

RCNP 将来計画検討委員会報告

平成 24 年 8 月 29 日

目次

1 序	2
2 RCNP のリングサイクロトロン施設において推進すべき物理	2
2.1 極限状態における原子核物性の理解	3
2.2 原子核の多様な相の起源の解明	4
2.3 ハドロン相の状態方程式の理解	5
3 RCNP のリングサイクロトロン施設において建設すべき装置	6
3.1 新世代加速器	6
3.2 BRILLIANT	7
3.2.1 不安定核標的生成装置	8
3.2.2 大強度マイクロ軽イオンビーム	9
3.2.3 中性子ビーム照射装置	9
3.3 次世代ガンマ線検出器	9
3.3.1 アイソマービーム生成装置	9
3.4 その他の装置	10
4 計画のロードマップ	12
4.1 第 0 期	12
4.2 第 1 期	13
4.3 第 2 期	14
4.4 第 3 期	15
4.5 第 4 期	16
4.6 リソース	16
5 まとめ	16
A 将来計画検討委員会	17

1 序

大阪大学核物理研究センター (RCNP) リングサイクロトロン施設では、K400 リングサイクロトロンより供給される高品質ビームを駆使し、主に安定核に対する精密核分光によって様々な成果を挙げてきた。

これらの研究をさらに発展させ、原子核科学のフロンティアを切り拓くために、RCNP では研究計画検討専門委員会の諮問を受けて将来計画検討委員会を組織し、RCNP リングサイクロトロン施設の将来について議論を重ねてきた。さらに、2012年3月には、将来計画検討委員会がまとめた将来計画の素案をもとに、研究計画検討専門委員会の主催で RCNP 研究会「リングサイクロトロン施設の将来～大強度高品質ビームで切り拓く原子核科学のフロンティア～」を開催した。この研究会には国内外から 50 名を超える研究者が参加し、RCNP のリングサイクロトロン施設の将来に対する関心の高さが裏付けられるとともに、将来計画において切り拓くべき物理について有意義な議論がなされた。

量子多体系である原子核・核物質の状態は核子数やスピン・アイソスピン、励起エネルギーなど多くの物理量に依存しており、「究極の原子核モデル」を構築するには、これらの物理量を制御しつつ原子核ならびに核物質の物性を明らかにする必要がある。

RCNP リングサイクロトロン施設における将来計画では、アイソスピン軸に沿った研究対象の拡大を指向しつつも、励起エネルギー軸に沿って研究の展開を図り、従来培ってきた精密測定技術を活用して原子核ならびに核物質の物性を精密に理解することを目指す。

この目的を達成するために将来計画検討委員会では、RCNP に大強度高品質ビーム施設と関連する実験装置群を建設すること提案する。

2 RCNP のリングサイクロトロン施設において推進すべき物理

原子核は核子の数が高々 300 個程度の有限量子多体系である。他にも、有限多体量子系の例として、原子分子や金属クラスターなどが知られているが、原子核はスピンとアイソスピンという二つの内部自由度を持ち、さらに相互作用がこれらの内部自由度に強く依存する点において独特である。

ごく少数の核子からなる軽い原子核と、多数の核子からなる重い原子核では、その物理は大きく異なる。また、原子核は形状のような静的な様相のみならず、容易に離合集散することにより、極めて豊かな動的様相も示す。原子核が示す様々な様相は、スピン・アイソスピン、核子数、励起エネルギーなど多くの物理量に依存しており、その物性を精密に理解することは原子核研究における究極の目標である。

無限に大きな質量数をもつ原子核は核物質と呼ばれる。陽子数の増加に伴うクーロン斥力の増大のため、核物質は地球上において安定に存在することはできないが、中性子星などの天体においては、重力の助けのもとに無限多体系として核物質が具現化すると考えられており、通常の原子核の研究を通じて核物質の物性を明らかにすることも原子核研究における重要な目標である。

そこで、RCNP のリングサイクロトロン施設においては、原子核ならびに核物質の物性を精密に理解することを目指して将来計画を推進すべきである。ここで「物性の精密理解」とは、原子核物理学を構成する三つの要素である構造・反応・相互作用を統合的に取扱い、原子核というユニークな有限量子多体系に発現する多彩な現象を統一的に理解することを意味する。

この目標に到達するために、

- 極限状態における原子核物性の理解
- 原子核の多様な相の起源の解明
- ハドロン相の状態方程式の理解
- 直接反応の真の理解

を主要なテーマと定める。これらのテーマは原子核ならびに核物質の物性の精密理解をめざす原子核物理学的観点から重要であるだけでなく、宇宙物理や物性物理の観点からも重要である。

2.1 極限状態における原子核物性の理解

原子核は孤立した自己束縛系であるため表面が存在し、「形」が定義される。球対称空間に孤立しているにもかかわらず、対称性の良い球形ではなく、自発的に対称性を破った変形状態を取ることが多く、一旦破れた対称性を回復するために回転運動が生まれる。変形はそれ自体が興味深い量子現象で、理論的に予想されている様々な変形状態の探索がなされているが、見つかった変形状態は、プロレートの四重極変形がほとんどで、もっとも大きな変形は短軸と長軸の比が 1:2 の超変形状態までである (図 2.1.1)。

変形や回転の極限の探索はこれまでも行われてきているが、短軸と長軸の比が 1:3 の極超変形状態や、 $70\hbar$ を超える超高スピン状態は未だに見つかっていない。四重極変形でもオプレート型や三軸非対称の変形状態、パリティ対称性をも破る高次の変形状態である四面体変形やバナナ形の変形も明確な証拠は得られていない。

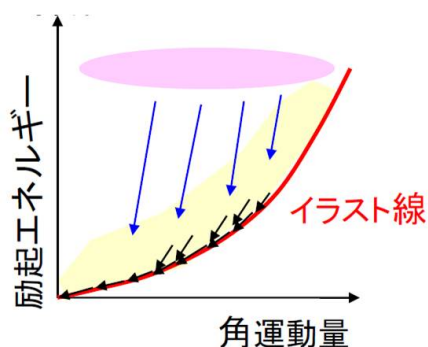


図 2.1.2: イラスト線よりも内側における遷移。

感度を劇的に向上させることが可能で、これまでに到達していない変形や回転の極限への道を開くことになる。

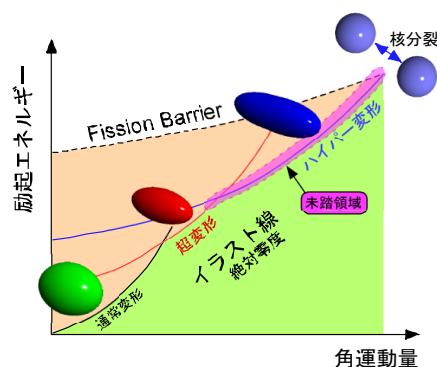


図 2.1.1: 角運動量と励起エネルギーの相関図。

変形や回転はそれ自体興味深い現象であるとともに、様々な量子現象をもたらす場としても重要である。高スピン状態にある強く変形した原子核の一粒子運動は、変形や回転という集団自由度からの強い摂動を受け、通常原子核とは異なる秩序に従うことになる。これは、例えば固体物理での高磁場と対応して考えることができ、原子核においても、超流動状態が常流動状態に変化するなどの相転移が起こることになる。

これまでの変形や回転の探索は、イラスト線に沿った比較的強い遷移の観測に基づいており、これからの大きなブレークスルーはイラスト線よりも内側の弱い遷移の測定によってなされるはずである (図 2.1.2)。トラッキング型の 4π 検出器は測定の

2.2 原子核の多様な相の起源の解明

量子多体系である原子核には、実に多彩な存在形態が発現する。例えば、多くの原子核の基底状態は、全核子が作る平均ポテンシャルの中を、各々の核子が独立粒子であるかのように振る舞う平均場模型が成り立つ。しかし、一方で、原子核には、核内で複数個の核子が空間的に強く関連してクラスターを構成する状態が存在し、これらの状態は予めクラスターの存在を仮定した模型によって良く説明されるものの、平均場模型によってこれを記述することは一般に難しい。平均場と多核子相関という二つの相反する描像は、有限量子多体系である原子核に多様な相が発現することを端的に示しており、我々は原子核というシステムが示す各々の相を個々に理解しているに過ぎない。原子核の多様な相を精査し、その起源を明らかにすることは、原子核物性を精密に理解する上で重要である。

離合集散のダイナミクス ～ クラスター ～

有限粒子数の多体系の特徴として、離合集散があげられる。すなわち、より小さな粒子の多体系に分解したり、より大きな粒子数の多体系に融合したりすることが可能である。特に、原子核は離合集散のダイナミクスが顕著に現れる多体系である。多くの原子核は束縛エネルギーが飽和しており、わずかなエネルギーによって小さな原子核 ～ クラスター ～ に分割することが可能である。

1つの原子核が2つ以上の原子核に分割した上で、弱い結合状態をなしている状態をクラスター状態と呼ぶ。いわゆる池田ダイアグラムに示されるように、軽い安定な自己共役 ($N = Z$) の $4n$ 核においては、 α 崩壊の閾値近傍に α クラスター状態が現れる。例えば、 ^{12}C の 3α 崩壊閾値のわずか 400 keV 上に現れる 0_2^+ 状態 (Hoyle 状態) は 3α 配位を持つ典型的なクラスター状態である (図 2.2.1)。近年の (α, α') 反応を用いた系統的な研究から、p 殻、sd 殻領域におけるクラスター構造が明らかにされつつあ

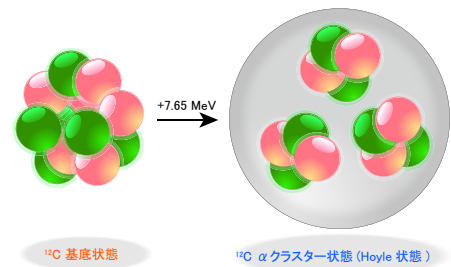


図 2.2.1: Hoyle 状態。

る。さらに、sd 殻領域を超えた重い不安定な自己共役の $4n$ 核においても α クラスター構造が発現し得るかという α クラスター構造の存在限界や、中性子過剰不安定核に期待されるエキゾチックな分子クラスター状態の探索を行うことは、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構を明らかにする上で重要な意味をもつ。

一粒子軌道の変化と核子相関

有限量子系においては、角運動量が良い量子数となり、動径方向の運動が有限領域に閉じ込められるために量子化され、エネルギー準位が離散的となり、必然的に殻構造を持つ。殻構造の存在は魔法数という形で現れ、原子核の場合、陽子あるいは中性子の数において 2, 8, 20 が魔法数となる。近年、中性子過剰な不安定核では 8 や 20 は魔法数になっておらず、新しい魔法数として 16 が発現していることが明らかにされている。このことは、平均場ポテンシャルの構造が安定核と不安定核で異なることを示唆している。このような平均場ポテンシャルの変化と、それに伴う一粒子軌道の変化も、原子核における相の変化の一例である。

近年、不安定核における平均ポテンシャルの変化の起源を核子間テンソル力による核子相関に求める議論がなされている。原子核の束縛エネルギーの大部分 (70–80%) はパイ中間子交換による相互作用

用から生じており、強いテンソル力成分をもつ。しかし、これまでの伝統的な殻模型や平均場計算では、テンソル力 (パイ中間子) による寄与は、平均ポテンシャル内に有効的に繰り込むことであらわには取り入れられず、残留相互作用や粒子・空孔相互作用などへの部分的導入に限られていた。テンソル力は核子の波動関数の高運動量成分に大きく影響するため、高運動量移行をともなう反応の精密測定によって、テンソル相関についての新たな知見を得ることを目指す。

2.3 ハドロン相の状態方程式の理解

状態方程式は、系の熱力学的な情報を記述する最も基礎的な方程式の一つである。核子多体系の物性を論じる上で重要なのは、無限に広がった核物質のハドロン相における状態方程式である。核物質は中性子星などの天体には実在し、超新星爆発やブラックホールの生成過程において重要な役割を果たすと考えられており、核物質の物性を理解し、その状態方程式を導くことは、核子多体系の性質を明らかにするだけでなく、宇宙進化の過程を理解する上で重要な意味を持つ。

核物質の状態方程式は、エネルギーと核子密度の関係式を与える。核子密度の飽和性は原子核の最も基本的な性質であるが、その飽和密度は状態方程式において最小のエネルギーを与える核子密度に他ならない。

飽和密度における核物質の1核子あたりの束縛エネルギーは、経験的質量公式から導かれるが、エネルギーの核子密度に対する曲率に相当する核物質の固さ (非圧縮率) を質量公式から得ることは出来ない。その値は長らく決定されていなかったが、21世紀に入り、大阪大学核物理研究センターにおいて原子核の膨張・収縮モードの精密測定がなされ、高い精度で非圧縮率の値 $K_\infty = 216 \pm 6$ MeV が得られている。これに対して、中性子星に代表される陽子数 Z と中性子数 N が異なる核物質では、エネルギーと核子密度の関係を知る上で、 $x^2 = [(N - Z)/A]^2$ に比例する対称エネルギー項 K_τ が重要となる。

しかし、現在の K_τ の値は $K_\tau = -550 \pm 100$ MeV と精度が低い。 K_τ の精密測定には、膨張・収縮モードの振動エネルギーを系統的に測定する直接的な方法の他に、弾性散乱による中性子密度分布測定や E1 遷移強度分布測定によって中性子スキン厚を決定し、中性子スキン厚を元に K_τ の値に制限を与えようとする間接的な方法が有効である。そこで、不安定核を用いてより広い x の領域に対してこれらの精密測定を実施し、 K_τ の精度を向上させることが核物質の状態方程式を導く上で必要である。

状態方程式にかかる別の課題のひとつは、有限温度における状態方程式である。これは図 2.3.1 に示す QCD 相図で言えば、有限密度 (原子核標準密度)・有限温度のハドロン相 (閉じ込め相) における状態方程式である。有限温度における状態方程式は、QCD 有効模型の有限密度・有限温度における有効性を検証するために極めて有用である。

有限温度における状態方程式を確立するには、原子核の高い励起状態における準位密度を系統的に測定する必要がある。準位密度は大分配関数とラプラス変換で結びつけられており、準位密度から系の熱力学的な情報を得ることができる。原子核の高励起状態における準位密度は極めて高く、個々の状態を一つ一つ計数することは難しいが、超高分解能測定技術によって精度の高い励起

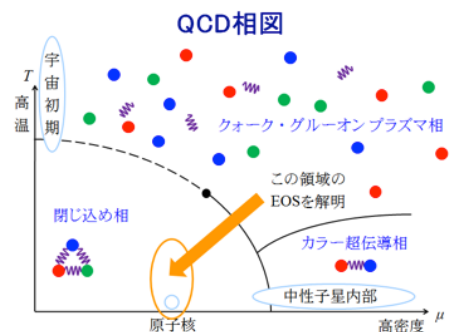


図 2.3.1: QCD 相図。

エネルギースペクトルを得ることができれば、自己相関関数やウェーブレット解析などの統計的手法を用いて、準位密度を引き出すことが可能となる。

3 RCNP のリングサイクロトロン施設において建設すべき装置

前節で述べたテーマを推進し、原子核ならびに核物質の物性を精密に理解するためには、励起エネルギー軸に沿った精密測定を安定核だけでなく不安定核にも拡大する必要がある。これを実現するため、RCNP に大強度高品質ビーム施設と関連する実験装置群を建設すること提案する。

3.1 新世代加速器

これまで RCNP における精密核分光データの品質を担保してきたのは、既存の AVF サイクロトロン・リングサイクロトロンにおいて加速される一次ビームの品質によるところが大きい。将来、励起エネルギー-アイソスピン平面上における未開拓領域に対する精密核分光を可能とするには、現在までに RCNP において蓄積された高品質ビーム生成技術をさらに発展させ、下記の要求を満たす大強度・高品質ビームを供給する新世代加速器を建設する必要がある。

- 超高品質軽イオン ($p, d, {}^3\text{He}, \alpha$) ビーム
 - エミッタンス: $10^{-2}\pi$ mm·mrad 以下かつビーム強度: $1 \mu\text{A}$
 - ビームエネルギー: 精密核分光に最適な $K = 400$ MeV をカバーすること (可能なら $K \sim 800$ MeV)。
- 大強度陽子ビーム
 - ISOL、中性子源、MUSIC などの駆動に適した大強度陽子ビーム
- 大強度重イオンビーム
 - Xe 同位体までの大強度・低エネルギー (~ 10 MeV/u) 重イオンビーム
 - Ge 同位体までの大強度・高エネルギー (~ 60 MeV/u) 重イオンビーム (可能なら ~ 140 MeV/u)

そこで、超高品質軽イオンビームを得るために、高輝度・高安定・低エミッタンス軽イオン源と K200 超電導リングサイクロトロン入射器を新たに建設する。既存の AVF サイクロトロンに代えて、リングサイクロトロンを入射器とすることで加速効率を改善し、ハイパワー加速空洞と高調波加速空洞の導入によりビームの大強度化と超高品質化を図る。

一方で、既存の AVF サイクロトロンは、主コイルを超電導化した上で、高周波加速系を更新し、主に重イオンの加速を目的とした K200 AVF サイクロトロンとして改修する。この K200 AVF サイクロトロンは、後段の主加速器と組み合わせて高エネルギー重イオンビームを得るための入射器として用いるだけでなく、単独で核融合反応による BRILLIANT 標的生成のための大強度低エネルギー重イオンビームの供給にも用いる。

主加速器は、既存のリングサイクロトロンの高周波電源をハイパワー化し、大強度陽子ビームの加速を可能とするアップグレードを行う。さらに、K800 リングサイクロトロンを建設し、最大加速エネルギーを陽子について 700 MeV、重イオンについて 200 MeV/u まで引き上げる。

ここで述べたすべての超電導コイルは、新開発の高温超電導コイルを導入することで運転・維持コストの大幅な軽減を図る。

3.2 BRILLIANT

原子核における励起状態の性質や遷移強度分布を高分解能にて調べる上で、順運動学条件下における質量欠損法は極めて強力な研究方法の1つである。従来この順運動学条件下における測定は安定核標的に限られていたが、これを寿命1分以上の不安定核標的にまで拡張するのが、BRILLIANT (Beam system for Reaction of Isotopes of Long-life with Light-Ions Applying Normal kinemaTics) である。

BRILLIANTでは、図3.2.1に示すように核融合反応や核破碎反応を用いて生成した不安定核をオンラインにて効率よく分離し、ルミノシティを増大させるために直径 $10\ \mu\text{m}$ という狭い領域に停止させて標的とする。この標的に、新加速器から供給される陽子や ^3He などの大強度・高品質軽イオンビームを直径 $10\ \mu\text{m}$ に制限して照射し、不安定核標的からの散乱粒子を高分解能スペクトロメータ Grand Raiden を用いて高分解能で測定する。

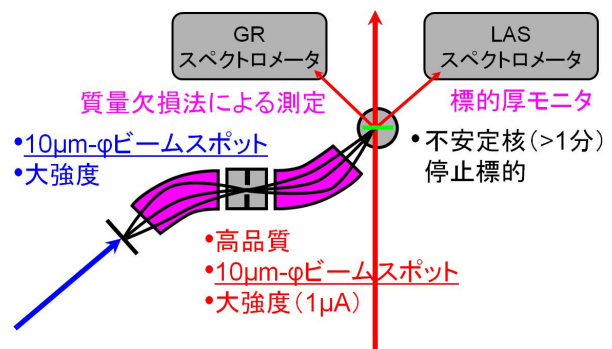


図 3.2.1: BRILLIANT 計画概略図。

従来の方法では、不安定核を標的にすることが出来なかったため、すべての不安定核実験は不安定核をビームとして用いる逆運動学条件下において実施しなければならなかった。逆運動学条件下では、エネルギーの低い反跳粒子を測定する質量欠損法の実施は一般に難しく、励起した不安定核から放出される全ての崩壊粒子の運動量を測定する不変質量法が広く用いられてきた。しかし、不変質量法の場合、励起エネルギーが高くなるにつれて崩壊粒子の多重度が大きくなり、不変質量を決定することが困難になる。特にガンマ線や中性子の多重度が大きくなると検出効率は大きく下がり、全放出粒子を捕らえることは現実的でなくなってしまう。実際、過去に実施された不安定核に対する散乱実験は、放出粒子の多重度が比較的小さい低励起エネルギー領域に限られていた。

不安定核を標的として用いることを可能とする BRILLIANT は、励起状態の精密測定が可能な対象核種・励起エネルギー領域を飛躍的に拡大し、原子核実験にパラダイムシフトをもたらす極めて野心的なプロジェクトである。

また、BRILLIANT 標的に中性子ビームを照射すれば、不安定核の中性子捕獲断面積を測定することが可能である。中性子過剰核の中性子捕獲断面積を系統的に測定することは、宇宙における元素合成過程 (s-process, r-process) を理解するうえで極めて重要である。

BRILLIANT 計画を実現するためには、以下の技術的開発が必要である。

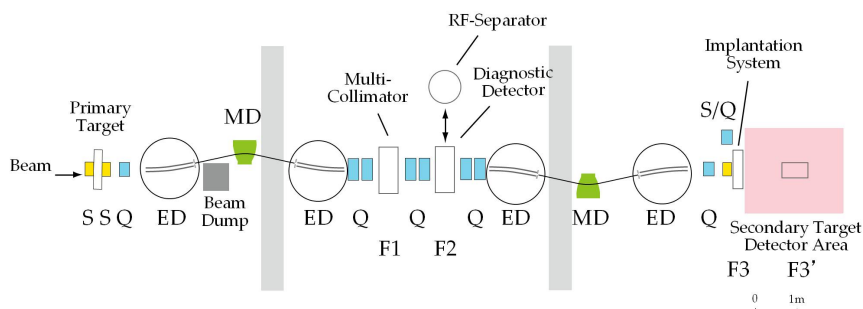


図 3.2.2: Recoil Mass Spectrometer の概略図。

Solid Angle	40 msr
Energy Acceptance	$\pm 20\%$
Secondary Beam Emittance	π mm mr
Magnetic Rigidity	1 Tm
Electric Rigidity	18 MV
Q/M Resolution	1/1000

表 1: Recoil Mass Spectrometer の仕様。

3.2.1 不安定核標的生成装置

毎秒 10^7 個の不安定核を生成・分離し、直径 $10 \mu\text{m}$ の領域にインプラントするための不安定核標的生成分離装置を開発する必要がある。陽子過剰不安定核の生成には核融合反応が、中性子過剰不安定核の生成には核破砕反応が有効であり、それぞれ低エネルギー大強度高品質重イオンビームと大強度陽子ビームを用いる。

陽子過剰不安定核生成のために、Recoil Mass Spectrometer (RMS) を建設し、1次標的に低エネルギー大強度高品質重イオンビームを入射することにより、 π mm mr という1次ビーム並のエミッタンスをもつ陽子過剰不安定核ビームを得る。RMSの概略図と想定される仕様を、それぞれ、図 3.2.2 と表 1 に示す。

大強度陽子ビームを用いた核破砕反応によって生成された中性子過剰核は、ISOL法を用いて核種を分離後、ゼロエネルギーから静電加速器を用いた再加速を行うことでエミッタンスを改善する。

将来的には、核融合反応や核破砕反応によって生成された標的核を $10 \mu\text{m}$ の領域に保持するシステムとして、バックグラウンドのないイオントラップ方式の確立を目指す。現時点で、直ちにBRILLIANTに应用できる技術は存在しないが、将来の導入を目指して開発を行う。大強度電子ビームによるイオン捕獲現象を利用したEBIT(Electron Beam Ion Trap)方式は有力な候補となり得る。

イオントラップ方式を確立するまでの期間は、 $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 以下の宿主物質に不安定核をインプラントして標的とする。宿主物質は、次節に述べる大強度ビームの照射に耐えることが要求される。また、インプラントされた不安定核は時間と共に崩壊して別の核種へと変化していくため、テープ装置のように標的となる不安定核の寿命と同程度の時間スケールで標的を交換するシステムが必要となる。宿主物質からのバックグラウンドは高分解能測定によるS/N比の向上によって除去する。

3.2.2 大強度マイクロ軽イオンビーム

散乱のルミノシティを向上させるためには、 $10\ \mu\text{m}$ の領域に $1\ \mu\text{A}$ の大強度マイクロビームを入射して測定を実施する必要がある。加速器のアップグレードによって大強度化と高品質化を測ると同時に、主加速器への入射前にビーム整形を行うことで、 $1\ \mu\text{A}$ 照射時のビームのエミッタンスを従来比で100倍以上改善し $10^{-2}\pi\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下とする。さらに、加速器から実験室へ至るビーム輸送系および診断系を改良し、直径 $10\ \mu\text{m}$ 以下の大強度軽イオンビームを安定に供給できるシステムを構築する。

大強度高品質化とビーム整形によるマイクロ軽イオンビームは、BRILLIANTでの実験に供されるだけでなく、安定核の実験に分散整合技術とともに導入すればエネルギー分解能において $10\ \text{keV}$ を切る超高分解能測定が可能となる (3.4)。

3.2.3 中性子ビーム照射装置

小型線形陽子加速器 ($7\ \text{MeV}$, $1\ \text{mA}$) からの陽子ビームを ${}^9\text{Be}$ 標的に入射して $10^{11}\ \text{cps}$ の中性子ビームを生成し、BRILLIANT 標的に照射する。照射後の標的から放出される γ 線を次世代ガンマ線検出器 (3.3) を用いて計測することで中性子捕獲断面積を決定する。

3.3 次世代ガンマ線検出器

ハイパー変形状態やエキゾチック変形状態を探索するためには、これらの状態から放出される微弱な多重ガンマ線を弁別し、回転励起準位の構造を明らかにしなければならない。そこで、図 3.3.1 に示すような検出感度と信号雑音比を大幅に改善した次世代のトラッキングガンマ線検出器を開発する。想定する次世代ガンマ線検出器の仕様を表 2 に示す。建設は、 $\Delta\Omega = 1\pi\ \text{sr}$ と $\Delta\Omega = 4\pi\ \text{sr}$ の2段階で行う。最終的にガンマ線の検出効率を40%程度にまで増加させるとともに、ガンマ線のトラッキングにより信号雑音比を向上させ、既存の検出器に比べて1000倍以上の検出感度を実現する。また、大強度ビーム利用のために、高レート耐性と高時間分解能も達成する。

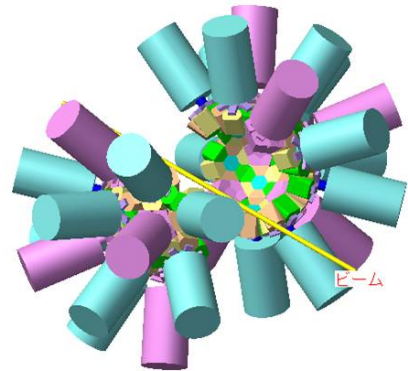


図 3.3.1: 次世代ガンマ線検出器。

具体的には、RMS を用いて高品質陽子過剰核ビームを生成・分離し、これを用いて極超変形状態を探索する。また、EN コースや Grand Raiden 等、既存の実験設備と組み合わせて中性子過剰核の核子移行反応や巨大共鳴状態からの γ 崩壊を測定し、殻構造や核子相関の研究も実施する。

3.3.1 アイソマービーム生成装置

核子あたり $10\ \text{MeV}$ 程度の低エネルギー重イオンビームを用いた核融合反応や直接反応過程、核子当たり数 $10\ \text{MeV}$ の高エネルギー重イオンビームを用いた核破碎反応や核分裂反応では、原子核の高

	1 π	2 π
dE/E @ 1 MeV	0.2%	0.2%
$\epsilon\Omega$	10%	40%
位置分解能	2 mm	2 mm
dE/E @ $\beta = 0.3$	1%	1%
検出限界	10^{-5}	10^{-7}
概算建設費	10 億円	+35 億円

表 2: 次世代ガンマ線検出器の仕様。

スピン状態が生成される。このような高スピン状態のうち、ビーム生成・輸送時間よりも長い(数百 ns 以上)寿命をもつアイソマーは、これをビームとして散乱実験に供することが可能である。

これらのアイソマービームは、ビーム自身が大きな角運動量を持つという、従来のビームにはない特徴を備えており、エキゾチック変形状態や高スピン領域におけるハイパー変形状態など、通常のビームでは励起できない極限状態における原子核の物性研究を可能にする革新的なビームとなる。

そこで、高スピンアイソマービームを生成するために、既存の EN コースを更新して大口径化し、目的のアイソマーを他の核反応生成物から分離するフラグメントセパレータを建設する。また、十分な二次ビーム強度を得るためには、大強度重イオンビームを一次標的に照射する必要があり、これに耐えられる生成標的システムも併せて開発する。

アイソマーやアイソマービームによって励起された変形・回転状態からの崩壊ガンマ線は、トラッキングガンマ線検出器で計測する。

3.4 その他の装置

これまでに述べた基幹装置群に加え、大強度高品質ビームの利点を活かした装置群を大型科研費等の外部資金を投入しつつ整備する。

超高分解能ビームライン

RCNP の既存施設においては、リングサイクロトロンより供給される高品質ビームと分散整合技術を用いることにより、陽子非弾性散乱や ($^3\text{He}, t$) 荷電交換反応について 20–40 keV の高分解能励起エネルギースペクトルを得ることに成功している。 $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ という世界最高を誇る高分解能測定は、準位密度の高い核種・励起エネルギー領域において分光学的測定を実施する上で不可欠な技術であり、RCNP において取得されるデータの高い信頼性を担保している。すなわち、高分解能測定は準位間隔の狭い異なる準位を弁別して単一の状態に対する情報を排他的に取得できるだけでなく、励起強度の弱い準位について測定の S/N 比を飛躍的に向上させることが可能となる。

しかし、量子多体系である原子核の準位密度は、質量数の増加とともに増大するため、たとえ核物理研究センターが世界に誇る高分解能測定技術であっても、sd 殻を超える原子核に対しては、必要なエネルギー分解能を達成できていない。たとえば、天体核反応において重要な役割を果たすクラス

ター状態や分子共鳴状態は、一般に準位密度の高い励起エネルギー領域に存在しており、これらの状態を研究するにはさらなる高分解能化が必要不可欠である。

既存の施設において、達成可能なエネルギー分解能を制限しているのは、リングサイクロトロンから供給される一次ビームの標的上における像の大きさである。世界最高性能を誇る磁気スペクトロメータ Grand Raiden の公称運動量分解能 $1/37,000$ は、標的上において一次ビームの像が 1 mm の大きさをもつことを想定している。3.2.2 に述べた軽イオンマイクロビームが実現されれば、エネルギー分解能において 10 keV を切る超高分解能測定が可能となり、既存の施設では決して実施できなかった全く新しい測定を実施することが可能となる。

このために、ビーム輸送系の改良と同時に、 $100\text{ }\mu\text{m}$ オーダーでの収束条件を確認できるビーム診断装置と、Grand Raiden の焦点面において粒子軌道を $50\text{ }\mu\text{m}$ 以上の精度で測定できる高分解能位置検出器を開発する。

大立体角荷電粒子検出器

原子核の励起状態の微視的構造を明らかにするには、励起状態からの崩壊粒子を測定することが有効である。巨大共鳴状態に代表される平均場的励起状態が核子を放出して崩壊すると期待されるのに対し、空間的に発達したクラスター状態は、クラスター粒子を放出して崩壊すると考えられる。例えば、 $A \leq 40$ の $A = 4n$ 核に準安定的に存在すると考えられるクラスター凝縮状態は、 α クラスターを放出しつつ、軽い核のクラスター凝縮状態へ逐次的に崩壊する。 $n\alpha$ 崩壊を検出してクラスター凝縮状態を同定するには大立体角を被う荷電粒子検出器を開発する必要がある。

また、逆運動学条件下における不安定核ビーム実験においても、大立体角を被う荷電粒子検出器が有効である。逆運動学実験においては、励起状態からの崩壊粒子をすべて測定する不変質量法に基づいた核分光実験が広く行われているが、崩壊粒子の多重度が高い状態に対して不変質量法を適用することは容易でない。そこで、不変質量法に代えて、低エネルギーの反跳粒子を測定する質量欠損法を用いれば、崩壊の多重度による制限を受けることなく不安定核の励起エネルギースペクトルを測定することが可能となる。しかし、逆運動学条件下における質量欠損法による測定を行うには、高いエネルギー分解能 ($\Delta E < 100\text{ keV}$) と角度分解能 ($\Delta\theta < 1\text{ mrad}$) を持ち、広い反跳角度を覆う大立体角荷電粒子検出器が必要となる。

本計画では、大立体角荷電粒子検出器として電磁スペクトロメータの建設を検討する。高温超電導体を用いて強磁場を発生し、磁場によって分析された崩壊粒子を、近年発展の著しい高精度シリコン検出器を用いて測定することにより、これまでに類を見ない小型で高分解能の大立体角荷電粒子検出器が可能となる。

μ 粒子ビーム生成装置

新施設において加速される大強度陽子ビームと既存の μ 粒子発生装置 (MUSIC) を用いて大強度連続 μ 粒子ビームを発生させ、

- μ 粒子捕獲反応による原子核構造の研究
- μ 粒子触媒核融合反応による三体核融合反応の研究

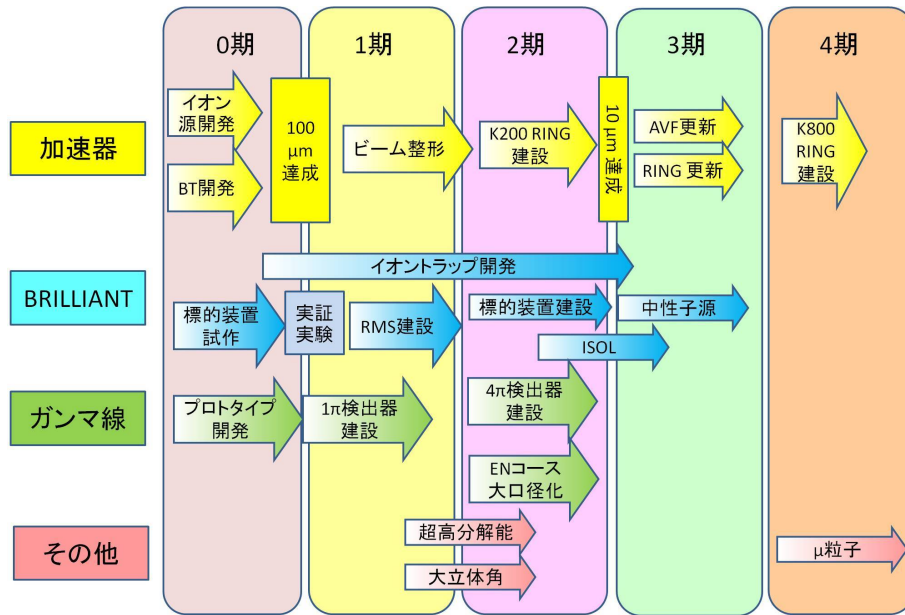


図 4.0.1: RCNP 将来計画のロードマップ

- μ 粒子捕獲 X 線測定による不安定核の荷電半径の測定
- μ 粒子散乱実験
- μ SR による物性研究

を実施する。

4 計画のロードマップ

本計画を推進するために、計画を図 4.0.1 に示すように 0-4 の 5 段階に分けて実施する。第 0 期については、RCNP 内部の予算措置によって出来る限り早く着手し、大強度高品質ビーム施設建設の橋頭堡を築く。続く第 1 期では、10 億円規模の予算によってトラッキングガンマ線検出器 ($\Delta\Omega = 1\pi$ sr) と Recoil Mass Spectrometer を建設して、高感度ガンマ線分光実験と BRILLIANT による長寿命不安定核を標的とした順運動学条件下における高分解能測定を開始する。第 1 期分の開発をすすめつつ成果をあげ第 2 期以降の予算獲得を目指す。第 2 期では、軽イオン入射器の更新と BRILLIANT 標的生成装置の実機建設、ならびに、トラッキングガンマ線検出器の 4π 化を行う。さらに第 3 期に既存の K400 リングサイクロトロンと K140 AVF サイクロトロンの改修を行なうと共に基幹装置を完成させ、第 4 期には $K = 800$ MeV へのエネルギーアップグレードを行う。

4.1 第 0 期

加速器

既存のサイクロトロン (K140 AVF サイクロトロン + K400 リングサイクロトロン) で加速した軽イオンビームのマイクロビーム化を図るため、高輝度・高安定・低エミッタンス軽イオン源の開発に着

手すると共に、AVF サイクロトロンの入射ビームライン (LEBT) において、エミッタンス制限スリットシステムの開発を行う。イオン源からターゲットまでのビーム輸送効率を向上させるため、AVF サイクロトロン LEBT のビームバンチャー及び垂直入射集束レンズ系の改良により入射効率を向上させるとともに、リングサイクロトロンへのビーム輸送ライン (MEBT) 及び入射ビームラインの改良により 90% 以上のビーム透過効率を目指す。また、既存のビームラインの改良により、 $10^{-2}\pi$ mm·mrad 以下のエミッタンスに制限した状態でビーム径 $100 \mu\text{m}$ 以下へのビーム集束を試みるとともに、縮小率 1/10、ビーム径 $10 \mu\text{m}$ の高エネルギー軽イオンマイクロビーム形成装置の設計を実施する。

BRILLIANT

標的、位置検出器、コリメータなどの精密位置調整システムを有するインプラント標的システムのプロトタイプを開発する。安定核および長い寿命の不安定核を宿主物質へインプラントし、インプラント標的を用いた原子核反応測定の実証実験を行う。具体的には、安定核と長寿命不安定核 ($t_{1/2} > 5$ d) のインプラント標的を用いた散乱実験を行う。最初に実施する物理実験として下記の反応を予定している。

$^{46}\text{Ca}(d, ^3\text{He})$	希少安定核	陽子独立粒子軌道とテンソル力
$^{32}\text{Si}(^3\text{He}, t)^{32}\text{P}$	$t_{1/2} = 200$ y	GT 遷移強度と GT 単位断面積
$^{178m}\text{Hf}(p, p')$	$t_{1/2} = 31$ y	高スピン状態 ($J = 16$) の上の共鳴状態観測
$^{56}\text{Ni}(^7\text{Li}, ^7\text{Be})^{56}\text{Cu}$	$t_{1/2} = 6.1$ d	νp プロセス (天体核反応)
$^{10}\text{Be}(^7\text{Li}, ^7\text{Be})^{10}\text{Li}$	$t_{1/2} = 200$ My	^{10}Li 不安定核の構造と励起状態

これと並行し、第 1 期以降に向けて、マイクロビームの生成・制御・診断・フィードバックに関する開発、標的システム実機・マイクロビームアイソトープ分離システム、および、ISOL のデザインと基礎テストを行う。さらに、イオントラップ技術の開発を開始する。

次世代ガンマ線検出器

検出器の設計と基本性能の確認を実施する。米国の GRETINA や欧州の AGATA との共同研究で電極分割の最適化や読み出し回路の開発、冷却機構の見直しなどを行う。テスト機として一つの結晶の検出器とそれに必要な読み出し系を製作し、三次元トラッキングの実証を行う。

4.2 第 1 期

加速器

第 0 期に引き続き、高エネルギー軽イオンマイクロビーム形成装置の開発を進める。さらに、mA 級の大強度軽イオン加速と最大 50 MeV/u の重イオン加速を両立させる新しい大強度高品質入射器として高温超電導 K200 リングサイクロトロンの詳細設計を行う。並行して、高温超電導電磁石の大型化に向けた要素開発を進める。

BRILLIANT

核融合反応を用いて陽子過剰核ビームを生成するための Recoil Mass Spectrometer (RMS) を建設し、比較的寿命の長い ($t_{1/2} > 1 \text{ h}$) 陽子過剰核を標的とした散乱実験を実施する。陽子過剰核の生成には既存の K140 AVF サイクロトロンからの重イオンビームを用いる。また、イオントラップ型標的の開発を継続する。

次世代ガンマ線検出器

1π トラッキング Ge アレイを建設する。RMS を用いて陽子過剰高スピンビームを生成・分離し、これを用いて $A \sim 40$ 領域での極超変形状態の探索を開始する。また、アイソマービームを用いた実験も開始する。さらに、テーマは外れるが、既存の EN コースにおいて中性子過剰核の核子移行反応測定を実施し、殻構造や核子相関の研究も開始する。

その他

ビームラインにおける分散整合条件を $100 \mu\text{m}$ のオーダーで確認できるビーム診断系と $50 \mu\text{m}$ の分解能を持つ Grand Raiden 焦点面検出器を開発し、超高分解能測定を可能にする。その後、準位密度の測定やクラスター状態の探索実験を行う。さらに大型科研費による外部資金を獲得して、大立体角荷電粒子検出器を建設する。

4.3 第2期

加速器

高温超電導 K200 リングサイクロトロンの建設を行い、mA 級の高輝度・高安定・低エミッタンス軽イオン入射ビームを実現する。ビームエミッタンスを制限することにより、既存の K400 リングサイクロトロンとの整合性を向上させた上で、100%近い透過効率により 400 MeV 陽子ビームの増強を図る。また、高エネルギー軽イオンマイクロビーム形成装置を建設し、ビーム径 $10 \mu\text{m}$ 、ビーム強度 $1 \mu\text{A}$ の高強度軽イオンマイクロビームを BRILLIANT に供給する。数百 kW–MW 級の 400 MeV 陽子ビーム加速を目指し、既存の K400 リングサイクロトロンの高周波加速系ハイパワー化に向けた共振空洞及び高出力アンプ系の設計を行い、モデル共振空洞による要素開発を実施する。また、高調波加速によるビームの高品質化も試みる他、建屋の放射線遮蔽強化の設計も行う。

一方、重イオンビームの高輝度化・高エネルギー化を図るため、超電導 ECR イオン源やパルス型重イオン源等の開発を行うと共に、既存の K140 AVF サイクロトロンの高温超電導化、加速電極及び共振器の複数化、RF 周波数帯域の拡張、高調波加速による高品質化などを目指したアップグレードの詳細設計を実施する。

BRILLIANT

第1期までにプロトタイプインプラント標的システムで得られた知見を活かして、10 μm 以下の領域に不安定核をインプラント可能な標的インプラントシステムの実機の建設を行う。さらに、ISOLと生成核を再加速するための静電加速器を整備して、陽子過剰核だけでなく中性子過剰核についての実験を開始する。ISOLの駆動には、新規に建設した高温超電導 K200 リングサイクロトロンからの陽子ビームの一部を用いる。

次世代ガンマ線検出器

4π トラッキング Ge アレイを完成させる。また、EN コースのフラグメントセパレータを大口径化し、新に建設された超電導 ECR イオン源と高温超電導 K200 リングサイクロトロンによって高輝度化された重イオンビームを用いて中性子過剰核やアイソマービームを生成し、極限原子核についての実験を行う。例えば $A \sim 40, 80, 100$ のこれまでよりも中性子過剰な領域で超変形状態の探索や、 $A \sim 160$ 領域でのバナナ変形、極超変形の探索を実施する。さらに、国内外の加速器施設との共同研究を実施し、必要に応じて 4π トラッキング Ge アレイを移設して実験を行う。

4.4 第3期

加速器

既存の K400 リングサイクロトロンの高周波加速系のハイパワー化と高調波共振空洞の増強により高品質の大強度 400MeV 陽子ビーム加速に必要な機器を整備し、ビームロスを最小限に抑えながらビームパワーを段階的に増やしていき、数百 kW–MW 級陽子ビームの実現を目指す。並行して、建屋及びビームダンプの遮蔽能力の強化を図る。

既存の K140 AVF サイクロトロン電磁石の高温超電導化や高周波加速系の更新などにより K200 AVF サイクロトロンへアップグレードし、K400 リングサイクロトロンで加速する重イオンビームの高輝度化・高エネルギー化を実現する。

また、軽イオン及び重イオンの高エネルギー化を図るため、既存の K400 リングサイクロトロンの高温超電導化による K800 クラスへのアップグレードや高温超電導コイルを用いた新しい K800 リングサイクロトロンの詳細設計を行い、コスト・ミニマムでの実現性を検討・判断する。

BRILLIANT

重イオン入射器の完成により重イオンビームをさらに高輝度化して、より短寿命の陽子過剰核についての散乱実験を可能とする。さらに、イオントラップ型標的を導入し、バックグラウンドのない測定を実現する。不安定核の巨大共鳴を系統的に測定する。また、小型中性子源を建設し、不安定核停止標的への中性子照射による中性子捕獲反応実験を実施する。

4.5 第4期

第3期での検討結果を踏まえてK800リングサイクロトロンを完成させ、陽子を最大700MeVまで、重イオンを最大200MeV/uまで高エネルギー化する。また、数百kW-MW級400MeV陽子ビームを定常的に供給し、中性子やミュオンなどの連続ビームの利用が可能な大強度二次粒子施設を整備し、基礎物理実験や物質科学を開始する。

4.6 リソース

本報告書が提案する将来計画の実現に必要なリソースを表3にまとめる。既存加速器のリユースや高温超電導化による低電力化・低コスト化を進めつつ、新世代の大強度高品質ビーム施設を建設する。

新世代加速器	建設時期	仕様	金額	人員
入射器 (高輝度・高品質)	2期	軽イオン加速器 (K200 高温超伝導・リング)	50億	
	3期	重イオン加速器 (K200 高温超伝導・AVF)	25億 (upgrade)	スタッフ×8 技術職員×6
主加速器 (高輝度・高品質)	3期	リングサイクロトロン (K400 常伝導)	15億 (upgrade)	
	4期	リングサイクロトロン (K800 高温超伝導)	60億 (upgrade)	
BRILLIANT	建設時期	仕様	金額	人員
	1期	Recoil Mass Separator	3億	3名
	2期	標的インプラント装置	10億	スタッフ×3 PD・技術職員×5
ISOL	2期	オンライン不安定核生成装置 イオン化装置・静電加速器	3億	3名
中性子源	3期	小型陽子線型加速器 中性子生成標的	2億	2名
トラッキングガンマ線検出器	建設時期	仕様	金額	人員
	1期	Ge 検出器 1π	10億	スタッフ×3
	2期	Ge 検出器 4π	35億	PD・技術職員×4
フラグメントセパレータ	2期	EN コース (upgrade)	5億	4名
その他	建設時期	仕様	金額	人員
超高分解能測定	2期	ビームライン・診断系	2億	2名
	2期	焦点面検出器	1億	1名
大立体角荷電粒子検出器	2期		2億	スタッフ×1 PD・技術職員×2

表 3: 将来計画の実現に必要なリソース。

5 まとめ

RCNP では、研究計画検討専門委員会の諮問を受けて将来計画検討委員会を組織し、RCNP リングサイクロトロン施設の将来について検討した。

RCNP リングサイクロトロン施設における将来計画では、アイソスピン軸に沿った研究対象の拡大を指向しつつも、励起エネルギー軸に沿って研究の展開を図り、従来培ってきた精密測定の技術を活用して原子核ならびに核物質の物性を精密に理解することを目指すべきである。

この目的を達成するために将来計画検討委員会では、RCNP に大強度高品質ビーム施設を建設することを提案する。この計画では大強度高品質ビームを供給できる新世代加速器を建設すると共に、基幹装置として、不安定核の順運動学反応による核分光装置 (BRILLIANT) と次世代ガンマ線検出器を建設する。

本計画は5段階に分けて実施する。第0期において新施設を建設するための基礎技術の開発と実証を行い、第1期から第4期にかけて段階的に施設の整備を進める。このうち第0期については、RCNP 内部の予算措置と人事計画に基づいて出来る限り早期に着手し、将来計画をスタートさせることを提言する。

A 将来計画検討委員会

川畑 貴裕	委員長、京都大学 大学院理学研究科
青井 考	大阪大学 核物理研究センター
秋宗 秀俊	甲南大学 理工学部
王 恵仁	大阪大学 核物理研究センター
緒方 一介	大阪大学 核物理研究センター
小田原 厚子	大阪大学 大学院理学研究科
嶋 達志	大阪大学 核物理研究センター
鈴木 智和	大阪大学 核物理研究センター
高久 圭二	大阪大学 核物理研究センター
民井 淳	大阪大学 核物理研究センター
橋本 尚志	大阪大学 核物理研究センター
畑中 吉治	大阪大学 核物理研究センター
福田 光宏	大阪大学 核物理研究センター
三木 謙二郎	大阪大学 核物理研究センター
若狭 智嗣	九州大学 大学院理学研究院