

1997年6月13日

大阪大学核物理研究センター  
センター長  
江尻宏泰 教授

ここに、1996年3月の核物理研究センター研究計画委員会において将来計画検討小委員会に付託された審議事項を答申いたします。

将来計画検討小委員会，委員長  
文部省国立天文台，助教授

梶野敏貴



# 核物理研究センター将来計画検討小委員会 答申書

1997年6月13日

## 目次

実行提言

- 第一章 はじめに
- 第二章 原子核物理学
- 第三章 素・核・宇宙物理学分野での大きな研究課題：  
実験的・観測的側面から
- 第四章 日本での研究機関
- 第五章 大阪大学核物理研究センター
- 第六章 将来計画
- 第七章 結論

別冊

## 実行提言

(1) 大阪大学核物理研究センターRCNPはリングサイクロトロンやSpring 8でのレーザー電子光の物理を更に発展させるために、将来計画として「クォーク核物理学」の研究を推進することを提言する。そのために、10 GeV程度の電子ビームと核子あたり数GeVの陽子を含めた原子核ビームとのコライダーを次期加速器として検討すべきことを提言する。

(2) 大阪大学核物理研究センターRCNPが国内および国外の核物理学研究者の研究を支援する中心的役割を果たすために、先進的測定装置・観測装置の開発研究を日常的に行なうための予算確保および機能充実のための具体的措置を講じることを提言する。

## 第一章 はじめに

大阪大学核物理研究センターは、日本における原子核物理学研究の一大拠点として、世界的にユニークなリングサイクロトロン加速器と高分解能スペクトログラフ等の測定器を有し、それらを駆使して原子核物理の研究業績を着実に積み重ねている。最近はSpring 8での高エネルギー偏極光子ビームによるクォーク核物理研究を立案し、さらに、大塔コスモ観測所において超低バックグラウンドの実験室を実現し、二重ベータ崩壊によるニュートリノの研究や暗黒物質の検出実験に着手するなど、広く素・核・宇宙物理学研究のセンターとして大きく前進しようとしている。

このように現在と当面の研究計画が軌道にのりだしたこと、および、1995年末にこれらの諸計画に対する国際レベルでの評価委員会による外部評価が行なわれたことをふまえ、学問的に原子核物理学の将来を展望し核物理研究センターの将来計画を検討する目的で、1996年3月の研究計画委員会において将来計画検討小委員会が設けられた。委員会の構成メンバーは次の通りである。

委員長	梶野 敏貴	国立天文台	助教授
副委員長	本林 透	立教大・理	教授
	旭 耕一郎	東工大・理	助教授
	今井 憲一	京大・理	教授
	岸本 忠史	阪大・理	教授
	久野 良孝	高エネ研	助教授
	土岐 博	阪大RCNP	教授
	能町 正治	阪大RCNP	助教授
	初田 哲男	筑波大・物理	助教授
	蓑輪 真	東大・理	助教授

将来計画検討小委員会の目的は

- (1) 核物理関連（素粒子・宇宙を含む）で学術的意義があり、将来の学問の展望を開く研究はなにか、
- (2) それらの研究計画の実現可能性はどうか、
- (3) その中で核物理センターが中心となって進める研究はなにか、

等について議論し、研究計画委員会に答申することである。ここに提出する答申書は、これまで二回開かれた検討小委員会において各委員が多角的な視点から議論を重ねてきた内容に基づいており、大阪大学核物理研究センターの将来計画としてふさわしいと考えられる二つの提言にまとめた。本委員会は、第一の提言として、実験の運動学的特徴と世界の中でのユニークさに注目して、電子ビームと陽子を含めた原子核ビームとのコ

ライダーの建設が一つの有望な将来計画になり得ると考えたが、ルミノシテイ等についての定量的な検討は今後の具体的な議論に待たなければならない。広く当研究センター内外の研究者による検討をお願いしたい。

議論を始めるに当たって、まず最初に原子核物理とはどんな学問であるかを記述したい。

## 第二章 原子核物理学

原子核物理学は強い相互作用が支配する有限量子多体系の物理を研究する学問であり、多くの興味深い現象を理解してきた。初期において、多くの実験データの蓄積の中からのマジック数の発見はシェル模型を産み出し、多くの現象を定量的に記述できるようにした。原子核物理が研究分野として確立した大きな発見であったと言える。さらに集団運動の発見や原子核の変形の発見は有限系での運動モードの特徴と内部対称性の破れとその回復の様子を見事に実現した。これらの単一粒子的な振る舞いと集団的な振る舞いの共存する系では、当然その中間的な相が実在する。この渾沌とした物理現象に内在する対称性を見だし、相互作用ボソン模型を確立したことは特記に値する。これらの多様な現象を記述する中で、強い相互作用が支配する力学系の興味深い多くの現象に遭遇し理解してきた。

原子核物理の特徴は多くの実験データが存在することである。実験と理論が常に共存して、何故そのようになるのか理論仮説を立てながら、その仮説が正しいかどうかを確かめる実験を行ない、さらに理論的予測との比較を行なって、一つ一つの現象を理解してきた。本来非常に複雑な量子多体系の現象をここまで理解できるようになったのは、このように実験と理論が常に近くで相互に啓発しあいながら研究を行なってきたからである。強い相互作用の引き起こす現象を謙虚に受けとめ、その織りなす現象を一つ一つ理解してきたことは、人類の大きな産物と言うべきである。

核構造・核反応等の研究の他に、核子の量子系での現象の研究から基本的対称性・保存則等の研究が行なわれている。弱い相互作用でのパリティ非保存およびその相互作用の形とその破れ、時間反転の対称性の破れ、二重ベータ崩壊でのニュートリノの質量および相互作用の性質、アクシオンの探索等がその例である。太陽ニュートリノ放射量の測定にも多くの原子核反応が使われている。

原子核物理の応用面での活躍も見逃せない。人工的に核反応を起こさせて、必要とする核種を作りトレーサーとして医学・工学に利用する。メスバウアー効果の測定装置も原子核の励起状態の性質を使っている。核分裂・核融合では原子核エネルギーを人類の手でコントロールする。一方宇宙や天体に目を向けると、星のエネルギー生成の機構や超新星爆発などは原子核の持つ性質がそのまま反映されている。日常の生活に常に登場する金や鉛など鉄以上の重い元素がいかに作られたかなどの疑問には、原子核物理の理

解が不可欠である。元素の起源や宇宙の進化を研究する際には、原子核および核子の作りだす現象の理解がないかぎりはその答えを見いだすことはできない。現代科学の飛躍的な進歩の基盤を原子核物理学の堅実な発展が支えていたのである。原子核物理のたゆまない研究による深い理解と、技術の向上により、応用面でもさらに画期的な原子核の利用法が発見されるであろう。

強い相互作用の支配する有限の量子多体系の物理の研究は、原子核の構造を解明する努力から、原子核の多様な性質を利用して、対称性の破れおよびその大きさの研究、天体物理への応用、応用面での利用とその研究範囲をどんどんと拡大している。

このような原子核物理の持つ意義およびその多様性を踏まえて、将来進むべき方向を考えてみたい。

### 第三章 素・核・宇宙物理学分野での大きな研究課題； 実験的・観測的側面から

核物理研究センターで進めるべき将来計画は何かという観点を離れ、大きく見て素・核・宇宙物理の研究分野において、現在何を明らかにすることが科学的に大きなインパクトを与えうるかを考える。ここでは特に実験的・観測的側面から見た場合に、重要な科学的意義を持ちうる研究課題を列举してみる。

1. 標準理論の検証とそれを越える現象の発見
2. 標準理論の基礎にあるヒッグス粒子の探索
3. ニュートリノの質量、右巻相互作用、世代混合の存在の発見
4. ハドロンのクォーク・グルオン構造の探求
5. クォーク閉じ込め機構解明の鍵となる現象の探求
6. 高温・高密度クォーク物質の生成とその性質の探索
7. フレーバー原子核の相互作用と存在形態の探索
8. 原子核の極限状態の生成とその構造の探索
9. 宇宙・天体構造の起源と進化の探求
10. 重力波の検出と発生機構の探求

もちろん、列举した課題は象徴的な意味合いを持っているだけであり、これら以外にも、既に世界中で様々な実験的・観測的手段を用いて推進中、もしくは、計画中の研究課題が多数存在する。

## 第四章 日本での研究機関

日本の基礎科学振興の現状はまだ不十分とは言え、最近の大型研究計画の立案とその実現を通じて、やっと世界の基礎科学の分野においてその責任を果たせるようになってきているといえる。前章で列挙した素・核・宇宙物理での大きな研究課題についても、日本国内での全国共同利用の大学および国立の研究機関において、大型・中型の実験装置を用いて世界レベルの基礎研究が成されている。これらの研究は各大学でのたゆまない研究と協力の基盤の上に成り立っていることは言うまでもない。以下主な他の研究機関における研究を順不同で概観する。

素粒子物理学の研究拠点である高エネルギー物理学研究所では、将来計画として 500 GeV以上の衝突エネルギーをもつ電子・陽電子リニアークライダー（JLC）の建設計画を推進することによって、前章の第1, 第2の研究課題に対する挑戦が始められようとしている。現在、B中間子工場計画が建設段階にあり、CP対称性の破れの系統的研究を行ない、小林-益川行列を決定し、素粒子の標準理論の実験的な検証を目指すとともに、標準理論を越える現象の探索が行なわれようとしている。12 GeV陽子シンクロトロンを使ってのハイパー核の研究は第7の研究課題に相当し、さらにニュートリノをカミオカンデに打ち込んでニュートリノの質量差と世代混合（第3研究課題）の測定を東京大学宇宙線研究所と共同で計画している。

宇宙線物理学の研究拠点である東京大学宇宙線研究所では、カミオカンデによる超新星爆発に伴うニュートリノ検出の成功を更に発展させ、スーパーカミオカンデが観測を開始した。ニュートリノ質量差と世代混合の測定（前章の研究課題3）を目指すばかりでなく、世界的にもユニークなニュートリノ望遠鏡として、宇宙物理学・天文学にも大きく注目されている。次期大型将来計画として、重力波検出器と高エネルギー宇宙ガンマ線検出器の建設が検討されており、前章の第10の研究課題が近い将来進められることになる。さらに、上述のKEKとの共同実験を計画している。

天文学の研究拠点である国立天文台では、現在、ハワイ島マウナケア山頂に大型光学赤外線望遠鏡「すばる」を建設中であり2年後の完成を目指している。世界最高の分解能とS/N比を持つ初めての巨大な一枚レンズよりなる地上大型望遠鏡として、遠宇宙・初期天体・暗天体の探索で威力を発揮し、前章の研究課題9の理解が飛躍的に深められるものと期待されている。また、国際協力のもと大型ミリ波サブミリ波干渉計計画LMSAを立案中であり、スペースVLBI（超長基線干渉計）計画とともに銀河中心核のブラックホールの探索や爆発的星形成の研究に威力を発揮することが期待されている。

国立宇宙科学研究所では、世界的にユニークな観測衛星「銀河」・「飛鳥」をつぎつぎに打ち上げてエックス線による諸天体の動熱力学的物理状態の観測を通じて、超新星の時間変化の様子や宇宙での元素組成の研究で優れた成果を挙げてきた。現在、赤外線天文衛星（IRIS）による原始星やバリオン暗黒物質候補天体の探索、および1999年の打ち上げを目指すアストロE計画が進められようとしており、宇宙空間におけるプラズマ現象や諸天体の構造解明が行なわれることになる。 （研究課題9）

原子核物理学の研究拠点の一つである東京大学原子核研究所では、サイクロトロンや電子シンクロトロンを使って、多くの成果を産み出してきた。最近では米国ブルックヘブン国立研究所で推進されているRHIC計画やK中間子稀崩壊実験プロジェクトに参加して、前章の第4と第6の研究課題の実現を目指している。ドイツのHERAでの実験にも参加している。原子核研究所と高エネルギー研究所との統合を果たし、さらに大型ハドロン計画(JHP計画)の実現を目指しており、素粒子を使った対称性の研究、不純物を含む原子核の存在形態の研究(研究課題7)や不安定原子核の研究(研究課題8)、および宇宙物理学や物性物理学との境界領域の研究が著しく進展することが見込まれている。

理化学研究所は、リングサイクロトロンを用いた不安定原子核物理の研究で世界をリードしている。更に、次期計画として大ビーム強度の加速器(RIビーム工場)の建設が始まろうとしている。前章の第8の研究課題でこれまでと同様に、世界をリードする研究成果が期待されている。同時に、この計画は、宇宙物理学や物性物理学、その他の学問分野への幅広い応用を目指しており、隣接領域における学際研究の発展も見込まれる。さらに、RHICとの共同で、偏極陽子コライダーを実現させ、核子のスピン構造(研究課題4)の研究を開始した。

## 第五章 大阪大学核物理研究センター

大阪大学核物理研究センターは1971年に設立されて以来、全国共同利用の原子核物理学研究のセンターとして重要な役割を果たしてきた。第一段の加速器として80 MeVまで陽子を加速できるAVFサイクロトロンを建設し、多くの成果を生み出してきた。スピン・散乱分析系を駆使した核力と核ポテンシャルの研究、高分解能スペクトログラフによる核反応励起の研究、多重粒子・ガンマ・電子分光系による高励起状態や巨大共鳴の研究、核反応生成核の分析器による不安定核の研究などが挙げられる。理論面でも原子核の固有の励起モードと核反応機構の研究で成果をあげた。いずれも世界をリードした重要な研究で、核子多体系の原子核物理の発展に大きく貢献した。

1987年からRCNPの高い加速器建設及び測定器技術を生かした第二段の計画として浮上した400 MeVの高分解能加速器(リングサイクロトロン)が建設を開始し3年位前からリングサイクロトロンでの実験が行なわれている。高エネルギー・高分解能・スピン偏極の特色を生かした実験ですでに多くの成果が生み出されている。そのいくつかを以下に述べる。

中高エネルギーと高分解能を生かした原子核のスピン・アイソスピンモードの研究では、 $(\text{He}, t)$  反応によってガモフテラー強度を決めることに成功し、系統的な研究が行われている。また、同じ方法を使って太陽ニュートリノ(弱相互作用)に対する原子核の応答が調べられた。さらに特定のガモフテラー状態からの粒子やガンマ線の崩壊モー



ドを測定することが出来、それらの状態のミクロな構造を世界で最初に解明することに成功し、スピン・アイソスピン運動の研究を大きく前進させた。

400 MeVでの(p,n)反応では非常に精度の良いデータが広い励起エネルギーの範囲で取られており、観測されたガモフテラー(GT)強度はGT和則のほとんどをつくっていることが明らかになった。スピン偏極とさらに、高分解能を生かした弾性散乱の実験では相対論的記述の良さを印象づけた。

(p,pp)反応を使った準弾性散乱実験で核内での有効相互作用の導出を行ない、有効相互作用の密度依存性を見事に示した。理論的に予言されていた深く束縛されたパイ中間子原子も(p,pp)反応でその証拠を見つけた。更に精度と統計の向上の努力が行なわれている。その他にも高分解能・スピン偏極を利用した実験は多岐にわたっており、中高エネルギーを使った高分解能の加速器及び測定技術を有した研究所として世界の中で注目される存在である。

RCNPでは更に新しいプロジェクトとして、Spring 8の蓄積電子ビームにレーザー光を入射して得られる、マルチGeVの高スピン偏極ガンマ線でのクォーク核物理の基礎研究と本計画の準備が進んでいる。Spring 8はRCNPに近いこと、究極物質の構造の研究に適していること、RCNPのサイクロトロンからの陽子ビームとは相補的であることなどの利点がある。また、得られるガンマ線は非常に良質でアメリカのCEBAFでの光よりも偏極の点で優れている。特に核子の構造やバリオンの励起状態の研究、また原子核をターゲットにしてベクターメソンの性質を調べるのに適しており、世界の研究者から注目されている。

大塔村の天辻トンネル内に作られる低バックグラウンド実験室の建設も順調に進んでおり原子核のダブルβ崩壊の測定によるニュートリノの研究や暗黒物質の発見に期待が持たれている。

Spring 8及び大塔村での新プロジェクトはRCNP本来のリングサイクロトロンでの実験研究と相補的な役割を果たしている。例えば、ダブルβ崩壊の強度とRCNPでの(He,t)反応を用いたβ強度の測定値を関連づけることによって、一つの法則を構築することが出来ている。これらの新プロジェクトはRCNPの新しいユーザー獲得にも役立っている。

以上、RCNPの過去の実績及び現在の活動から、その実験面での特徴を次の様にまとめることが出来る。

1. 原子核物理での広範なエネルギー領域 (陽子で10-400MeV)
2. 陽子と軽イオンビーム
3. 高分解能ビームと高分解能測定装置
4. スピン偏極ビームと偏極測定装置
5. 2アームスペクトログラフとマルチp・n・γ検出器
6. マルチGeV偏極光によるクォーク核物理
7. レプトンを使った高感度非加速器核物理

二度にわたって陽子加速器の建設を成功させた加速器建設技術、及びその高分解能ビームの特徴を発揮するための測定器製作技術を有していることは特記に値する。

## 第六章 将来計画

### A. クォーク核物理学

原子核物理学は強い相互作用の支配する有限量子多体系の物理を理解する学問であることを、第二章で述べた。強い相互作用が作り出す多様で興味深い核物理現象の多くはこれまで現象論的手法によって研究されてきたが、そこでは、原子核を構成する陽子や中性子（核子）の構造は核内で変化しないと仮定されていた。この仮定のもとに原子核を定量的に記述する研究も一応の成功を収めてきた。しかし、最近のより精密な実験では核内核子の構造が変化している可能性が強く示唆されている。核内核子の構造の変化の疑問に答えるためには、単体の核子の構造がどの様になっているかを解明する必要がある。同時に、真空の構造が核子密度や温度と共にどのように変化するかを知る必要がある。核子を理解し真空を理解することは、原子核をもっと深いレベルから理解することと等価である。

核子およびその集合体である原子核をハドロン多体系としてとらえ、クォーク・グルオンの自由度から研究することを新しい研究分野ととらえることは重要である。これまで成功を収めてきた原子核物理学の方法論、即ち、新しい現象を実験的に見だし、それを理解する理論モデルを構築し、諸現象を予言し、再び実験的に検証する、という方法論をハドロン多体系に適用することによって、これまでの原子核に対する現象論的な理解を質的に全く書き換えてしまう可能性を秘めているからである。最近は多体問題に対する有力な手法の一つである数値実験によって第一原理計算を用いる研究も可能になりつつある。こうした学問の新しい潮流の視点から原子核物理学をとらえなおす研究分野を「クォーク核物理学」と呼ぶ。第二章での第4、5の研究課題に相当する。

クォーク・グルオンの力学を支配する法則は何であろうか？歴史的に数多く見つかったハドロンの状態を説明するために導入されたクォークの存在は深部非弾性散乱により確かめられている。しかし、ハドロンを構成する基本粒子であるクォークは単体では観測されていない。このことからクォークはハドロン内に閉じ込められていると考えられている。クォークの従う理論は量子色力学（QCD）であると信じられている。QCDはクォークの内部自由度としてカラーを考え、カラー空間でのゲージ変換の不変性を要請して得られる非可換ゲージ理論である。その非可換性から漸近的自由性が導かれる。従って、高エネルギー領域の大きい運動量の伴うハドロン現象は摂動的な計算で良く説明できる。その一方、低エネルギー（マルチGeV）領域では結合定数が大きくなり非摂動的になるために、クォークの閉じ込めやハドロン構造等の非摂動的な現象が極めて

複雑になる。原子核が作り出す多彩な現象は、このようなより基本的な自由度がつくり出す多様で複雑な現象として理解し直すことができる筈である。

「クォーク核物理学」で明らかにすべき研究課題には次のようなものがある。さらに詳しい解説は別冊を参照されたい。

1. クォークは何故閉じ込められているのか？
2. QCDの非摂動現象の発現メカニズムは何か？
3. グルーボールの探索
4. クォークフレーバーSU(3)対称性とその破れ現象の探求
5. バリオンは変形しているか？
6. ハドロニゼーションはいかにして起きるか？
7. ハドロンの構造に対する核内媒質効果の探求

これらの問いは代表的に「非摂動領域でのQCDを如何に深く理解するか」という問いとして換言することが出来る。QCDは非常に美しい理論である。しかし、まだ十分に理解できていない多くの非摂動的な興味深い現象を引き起こす。「クォーク核物理学」は理論的研究と実験的研究双方からの強い連携が必要とされる研究分野である。

## B. 電子-原子核コライダー

前章で述べたように、大阪大学核物理研究センターRCNPは、AVFサイクロトロン、リングサイクロトロンからの陽子および原子核ビームによって核物理の成果を挙げてきていると同時に、Spring 8による8 GeVの蓄積電子ビームを用いて、「クォーク核物理学」の研究を始めようとしている。加速器建設技術も含め、これらの実績を組み合わせ、将来計画として、10 GeV程度の電子ビームと核子あたり数 GeVの陽子も含めた原子核ビームのコライダーを建設することができれば、「クォーク核物理学」の研究において世界の中心的な研究所としての役割を果たすことが期待できる。

電子-原子核衝突と電子-陽子衝突とを両用することによって、ハドロン固有の性質ばかりでなくハドロン構造に対する媒質効果を研究することができる。ハドロン構造の媒質効果をQCDに基づいて理解しようという理論的研究によって、原子核中でのカイラル対称性の部分的な回復やベクトル中間子に対する密度効果が、ハドロンの質量や幅の変化として現れると期待されている。これらの物理量をコライダー実験で精密測定することによって、核内のQCD真空の構造を理解するための有用な手がかりが得られるはずである。コライダーは、静止標的衝突実験では困難な終状態のハドロンも測定するexclusiveな実験を可能とし、新しい結果を得る可能性が高い。例えば、核内核子の構造関数を Bjorken parameter  $x$  の小さな領域で調べ、実験的には決定しにくい強い相互作用の非摂動領域を明らかにすることが考えられる。

世界で稼働中、計画中のマルチ GeV エネルギー領域の加速器には、次のようなものがある。CEBAF (アメリカ) : 6 GeV まで加速できる電子加速器であり、 $\gamma$  線をも作り出すことが出来、これらのビームを使ってクォーク核物理の研究を開始している。LISS (アメリカ) : インディアナ大学では 20 GeV の陽子シンクロトロンリングを建設し、ビームの偏極と内部ターゲットを駆使してクォーク核物理を研究する計画を立案している。COSY (ドイツ) : 現在は 2.5 GeV の陽子蓄積リングでハドロン過程の研究を行なっているが、エネルギーの向上でクォーク核物理の拠点になるポテンシャルを持っている。CELCIUS (スウェーデン) : 1.35 GeV の陽子蓄積リングでの実験を行なっており、COSY (ドイツ) と同じような状況にある。

10 GeV 程度の電子ビームと核子あたり数 GeV の陽子を含んだ原子核ビームとのコライダーは世界的、国内的に見ても非常にユニークであり、Spring 8 を擁した日本で進めるべき計画である。

## C. 測定装置・観測装置の開発研究

大阪大学核物理研究センターでは、超高分解能スペクトログラフ、マルチ核分光検出器系などの測定器を開発し、多くの成果を生み出してきた。この測定器開発技術は、リングサイクロトロンでの研究のみならず、Spring 8、大塔村での低バックグラウンド実験にも生かされることが期待される。

今後の核物理実験においても、世界に比する物の無い検出器を開発することは世界一流の加速器を開発することと同じように重要なことである。新しい測定器が新しい物理を切り開くことをめざし、現在・将来の実験に向けて先進的な測定装置・観測装置の研究開発を継続的に行なってゆくべきである。

そのためには、検出器の研究開発部門を設ける、実験計画に応じて併任／客員／COE 研究員等が滞在して開発を行う、等の組織上の措置を検討する必要がある。強調したいのは、「検出器物理」という分野の研究・開発を核物理研究センターの重要な活動としてしっかりと位置づける、ということである。センターは場所／予算／支援装置／CAD ソフトなどを揃え、外部／内部のユーザーに研究の場を提供することとし、広く「検出器物理」の支援をすることにより、世界に貢献出来ることをめざしたい。

## 第七章 結論

大阪大学核物理研究センターRCNPはリングサイクロトロンでの研究が軌道に乗ろうとしており、まず、高分解能・良質偏極ビームの特徴を生かした研究での成果を最大にするように努力を惜しまないことが必要である。リングサイクロトロンでの研究成果の大きさが次の将来計画を推進する上での原動力になることを銘記すべきである。新しく始まろうとしているSPRING8での研究および大塔村超低バックグラウンド実験室での研究も重要で、素・核・宇宙物理学分野にわたる興味深い成果を産み出すことを期待する。これらの現在計画を健全に進めながら、将来計画を立案することが重要である。

以上をふまえた上で、原子核物理学の向かうべき新しい方向についての検討を行なった。原子核物理の理解に重要な意味を持ち、さらに強い相互作用が作り出す現象をクォーク・グルオンの立場から解明する物理として、「クォーク核物理学」の研究は、学術的意義が高く、将来の発展が期待でき、且つ、大阪大学核物理研究センターRCNPが強力に推進するのに最も適したものの一つである。そのための次期加速器の候補として、10 GeV程度の電子ビームと核子あたり数GeVの陽子も含む原子核ビームとのコライダーを提案する。これは世界的に見ても極めてユニークな加速器であり、「クォーク核物理学」研究に威力を発揮すると期待する。

また、原子核物理研究における測定装置・観測装置の開発研究の重要性を指摘し、大阪大学核物理研究センターRCNPが、全国利用の研究所として、これに大きな役割を果たすことを提言する。

以上について、研究計画検討委員会ならびに内外の研究者の検討をお願いします。

## 別冊

### (1) 「電子 - 原子核 (含、陽子) 衝突型加速器実験の特徴」

高エネルギーのレプトンによる散乱を利用して核子の構造関数を調べる研究が近年大きく発展しており、一つの大きな分野を形成している。いわゆる EMC 効果の発見から核子が原子核内にいる時その構造に変化がないかという疑問が真剣に検討され始めた。原子核で得られた核子当たりの構造関数は一見核子標的のそれと違うが、その原因を核子の構造変化と断定するにはまだ理解が不足している。また核子の中のクォークの分布について理論的に提案されている模型を検証する実験値は大きく言って構造関数の  $Q^2$  依存性だけである。

構造関数は本質的に inclusive な量であるが、最近その内容が問われている。その理解には exclusive な実験が不可欠と言える。それは核子及び原子核に電子あるいはニュートリノと言った電弱相互作用をする粒子をあて構造関数のいわゆる Bjorken の  $x$  依存性を調べるだけでなく標的がどういうこわれかたをするかを調べるということである。この時 e-p 及び e-A 衝突型実験を行なうことは単に重心系のエネルギーをあげると言う以上の意味がある。更にこれは全く新しいタイプの実験であり、思わぬ結果が得られる可能性が大きい。

核子がいわゆる valence quark 以外に多くの sea quark を含むことは周知の事実であるが、その成分例えば s-quark や更に重い quark 成分について実験的に直接求められたことはない。quark は単独には存在しないために反跳されるのはハドロンであるが hadronization (quark がハドロンになる機構) が良くわかっていないために、反跳された quark の種類を知ることは出来ないと思われている。しかし s-quark を持つハドロン (K 中間子) などは通常の物質 (核子や原子核) との相互作用が小さく quark として反跳された時の歴史を背負っていると考えられる。charmed quark からなる中間子などは相互作用が更に小さく exclusive な反応でその成分を決めていくことが出来ると考えられる。

ハドロンの構造に強い相互作用の非摂動領域の特徴が現れるのは構造関数で  $x$  の小さい領域である。ここでは主に sea quark の分布を見ていると考えられるが実験的には非常に決定しにくい領域である。 $x$  は核子の質量  $m$  とエネルギー移行  $\nu$ , 4 元運動量移行で以下のように表せる。

$$x = \frac{Q^2}{2m\nu}$$

$x$  の小さな領域は一般的に  $Q^2$  の小さな領域であり、いわゆる radiative correction が難しい。これ virtual photon が real photon に近付いているために real photon の発生する過程との区別が本質的に難しくなるためである。これは終状態のハドロンを押えることで避けられる。この結果 inclusive 反応の中身を知ることになる。

構造関数の物理では基本的に quark が自由に動き廻る perturbative な領域を見ているが、一方で  $Q^2$  がゼロの photon point で見ているのは non-perturbative な領域であり、更に物理は連続しているにも関わらず、一見 photon point だけが特異点の様に考えているのは無理がある。これは GDH sum rule とも関連している。現状では構造関数の  $x$  の小さな領域から外挿して得られた sum rule 値と photon point での理論値は全く矛盾しているように見える。この問題の解決には  $x$  の小さい領域を終状態のハドロンを押えながら測定することが是非とも必要である。

一般に構造関数の実験的研究において radiative correction の問題が大きく高エネルギーのミュオンが使われている。この場合でも相当の高エネルギーであるために補正は単純ではない。更に非常に厚い標的を使う必要があるため標的からどういった粒子が出てきたかを測定することは不可能である。e-p 及び e-A collider の実験はこれらの問題を解決し、更に新しい知見を与え得る数少ない魅力的な加速器の姿と言える。

最後に原子核の例と比較しておこう。原子核では核子の準自由散乱に対するスケーリング則が成り立っているが、これはひとえに核子が原子核中を Fermi 運動量をもって動いていることを表している。しかし核子が本当にどのような状態にいるかは例えば (p,2p) の様な反応の研究が必要となる。これに対応するのが構造関数の exclusive な実験的研究となる。

## (2) 「クォーク核物理学」

### 1. クォークは何故閉じ込められているのか？

数多く見つかったハドロンの状態を説明するために導入されたクォークの存在は深部非弾性散乱により確かめられている。しかし、ハドロンを構成する基本粒子であるクォークは単体では観測されていない。このことからクォークはハドロン内に閉じ込められていると考えられている。クォークの従う理論は量子色力学 (QCD) であると信じられている。QCD はクォークの内部自由度としてカラーを考え、カラー空間でのゲージ変換の不変性を要請して得られる非可換ゲージ理論である。その非可換性から漸近的自由性が導かれる。従って、高エネルギー領域の大きい運動

量の伴う現象は摂動的な計算で良く説明できる。その一方、低エネルギー（マルチ GeV）領域では結合定数が大きくなり非摂動的になるために、クォークの閉じ込めやハドロン構造等の非摂動的な現象に対する明解な答えはいまだに得られていない。「どんな機構でクォークはハドロン内に閉じ込められているのか」という疑問に答えることが、現代の基礎科学に求められている焦眉の重要課題の一つである。

## 2. 非摂動領域での QCD

QCDは非常に美しい理論である。しかし、まだ十分には理解できない多くの非摂動的な興味深い現象を引き起こす。それらを系統的に理解する方法が見つからず、数値的にQCDから直接答えを見つける格子QCD理論(LQCD)と呼ばれる方法が開発された。LQCDは膨大な計算機能力を必要とするが、近年のコンピュータの進歩により数多くの有用な結果が得られるようになってきた。クォークの閉じ込めが起こると、カイラル対称性が破れ、ハドロンの質量が導出できること等が示されている。従って、LQCDは非摂動現象に対してもQCDが正しいという傍証を与えている。しかし、ハドロニゼーション等の時間に依存する過程、ハドロン間相互作用、ハドロンの励起状態の詳しい性質、核子多体問題など、LQCDでは研究が困難な問題も数多く存在しているので、さらなる研究を必要とする。

QCDはカイラル対称性を近似的に持っているに拘わらず、異常に小さい質量のパイ中間子が存在することで、カイラル対称性も自発的に破れている。この性質やクォーク・グルオンが単体では取り出せないという事実などに基づいて、非摂動現象を記述できるモデルを作ることも非常に有効である。モデルパラメーターを実験から決定することができれば、新しい現象を定量的に予測することを可能にする。この予測のもとに実験を行ない、より豊富で新しい現象を定量的に記述しようとする過程を繰り返すことが、結果としてモデルパラメーターの意味づけや、核子さらにハドロン多体系の構造を理解することに結び付く。さらに、そこで得られた現象論的モデルを第一原理から導く努力もなされなければならない。

## 3. 相対ギンツブルグ・ランダウ理論

これらの現象（クォークの閉じ込め・カイラル対称性の破れ）を記述できる低エネルギーの有効理論の一つとして最近注目されているのが双対ギンツブルグ・ランダウ(DGL)理論である。DGL理論の主役はQCDモノポールである。モノポール場が凝縮することにより、我々の真空は一種の超伝導状態（正確には電場と磁場の役割を入れ替えた双対超伝導状態）になり、カラー電場がしばりこまれることによりクォークの閉じ込めが引き起こされると言う描像である。この双対マイスナー効果によるクォークの閉じ込めの概念は1974年頃に南部・トーフト・マンデル



シュタムが提唱したものと一致する。このDGL理論ではアーベリアン空間に存在するQCDモノポールが主役になっており、非常に良い近似でアーベル理論になっているため計算が容易であり、多くの非摂動現象を解析的な方法で導出することが可能である。クォークの閉じ込めやカイラル対称性の破れ、および有限温度でのそれらの対称性の回復が示される一方で、今後、ハドロンの質量・その崩壊・ハドロニゼーション等多くの物理量の計算を行なうことが出来る状況にある。クォーク核物理の基本モデルの役割を果たす可能性を持っている。

興味深いのはこのDGL理論では双対超伝導体になうヒッグス粒子として、スピン・パリティが $0^+$ でほぼ $1.5 \text{ GeV}$ の質量を持つグルーボールが予言されていることである。この粒子は真空とのつながりが大きいために多くのハドロン現象において重要な働きをすると考えられる。QCDモノポールがヒッグス場になっていて、それが凝縮する（ヒッグス機構）ことによって真空が双対超伝導体になることである。従って必然的に励起モードとしてヒッグス粒子であるQCDモノポールが出現する。この粒子はスピン・パリティが $0^+$ でだいたい $1.5 \text{ GeV}$ の質量を持つと予言されている。このグルーボールを発見し、その性質を明らかにすることは閉じ込め機構の実験的研究として大きな意味を持つ。グルーボールはクォークから作られているメソンと強く混合している可能性がある。その意味では、発見されているメソンの構造を系統的に理解することは重要な意味をもつ。さらには、他のスピン・パリティを持ったグルーボールの探索も重要課題である。

#### 4. バリオンは変形しているか？

バリオンのスペクトルにも興味深い規則性が見えている。核子やハイペロンは励起状態で変形している可能性がある。実際にエネルギースペクトルを見ると核子の場合にローパーをバンドヘッドとした回転バンドの様相が見える。しかも、フレーバーやスピンの違う状態においても同じような様相を示している。この可能性を確かめるためにはもっと高いスピン状態の発見やガンマ遷移を測定する必要がある。これらの描像は常に実験の裏付けがあってはじめて確立される。逆にはっきりとした理論の予言がある物理量を測定（発見）することによりその物理体系全体を容認して物理学は発展出来る。QCDにおいても非摂動領域において実験との比較をとうして、理論が確立されてこそ真のハドロン物理（強い相互作用）の理論であるといえる。

#### 5. グルーボールの探索

これまでは実験的にはクォークによって形成されるハドロンの性質（質量・スピン・パリティ・崩壊巾・分岐比等）の測定がなされてきている。QCDにおけるもう

一方の主役であるグルオンから作られるカラーの無い粒子が存在すべきである。従来のクォーク的なメソンと区別するためにグルーボールと呼ぶが、この粒子が実験的に同定されていない。グルーボールの発見とその構造の研究はQCDの非摂動現象として大いなる驚きを与える可能性を持つ。特に我々の真空がモノポール凝縮していることに付随して現れると予言されている $0^+$  (モノポールグルーボール) はハドロン現象で重要な働きをしていると想像できる。その意味で高エネルギー反応における低運動量移行の現象に不可避なポメロンにも強く絡んでいる可能性を持っている。

## 6. クォークフレーバーのSU(3)対称性とその破れの現象

核子のスピンを何が担っているかの疑問に答えることも、その構造を研究するうえでの重要な課題である。スピんに依存した構造関数の研究に対応して、核子のストレンジ成分を決定する研究も興味深い。その意味では、ストレンジ(s)の伴ったハドロンの研究は欠かせない。その質量はアップ(u)・ダウン(d)のものとそんなに変わらず、他のクォーク(c, b, t)とは一線を画する。sクォークはハドロンの質量(1 GeV)に較べると、u・dクォークと似ている。一方でu・dクォークとは違った質量を持っている。この類似性と相異性を積極的に利用することにより、QCDの非摂動効果を引き出すことが可能である。核子系(u, d)のハドロンの研究とほぼ同じ精度と情熱でs系のハドロンの研究を行なうことは重要である。

## 7. ハドロニゼーションはいかにして起きるか？

ハドロン物理の中でクォークの立場から記述すべき重要な現象としてハドロニゼーションがある。OZI則の微視的理解やさらにはその理解を深めるための系統的な実験を行なうことは、ハドロンの物理を定量的に理解することの重要課題である。ハドロン間の相互作用がメソン交換力からフラックスチューブの描像に移るのは何が決定するかを明らかにし、その変化を定量的に記述することも重要な課題である。

クォーク核物理(QNP)は新しい研究分野である。QCDの非摂動現象をクォーク・グルオンの立場から理解することにより、ミクロの世界をより深い(基本的)階層から把握することを目的とする。何故そのようになるのかを現象論的に記述し、その考えを実験で確かめながら理論体系を確立して行き、クォーク・グルオンの作りだす複雑な現象を理解する。さらに重要なのはQNPでの現象論的なモデルはQCDでチェックされる必要があることである。その点では従来の原子核を対象にしていた物理では、その基本力学であるQCDとは大きく離れすぎているために不満足であったと言える。その意味でもこの研究領域はQCDからハドロン物理を理解して、

その基盤に立って原子核を理解する重要なステップになると言える。

#### 8. ハドロンの構造に対する媒質効果

原子核中における核子や中間子は、互いに強く相互作用しており、それは原子核自身の性質のみならず、ハドロンの構造自体にも影響を及ぼしていると考えられる。近年、ハドロンの構造に対する媒質効果を量子色力学に基づいて理解しようという理論的試みが始められ、原子核中でのカイラル対称性の部分的回復の可能性と関連して、理論的にも実験的にも関心を呼んでいる。ハドロンに対する媒質効果は、高温核物質中でもきたいされることから、高エネルギー重イオン衝突実験での中心的な観測量の一つにもなっている。また、原子核中でのベクトル中間子に対する媒質効果については、陽子・光・電子と原子核との衝突でできたベクトル中間子の、レプトン対や光反応崩壊がその媒質中での質量や幅に対する情報を与えると期待されており、これらの精密測定は、原子核内でのQCD真空の構造に対する有用な手がかりを提供する点で重要である。