げ, 結果として, どのような場合に平均場的構造やクラスター構造 / 分子的構造が発現するか, それらが ( $N, Z$ ) の変化に対してどのように変遷するかを, 主として  $p$ -shell ~  $sd$ -shell 領域の軽い安定核から中性子過剰核を中心に, 系統的に調べられ, その幾つかは実際に実験的にも検証されつつある。また, 最近では, AMD のパリティ・角運動量射影をした変分計算も可能となり, 基底状態だけでなく励起状態も含めた分光学的情報も提供されつつあり, 精密な実験による検証が待たれる。
- 共鳴状態・核反応 (関連項目のみ)
  - ・ Complex-scaling method → 共鳴状態の幅の議論, 少数系の励起状態の多くは unbound states!
  - ・ Glauber/Eikonal → halo/skin 構造, 反応機構
  - ・ CDCC, ABC 法: 非摂動的 3, 4 体反応のダイナミクス (CDCC 法でもクーロン分解を高精度で解けるようになった (九大 G))
  - ・ クーロン分解法 → ソフト双極モード, 天体核反応
- 光学ポテンシャル, 有効核力, 核間相互作用の微視的理論, 等
  - ・ 偏極  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  イオン源・偏極ビームが強く望まれる。
  - ・ 150MeV/u  $^3\text{He}$  弾性散乱での  $A_y$  測定 (リング実験): バーミンガムの 10MeV/u 以来の快挙! →  $^3\text{He}$  の光学ポテンシャルの確定への重要な一歩。(中心力しか解らなかつた。中間エネルギーでは LS 力は断面積にも効くので, 従来の中心力部分の決定にも疑問あり。)
  - ・ Folding model の進展:
    - (1) 有効核力の密度依存性, 有限レンジの交換項 → Nuclear-Rainbow 散乱, エネルギー依存性
    - (2) 複素有効核力に基づく folding model : 反応ダイナミクスにも重要

## B RCNP でのこれまでの成果 (I): — リングサイクロトロン

大阪大学核物理研究センターではリングサイクロトロンで加速した主に軽イオンビームを用いて原子核の実験研究を進めてきた。

核子当たり 100-400 MeV のエネルギー領域の軽イオン入射核反応では、次のような特徴がある。

- 歪曲波の効果が他のエネルギー領域に比べて小さく曖昧さが少ない。
- 1 ステップ的な反応が主に行われる。このため、DWBA などの計算により反応メカニズムが比較的よく再現される。

この特徴に加え、RCNP の実験施設は下記のような装置的な特徴を備えている。

- 高分解能、ハローフリー、高品質ビームと高分解能スペクトロメータ。
- グランドライデンの高 bending power。triton が 450MeV まで測定可能。
- 偏極陽子、重陽子ビーム、スピン軸の操作性。散乱陽子の任意の方向の偏極度が測定可能。
- 大口径スペクトロメータと併用した 2 粒子同時測定、崩壊粒子を含めた測定が可能。
- 中性子 TOF コース、中性子偏極度計、中性子スピン回転磁石。

これらの特徴を活用して、下記のような原子核に関するの研究が行われてきた。

1. 原子核の特徴的なスピンアイソスピン励起状態
2. 中間エネルギーでの反応過程と、核内反応過程の研究、核力の研究
3. 原子核のクラスター構造
4. 変形核構造
5. 核のスピンアイソスピン応答と 凝縮、
6. 遷移行列要素と天体核反応

### B.1 原子核の特徴的なスピンアイソスピン励起状態

様々な反応の特徴を生かして、新しいスピンアイソスピン励起状態の発見、励起エネルギー・強度・分布・崩壊過程の観測を行う。

- $(\alpha, \alpha')$  反応によるアイソスカラー型双極子共鳴の観測、核物質の非圧縮率の抽出。
- $(\alpha, \alpha')$  反応によるアイソスカラー型単極子共鳴の系統的測定、核物質の非圧縮率の抽出。
- $^{60}\text{Ni}(^7\text{Li}, ^7\text{Be}\gamma)$  反応によるアイソベクトル型単極子共鳴の観測。
- $^6\text{Li}(^7\text{Li}, ^7\text{Be}\gamma)$  反応によるソフト双極子共鳴の候補の観測。
- $^{208}\text{Pb}(^3\text{He}, tp)$  反応によるアイソベクトル型スピン単極子共鳴の候補の観測。

- $(^3\text{He}, t)$  反応によるガモフテラー共鳴、スピン双極子共鳴の崩壊測定。
- $(^3\text{He}, t)$  反応の高分解能測定によるガモフテラー共鳴の微細構造の研究。
- $(p, n)$ 、 $(n, p)$  反応によるガモフテラー励起強度の測定。和則との比較。クエンチング問題の解決。

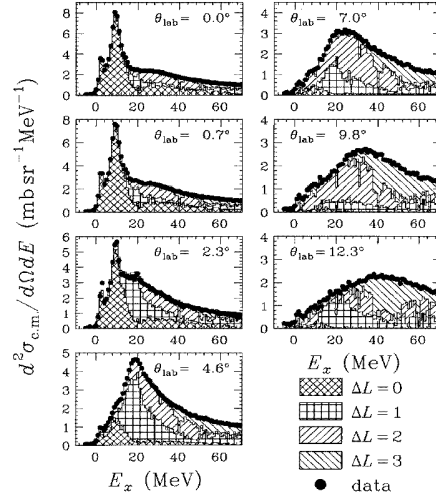


Figure 1:  $^{90}\text{Zr}(p, n)$  反応による  $^{90}\text{Nb}$  励起スペクトルの multipole decomposition 解析 (T. Wakasa *et al.*, PRC55(1997)2909)。(n, p) 側の測定と合わせ、ガモフテラー遷移強度和則の  $88 \pm 2 \pm 5 \pm 1 \pm 2\%$  の励起強度を観測 (K. Yako *et al.*, PLB615(2005)193)。

## B.2 中間エネルギーでの反応過程と、核内反応過程の研究、核力の研究

中間エネルギー領域の特徴を生かし、核内有効相互作用、媒質効果、相対論的效果、3核子間力など原子核反応の特徴的な反応の研究を行う。

- 弾性散乱の精密測定。相対論的インパルス近似計算による解析。核内媒質効果。
- $(p, 2p)$  反応による核内相互作用、媒質効果の研究。相対論的解析と核内での中間子質量減少。
- 陽子非弾性散乱によるアイソベクトルテンソル力、アイソスカラースピンの抽出。
- 3核子間力の効果の発見。Faddeev による少数系反応過程の精密計算。

## B.3 原子核のクラスター構造

特に軽い核においては原子核はシェルモデル的な構造とクラスター的な構造の2面性を持つ。このクラスター的な構造の特徴を引き出す測定を行う。

- $(p, 2p)$  反応による励起状態からの崩壊測定による原子核の SU(3) クラスター構造の研究。
- A=6 核の3核子クラスター励起状態の観測。
- $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha')$  反応による凝縮状態の候補の観測。

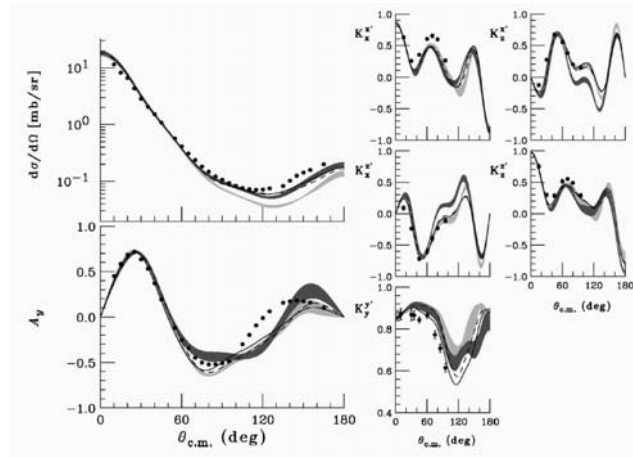


Figure 2:  $\bar{p}+d$  弾散乱測定の精密測定と Faddeev 理論計算との比較。核子当たり 250 MeV。散乱断面積は 2 核子間力のみ計算 (薄い線) では再現されず、3 核子間力 (濃い線) を入れることで大幅に改善する。偏極量は必ずしも改善しない。(K. Hatanaka *et al.*, PRC66(2002)044002)

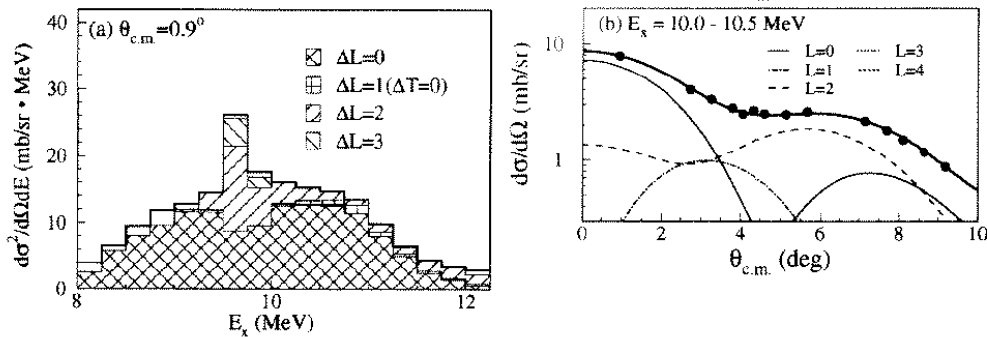


Figure 3:  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha')$  反応測定と Multipole Decomposition 解析。 $\Delta L=2$  の強度が  $\alpha$  凝縮状態候補 ( $J^\pi=2^+$ ) と考えられている。(M. Itoh *et al.*, RCNP Annual Report 2003)

#### B.4 原子核の密度分布、中性子スキン、変形核構造

原子核の核子密度分布を引き出す。また中性子密度分布を引き出す。(陽子密度分布は電子散乱データから) 中性子スキンの構造を調べる。また励起状態の変形核構造との結合を調べる。

- 陽子弾性散乱測定による核子密度分布、中性子密度分布の抽出。
- $(\alpha, \alpha')$  反応によるアイソスカラー型双極子共鳴の核変形との結合による分離。
- $^{25}\text{Mg}(^3\text{He}, t)$  反応測定による  $[2\ 0\ 2]_{3/2}$  ニルソン軌道の発見。

#### B.5 原子核のスピアイソスピン応答と 凝縮

原子核のスピアイソスピン応答を軸に、応答関数の統合的な理解を目指す。核力の短距離相関を表す  $g'$  パラメータを抽出し、核内での 粒子、 粒子の役割を調べる。凝縮の可能性を探る。

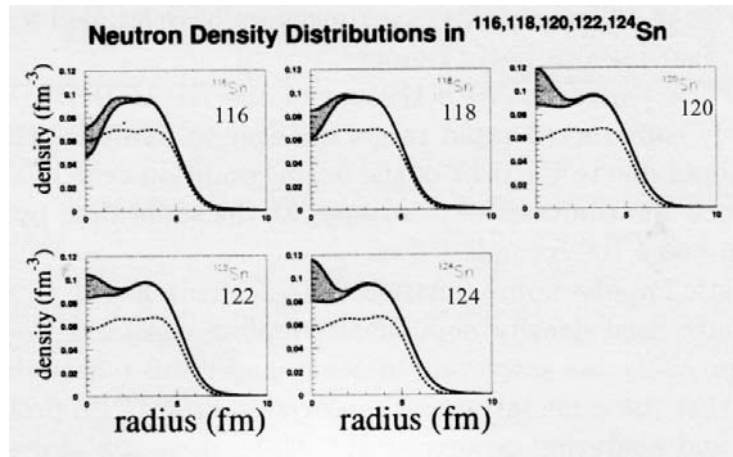


Figure 4: 陽子弾性散乱断面積、偏極分解能測定データから決められたスズ同位体の中性子密度分布 (実線 + エラーバンド)、点線は電子散乱による陽子密度分布。(S. Terashima *et al.*, RCNP Annual Report 2002)

- $(p, n)$  反応による核のスピアイソスピン応答の測定、スピン縦応答、横応答の分離。
- $\pi + \rho + g'$  モデルと乱雑位相近似計算による解析。凝縮の前駆現象の示唆。
- $g'_{NN}$ 、 $g'_{N\Delta}$  の抽出。中性子星で凝縮現象が起きる可能性。

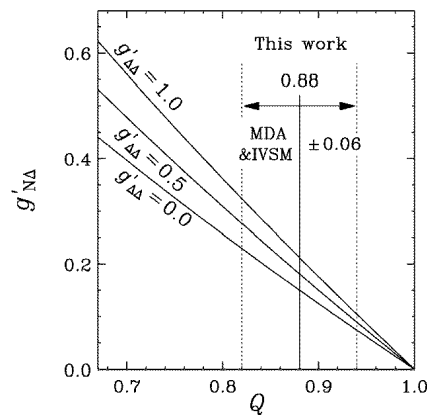


Figure 5:  $^{90}\text{Zr}(p, n)$ ,  $(n, p)$  測定から得られたガモフテラー遷移強度和則値からのクエンチング量より  $g'_{N\Delta}$  の許容される範囲を決める (K. Yako *et al.*, PLB615(2005)193)。

## B.6 遷移行列要素と天体核反応

核反応測定を原子核の遷移行列要素を測定するための手段として用い、天体核反応や元素合成などの反応の記述およびニュートリノ検出器の効率を議論するために必要な基礎データを取得する。

- $(^3\text{He}, t)$  反応によるガモフテラー遷移強度の測定。ニュートリノ検出器の感度、超新星爆発・元素合成過程に関わる遷移行列要素の測定。ダブルベータ崩壊の換算行列要素の見積もり。

コメント：以上はすべての成果をあげたものではなく、割愛しているものがある。特に応用関係など。また、実験手法・解析手法や開発中の実験を除き、物理と結びついているものを抽出している。

## C RCNPでのこれまでの成果 (II) LEPS

SPring-8の8 GeV 蓄積電子ビームに紫外レーザー光を照射し、逆コンプトン散乱の結果生成される、レーザー電子光ビームを用いて、以下のような成果が得られた。

- ストレンジネスが+1である5クォークバリオンである $\Theta^+$ (シータ)粒子の存在を示す実験結果を世界に先駆けて発表した。その後行われた液体重水素標的を用いた再実験でも $\Theta^+$ の存在を強く示唆する結果が得られた。残念ながら、他の実験グループから、多くの肯定的な結果と共に否定的な結果も数多く報告されており $\Theta^+$ の存在は実験的に確立していない。今後のLEPSでの更なる研究により、混沌とした状況に終止符を打つことが望まれる。
- 中間子の光生成反応を、陽子標的を用いて行い、閾値エネルギー付近ではポメロン交換過程だけでは説明できない、生成断面積の増加が見られた。スピン観測量はt-channelでのナチュラルパリティ粒子の交換の寄与を示唆しており、グルーボール交換の可能性がある。
- $\phi$ 中間子光生成反応断面積の質量数(A)依存性を測るにより、 $\phi N$ 断面積の大きさを求めた。理論的に予想される値よりもはるかに大きな値が得られた。この結果は、核内での $\phi$ の性質の変化を示唆する。
- 終状態が $\pi^+\Sigma^-$ になる場合と $\pi^-\Sigma^+$ の場合で、 $\Lambda(1405)$ の崩壊質量スペクトルが異なることを示した。メソン・バリオン共鳴状態として $\Lambda(1405)$ を記述するChiral Unitary Modelの予想スペクトルと良く一致する。 $\Lambda(1405)$ は、deeply bound Kaonic nucleiとの強い関係により、近年、注目を集めている。LEPSでも今後、核内 $\Lambda(1405)$ の崩壊幅の変化や、KNに強く結合する狭い崩壊幅を持つpoleの確認を目指す実験が続けられる。 $p(\gamma, K^+)\Lambda, p(\gamma, K^+)\Sigma^0$ 反応の生成断面積及びPhoton Beam Asymmetryを測定し、生成反応機構に対する重要な知見を与えた。

この他にも、中性子からの $\phi$ 及び $K^+$ 中間子生成反応測定、重陽子からのcoherent  $\phi$ 中間子生成反応測定、中性K中間子生成反応、 $\omega$  mesic nuclei探索、ガンマ検出器を用いた中性中間子生成反応の測定等を行い現在解析が進行中である。

## D 日本、および世界の加速器施設での物理学

### D.1 他の陽子加速器施設での物理学

RCNPの将来計画の物理に関連すると考えられる他の軽イオンビーム実験施設および建設計画として、Saturne2 (LNS)、COSY (Jülich), LAMPF, LISS (IUCF)について概説する。

#### D.1.1 Saturne2

Saturne2は、1978年から1997年まで軽イオン実験施設として重要な役割を果たした。多くの加速器・実験装置に関する技術者を擁し、高い技術レベルの多彩な装置を開発したのが特徴である。最大エネルギーは陽子が2.95 GeV、重陽子 $^4\text{He}$ が1.17 GeV/A、 $^3\text{He}$ が1.75 GeV/Aで、数 $10^{11}$ 粒子/spill



のビームを出した。また陽子、重陽子および ${}^6\text{Li}$ の偏極ビームを加速した。特徴の異なるスペクトロメータ4台を同時に有した。

主に以下の様な物理が研究された。

- $NN$  散乱を多くのスピン相関量まで含めて精密に測定。中間子が媒介する相互作用を研究する上での基礎データを築いた。データは3 GeV までに渡り、 $\pi$  中間子生成、 $\Delta$  励起を陽にとりいれた理論との比較を行なう。
- non-strangeness ダイバリオンの探索を、種々の反応チャンネルにおいて missing mass 法により行なう。多くの候補を見つけるが確証を得るには至らず。
- 荷電交換反応を利用して、原子核の pion-like な励起と応答を研究。核中での $\pi$ のプロパゲーション、スピン縦/横応答、 $\Delta$  励起の質量シフト、 $\Delta$ -空孔状態の崩壊、コヒーレント $\pi$ 生成などの測定・研究を行ない、核内の $\pi$ 中間子相関や応答関数に関する知見を深める。
- $\pi$  生成反応による荷電対称性、荷電独立性に関する破れの研究を行なう。
- $dN$  散乱を多くのスピン量まで含めて測定。モデル非依存で位相差解析を行なえるところまでデータを取得する。
- $dN \rightarrow {}^3\text{He}X$  反応による中間子生成。閾値近傍での $\eta^0$  生成反応が、素過程からの予想よりも非常に大きな断面積を持つことを発見し、2段階反応の重要性を示す。毎秒 $10^5$ 個のtagged $\eta^0$ を生成。 $\eta^0$  質量の精密測定を行なった。
- 偏極重陽子、 ${}^3\text{He}$ 、偏極 ${}^6\text{Li}$ の分解反応による $S/D$ 状態占有確率およびスピン構造に関する研究を行なう。
- $(d, d')$  反応により原子核の荷電スカラー応答の研究を行なう。また、 $(d, d')$ 、 $({}^3\text{He}, t)$  反応等を利用して、核子励起状態を量子数に関して選択的なプローブから調べる。
- GeV 領域の陽子散乱振幅により原子核の核子密度分布を調べる。

### D.1.2 COSY

COSYはクーラーシンクロトロンを有し2.8GeVまでの偏極陽子ビーム、および重陽子ビームが加速できる。エネルギー分解能が良くエミッタンスが小さいのが特徴。ただし、内部標的に対しては厚さに制限があるためルミノシティを大きくできず、ビーム引出しが可能であるが強度は0.1nA程度である。内部標的用の装置として磁気スペクトロメータCOSY-11、ANKE、 $pp$ 弾性散乱測定用のEDDA、ハイパー核寿命測定用のCOSY-13、spallation測定用のPISAを有する。また引出しビーム用として、磁気スペクトロメータBIG-KARL、 $4\pi$ 非磁気スペクトロメータTOFを有するなど、装置は多彩。CELCIUSからWASAを移設予定。1997年から測定が開始され、現在も使用されている。Saturne2から引き継いだテーマも多いが、ハドロン物理に焦点が絞られている。

主に以下の様な物理が研究されている。

- 基礎データとしての $NN$ 散乱測定。
- $pp$ による $\eta'$ 生成。 $\eta^0$ の生成断面積との比較。U(1) anomaly。
- $pp \rightarrow pK^+\Lambda, pK^+\Sigma$ 反応と $\Lambda - \Sigma$ 混合。終状態相互作用を利用した $\Lambda p$ 相互作用の研究。
- $\pi$ 生成による荷電対称性の破れの研究。

- 閾値以下での  $K^+$  生成。
- $pp \rightarrow ppX$  による  $\pi^0, \eta^0, \omega^0$  生成。
- ペンタクォーク探索。  $pp \rightarrow K^0 p \Sigma^+$ 。
- $pd \rightarrow {}^3\text{He} \eta^0$  による  $\eta^0$  質量の精密測定。

### D.1.3 LAMPF

LAMPF は 800 MeV までの陽子線型加速器を有し、陽子ビームと  $\pi, \mu$  の 2 次ビームを用いた核物理を展開した。偏極ビーム・標的、高分解能スペクトロメータ、散乱陽子偏極度計を開発し、核構造、有効相互作用、スピン・アイソスピン励起等の研究を行なう。1972 年に開始し、1995 年頃に中性子ビームを除く核物理分野の実験を終了した。

陽子ビームにより展開された物理は、主に下記の様なものである。RCNP の現在のサイクロトロン施設が LAMPF を土台の 1 つとして計画されたこともあり、実験技術および物理の多くの点で RCNP が LAMPF を越える結果を出している。

- 基礎データとしての  $NN$  散乱測定。
- 核子・核散乱反応における相対論的取り扱い。ディラック現象論。
- 核子間有効相互作用。
- 原子核における  $\pi$  中間子エンハンスメント。  $(p, p')$ 、  $(p, n)$  反応におけるスピン縦/横応答関数。
- 0 度における陽子非弾性散乱測定。出版論文はない。
- 巨大共鳴の研究。
- ダイバリオン探索。
- $pd \rightarrow {}^3\text{He} \eta^0$  反応による  $\eta^0$  生成。この研究の主体は Saturne2 にある。
- ${}^{12}\text{C}(p, n\pi^+){}^{12}\text{C}$  反応によるコヒーレント  $\pi$  中間子生成。テスト実験の段階で実験施設の終了。

### D.1.4 LISS

LISS(Light Ion Spin Synchrotron) は IUCF が 1990 年代半ばに打ち出した将来計画である。1–20 GeV の偏極陽子ビーム及び偏極軽イオンを加速するシンクロトロン・リングによる以下の物理を提案したが、実現しなかった。

- 陽子陽子弾性散乱の  $A_z$  測定による空間反転対称性の破れの実験
- 偏極陽子・偏極重陽子全散乱断面積測定によるパリティ保存時間反転対称性の破れの実験
- 陽子陽子散乱による強い相互作用の研究。クーロン・核力の干渉を利用した非摂動領域での QCD のテスト。
- ハドロン構造研究

- アイソスピン制御によるアイソスカラー・核子共鳴の研究。( $d, d'$ )、( $\alpha, \alpha'$ ) による  $N^*(1440)$ 、 $N^*(1710)$  の研究。
- non-strangeness ダイバリオン探索。( $d, d'$ ) 偏極移行量測定による  $\Delta\Delta$  ダイバリオン探索、 $\Delta\sigma_{L,T}$  測定によるダイバリオン探索。
- 中間子生成。  $\phi$  中間子生成による核子内 hidden strangeness 探索。 グルーボール、エキゾチック中間子探索。
- ハイパー核
- 核内でのハドロン相互作用。  $A(p, pN)$  反応による核内有効相互作用。
- EOS 研究。マルチフラグメンテーション。

#### D.1.5 概括

各実験施設間の物理としてのオーバーラップは比較的大きい。素過程から原子核標的までを含む中間子生成の統一的理解や、コヒーレント中間子生成による原子核中の中間子場の研究などは物理としての重要度は高いが、研究の端緒において施設が終了している。

装置や実験手段としては重点が置かれていない視点がある。その中で、RCNP のリングサイクロトロン物理の視点からピックアップされるのは、高分解能測定、Exclusive 測定 (相関同時測定、崩壊測定)、超前方測定、連続状態の分離 (continuum spectroscopy) などである。

### D.2 他の研究施設での核物理学

#### D.2.1 RI ビームファクトリー

RI ビームファクトリーとは、不安定核物理の研究推進を目的として理化学研究所が建設している次世代 RI ビーム施設である。2007 年度の実験開始を目指して中核となる重イオン加速器群及び不安定核ビーム生成装置の建設が進められている。

重イオン加速器群は、既存のリングサイクロトロン (RRC、 $K=540$ ) 及びその 2 つの入射器 (リニアック及び AVF サイクロトロン) に加えて、現在建設中の固定周波数リングサイクロトロン (fRC、 $K=570$ )、中間段リングサイクロトロン (IRC、 $K=980$ )、及び最終段の超伝導サイクロトロン (SRC、 $K=2500$ ) からなる。(偏極) 重陽子からウランに渡る原子核を最大エネルギー 350 AMeV (軽い核では 440 AMeV)、最大強度 1 pμA で供給することができる。重イオンビームの入射核破砕反応及びウランの分裂反応で生成した不安定核を BigRIPS と呼ばれる分離装置で収集分離し、二次ビームとして実験に供与する。エネルギー、質量領域及び強度 (従って中性子過剰度) に於いて、既存の RI ビーム施設を遥かに凌ぐ。

測定用大型装置は、ゼロ度スペクトロメータと呼ばれる汎用スペクトロメータが 2007 年の時点で整備される。2007 年以降高分解能 SHARAQ スペクトロメータ、多粒子測定用 SAMURAI スペクトロメータ、質量分析用等時性蓄積リング、低速 RI ビーム生成装置 SLOWRI、電子散乱実験用自己閉じ込め RI イオン標的 SCRIT の建設が随時行われる予定である。これらの建設において、東京大学、東北大学、東京工業大学、筑波大学、埼玉大学の実験グループが主要な役割を果たしている。

## D.2.2 J-PARC での核物理

J-PARC（大強度陽子加速器施設）は平成 20 年に最初のビームを得るべく現在東海村に建設中である。加速器構成は、線型加速器を初段加速器とし、そのあとに 3GeV の早い繰り返しシンクロトロンおよび 50GeV の陽子シンクロトロンが続く。世界最高クラスのビーム強度の加速器である。

3GeV シンクロトロンには物質生命科学実験施設が設けられ、ミュオンおよび核破砕中性子を用いた研究が行われる。中性子を用いた少数の核物理に関連する研究以外は、主として物性物理等に用いられる。

50GeV 陽子シンクロトロンには、遅い取り出しビームを用いるハドロン実験施設と早い取り出しを用いるニュートリノ実験施設が設けられる。ニュートリノ実験施設はニュートリノ振動の研究が目的である。ハドロン実験施設が J-PARC での核物理の主要な舞台となる。ハドロン実験施設への最初のビームは 2008 年度（平成 20 年度）に、ニュートリノ実験施設への最初のビームは 2009 年（平成 21 年度）に予定されている。

ハドロン実験施設では、50GeV、 $15\mu\text{A}$ （0.75MW）という大強度陽子ビームから、これまでにない大強度の二次粒子ビームを得られることが最大の特徴である。J-PARC 第一期ではハドロン実験施設の大きさが当初計画の約半分に削減され、幅約 60 メートル、長さ約 56 メートルの実験室が建設される。平成 20 年の段階では一本の一次ビームラインと一つの二次粒子生成標的および最低一本の二次ビームライン（静電分離機を装備した K 中間子ビームライン）が準備される予定である。また、一次陽子ビームのエネルギーは 30GeV、ビーム強度は  $9\mu\text{A}$  となる見込みである。測定装置については、既存の 12GeV 陽子シンクロトロン（KEK-PS）に設置されている SKS スペクトロメータを移設する予定であるが、それ以外は多くを外部資金に頼る必要がある。

ハドロン実験施設で最初に行う実験として想定されているのはこの二次ビームラインからの K 中間子を用いる実験である。一つは  $(K^-, K^+)$  反応を利用して  $\Xi$  ハイパー核を世界で初めて生成しその分光を行う実験、もう一つが K 中間子が原子核に束縛された状態を創り出す実験である。これら以外にも、大強度の K 中間子や  $\pi$  中間子を利用する実験が目白押しである。これに加えて、一次陽子ビームを用いて Bjorken  $x$  が大きいところ（核子の周縁部）でのシークォークの分布を測定する実験や、有限密度核物質中にベクトル中間子を入れその質量変化等を直接観測する実験などが考えられている。これらの実験が目的とする物理は、

- ハイペロン間あるいはハイペロン核子間の相互作用を定量的に明らかにすること。これにより、中性子星などの高密度核物質中で重要になるハイペロンの役割を明らかにすることが出来る。
- K 中間子と核子・核間の相互作用を定量的に明らかにし、K 中間子束縛状態の存在とその性質を明らかにすること。
- 核子周縁部での  $\pi$  中間子の雲の存在などをパートンレベルで定量的に議論すること。
- カイラル対称性の自発的破れとその回復に伴う現象を直接に観測すること。

といったことである。これらはいずれも、原子核あるいは原子核物質をクォークあるいはハドロンの多体系としてとらえ、より基本的な階層から理解する試みである。