

2.1 不安定核物理

Physics of Unstable Nuclei

青井考	AOI Nori	代表、大阪大学・核物理研究センター
上坂友洋	UESAKA Tomohiro	副代表、理化学研究所・仁科加速器研究センター
今井伸明	IMAI Nobuaki	副代表、高エネルギー加速器研究機構・ 素粒子原子核研究所
延與佳子	KANADA-EN'YO Yoshiko	副代表、京都大学・理学研究科
浅井雅人	ASAI Masato	日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター
古川武	FURUKAWA Takeshi	首都大学東京・理工学系
井手口栄治	IDEUCHI Eiji	東京大学・原子核科学研究センター
磯部忠昭	ISOBE Tadaaki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
岩佐直仁	IWASA Naohito	東北大学・理学研究科
加治大哉	KAJI Daiya	理化学研究所・仁科加速器研究センター
光岡真一	MITSUOKA Shinichi	日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター
宮下裕次	MIYASHITA Yuji	理化学研究所・仁科加速器研究センター
森本幸司	MORIMOTO Kouji	理化学研究所・仁科加速器研究センター
王惠仁	ONG Hooi Jin	大阪大学・核物理研究センター
大田晋輔	OTA Shinsuke	東京大学・原子核科学研究センター
大津秀暁	OTSU Hideaki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
嶋達志	SHIMA Tatsushi	大阪大学・核物理研究センター
炭竈聡之	SUMIKAMA Toshiyuki	東京理科大学・理工学部
寺西高	TERANISHI Takashi	九州大学・理学研究院
上野秀樹	UENO Hideki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
山上雅之	YAMAGAMI Masayuki	会津大・コンピュータ理工学部
中村隆司	NAKAMURA Takashi	世話人、東京工業大学・理工学研究科

2.1.1 序

原子核は中性子と陽子という二種類のフェルミオンからなる有限量子多体系であり、中性子数と陽子数という二つの自由度の上に多彩な構造や現象を生み出す。1980年代中葉までの研究は安定線近傍に沿ってすすめられ、いわば、安定線で切り取った一次元の像を見ていたことになる。この長らくとらわれていた安定線への束縛から解き放たれたのは、不安定核ビーム生成技術が劇的に進歩したごく最近のことであり、それによって二つの自由度の変化のもと、原子核本来の姿を垣間見ることができるようになってきた。これまでの不安定核実験は主として軽い質量領域の原子核に限定されていたが、そこでは中性子ハロー構造や魔法数の消失など安定核近傍で培われてきた原子核像の見直しを迫るような構造や現象が見出され、不安定核研究が爆発的に拡大するきっかけとなった。

安定線からなるべく遠く離れた不安定核の中に特異な構造を見出し、その発現機構を突き止めるという観点で始まった不安定核研究は、やがて、二種類の構成粒子からなる原子核という系をより根源的に理解するというもう一つの流れを生み、現在では二つのアプローチが車の両輪となっている。自由空間ではほぼ理解されている核力が、原子核という多体系にどのような構造をもたらすのか。この問いに答えるためには、安定核という特殊な系を見ているだけでは不十分で、より一般的な原子核に現れる多様な姿を見る必要がある。中性子数と陽子数を様々に変化させたり、それによって束縛エネルギーを変化させたりした場合に何が起こるのかという研究を通じて不安定核の姿を明らかにすることで、安定核の理解もまた塗り替えられようとしている。

不安定核の理解は、宇宙核物理にも進展をももたらそうとしている。星間ガスが集まり星が生まれ、様々な形態を経て一生を終えるまでの一連の過程では、原子核反応連鎖がエネルギーの供給源であり、新しい元素が次々と合成される場でもある。爆発的に起こる天体現象では、寿命が短い原子核も崩壊する前に次々と反応を続けるため、不安定核の反応や構造の理解が欠かせない。

不安定核の本格的な研究は、1980年代中葉に、日本グループによるローレンスバークレイ国立研究所(米)での不安定核ビーム生成技術の発明とそれを利用した中性子ハロー構造の発見[Tan85]によって始まった。その後1990年代以降に急激に発展し、理化学研究所、GANIL研究所(仏)、ミシガン州立大学(米)、GSI研究所(独)を中心とした各国重イオン加速器施設で競って研究がすすめられてきた。その成果によって不安定核研究の重要性の認識が増し、より広い核図表領域の原子核ビームをより強い強度で得られるような新世代不安定核実験施設を建設することへの期待が高まった。上に述べた各研究所は、次世代不安定核施設の建設計画の策定に着手し、ビームの核種と強度の大幅な増強を目指した。先頭走者である日本では、2007年に新世代不安定核生成施設であるRIビームファクトリー(RIBF)[Yan07]が稼働を開始し、既に成果を出し始めている。SPIRAL2(仏)、FRIB(米)、FAIR(独)の各計画も進行中で、今後数年~10年程度で始動する見通しである。今まさに、核図表の果てに広がる大海へ向けての航海に挑む好機にあると言える。

本報告書では、RIBFを中心にRCNPやCYRIC、JAEAなど、日本で展開する不安定核研究を、現有の施設を最大限に生かした近未来の研究戦略と、その先での更なる研究の拡大に分けて展望したい。不安定核研究の分野は多岐にわたるため、6つの視点から議論し、各々に基本問題を設定して研究戦略を議論する。

- 存在限界と基礎量: 原子核の存在限界はどこまで広がっているのか?
 安定の島は存在するのか? 人類はそこに到達し得るのか?
- 一粒子運動: 殻構造は安定線から離れた領域でも原子核の基本構造たりうるのか?
- n 核子相関: 核子相関は不安定核に新しい相をもたらすか?
- 変形: 自発的対称性の破れは原子核にどのような形を生み出すのか?
- 状態方程式: 中性子物質は固いのか? 柔らかいのか?
- 宇宙核物理: 我々の世界を形作る元素はどのようにして作られたのか?

超重核も狭義の不安定核物理(中性子/陽子過剰核の物理)と本質的に興味が一致するため、ここでは併せて扱う。また、不安定核の構造や反応と密接に関係する宇宙核物理もここに含める。

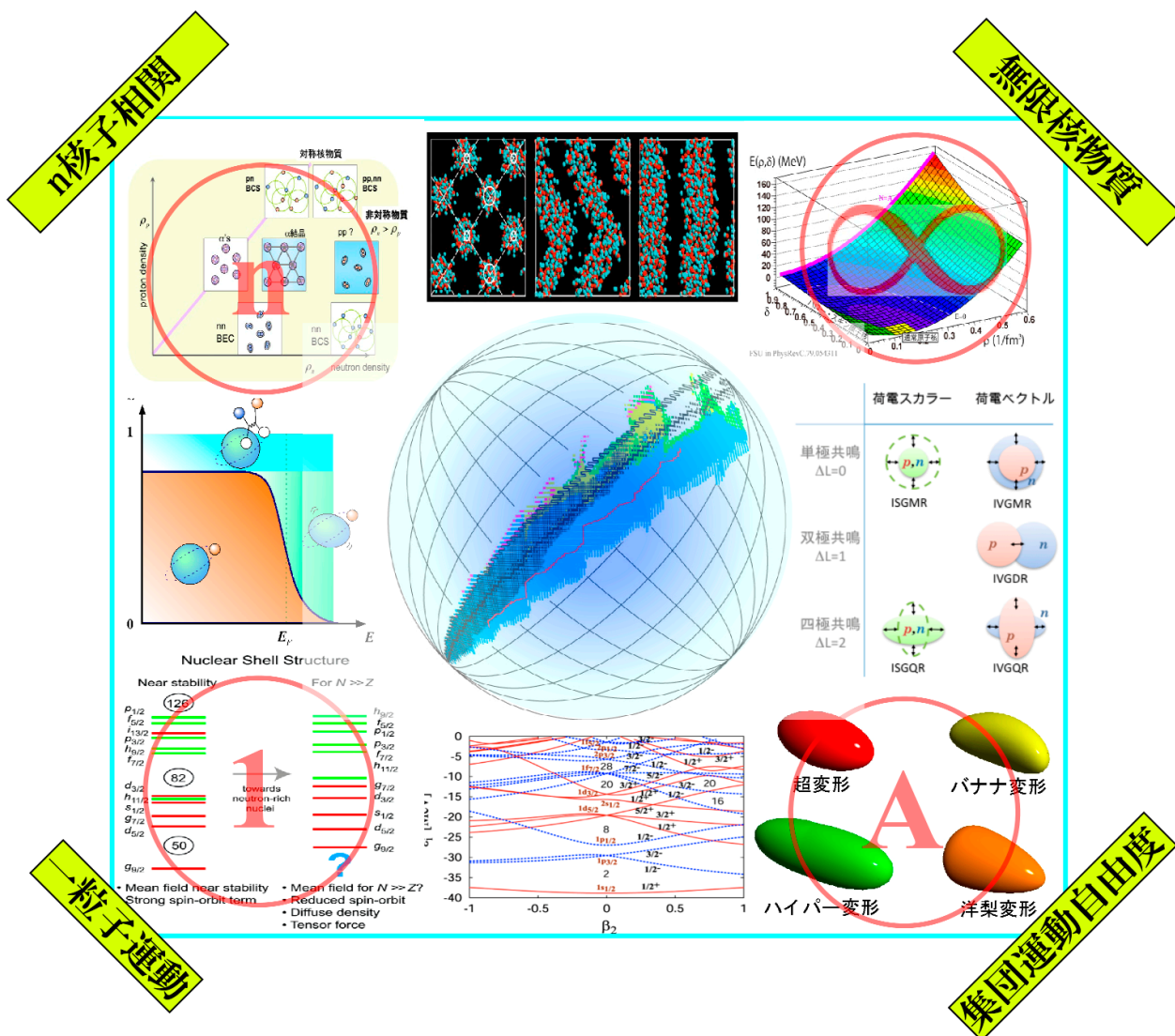


図 2.1.1: 不安定核分野を異なる「視点」から見た概観図。

図 2.1.1 は不安定核分野を各「視点」から見た場合の象徴的なテーマを図で示したものである。存在限界へ向けての挑戦を表した核図表を中心として、一粒子運動、 n 核子相関、変形、状態方程式が四隅に配置してある。背景にある $1, n, A, \infty$ はそれぞれ、関与する自由度を表している。宇

宙核物理では、全体で得られた核物理の理解を駆使して天体の理解に繋げる。

本節では以下に各視点での議論を概要し、2節で各視点から見た研究の概要、最近の進展、今後の計画を考える。3節では他のワーキンググループとの関連、4節と5節で計画のタイムラインとリソースをまとめ、6節でまとめと展望を述べる。

2.1.1.1 不安定核研究の6つの視点とそこでの基本問題

■視点の概説

① 存在限界と基礎量 ——— 未知の原子核の探索 ———

原子核の存在限界はどこにあるのか。どれだけ中性子と陽子のバランスがくずれても束縛されているのか。存在極限で原子核はどのような姿をしているのか。重い原子核の極限はどこにあるのか。人類は如何にすればそこにたどり着けるのか。核図表を拡大させ、新しい領域の原子核の質量や半減期などの基礎量を決めていくことは不安定核研究の基本であり、原子核研究のフロンティアを開拓していくものの使命である。

① 一粒子運動 ——— 魔法数の発現、消失機構の解明 ———

原子核が平均場中の一粒子軌道を独立に運動する核子の集まりであると近似的にみなせることは、複雑な系である原子核に殻構造などの簡明で美しい秩序をもたらしている。これまでの不安定核研究で、この殻構造が大きく変質することが分ってきたのは大きな驚きであった。その後の研究で、この他にも従来の魔法数が安定線から離れた領域で魔法性を失う例が多数見いだされ、また新しい魔法数が現れることも分かってきた。安定線からさらに離れたときに一粒子軌道はどう変化するのだろうか。そもそも殻構造は安定線から遠く離れた領域でも原子核の基本秩序たりうるのだろうか。一粒子軌道が変化するメカニズムを超重核も含めた核図表全域に渡って解明することは、不安定核物理の全領域と関わる最も根本的な課題である。

② n 核子間相関 ——— 新しい原子核相の探索 ———

一粒子運動をしている核子間にも実際には平均場で取り組むことのできない相関が働いており、このことが原子核に多彩な構造をもたらしている。超流動状態やクラスター状態がその例であり、時として核子対やアルファ粒子が構成要素であるかのように振る舞い、核子自由度を凍結する。通常の原子核では個体物理におけるBCS状態のクーパー対に似ていた核子対が、低密度ではボース・アインシュタイン凝縮に似た状態に変化するなど、核子間相関は不変ではない。異なる相関の現れた状態、いわば原子核相が、励起エネルギーなど環境の微妙な変化で目まぐるしく変わるという予想もある。陽子数と中性子数が非対称な原子核で、特に弱束縛の環境ではどのような原子核相が現れるのだろうか。相転移を引き起こす機構の理解は、量子多体系である原子核を研究する上で最も興味深い問題の一つである。

③ 変形 ——— エキゾティック変形の探索と変形機構の解明 ———

原子核は孤立した有限多体系であるため表面が存在し、形という概念が生まれる。球対称な系であるにもかかわらず自発的に対称性を破り変形を引き起こし、様々な形状を取ることが理論的には予想されている。しかし、観測されている変形は大部分がプロレート（四重極変形）である。オブレート変形はほとんど知られておらず、空間反転対称性も破るバナナ型やテトラポット型などのエキゾチックな変形はいまだに確実な証拠が見つかっていない。中性子数と陽子数の組み合わせを選ぶことによって、こうした変形状態をとる原子核が存在すると考えられている。

原子核の変形には、形状が安定したいわば古典的な変形だけではなく、いくつかの（時には無数の）異なる形状が重なり合わさったような量子的な変形があることが分かってきた。束縛エネルギーやバレンス核子（価核子）の一粒子軌道を変化させることで、この原子核に特有な変形状態の機構を明らかにすると同時に、これまでにない新しい変形機構を探索したい。

☹ 状態方程式 ——— 中性子物質の状態方程式の解明に向けて ———

無限核子系である核物質の理解は原子核物理の重要なテーマの一つである。マクロスコピックに見た場合に核子多体系はどのような状態方程式に従うのか。中性子過剰な核物質が従う状態方程式、特にその密度依存性はほとんど知られていない。中性子星の構造や超新星爆発のダイナミクスを理解する上でも不可欠な中性子過剰核物質の研究は不安定核物理分野の柱の一つである。

★ 宇宙核物理： ——— 爆発的要素合成シナリオの確立 ———

星の一生は原子核反応によって進行し、その間にエネルギーが放出され、元素が生成される。鉄よりも重い元素の生成には爆発的な天体現象が必要であるが、そのような現象では、短寿命の原子核が関与するため、その解明には不安定核の構造や反応の理解が必須である。我々の宇宙を形作っている元素はいかにして作られたのか。この問題に答えるための鍵の一つを不安定核物理が握っていると言える。

■異なる視点間の関連

上で述べたように、本報告書では不安定核分野を 6 つの視点に分類して研究戦略を議論するが、互いは強く関係しており、本来不可分のものである。核子間の短距離相関やテンソル相関は低励起の一粒子状態を高励起状態と結びつけ、いわゆる分光学的因子のクエンチングを引き起こしているが、この相関が弱束縛核で変化し、ドリップライン近傍核ではクエンチングした分光学的因子が回復しているという示唆がある。二核子間の対相関はクーパー対の凝縮という形で、また、2 体の四重極相関は変形という形で集団性を生むが、不安定核で二体相関が変化することで新しい集団性が生まれるのではないかと考えられている。巨大共鳴はバルクの性質としての状態方程式とともに、一粒子運動、核子間相関の全てに支配されている。このように、視点の間は有機的に結合しており、不安定核に発現する一つの変化がさまざまな形で多体系としての原子核自身に跳ね返り構造全体の変化として波及する。不安定核の物理の難しさであり面白さであろう。

2.1.1.2 現存の施設・検出器の概観

現在国内で不安定核ビームを用いた実験研究を行っている主要な施設について概要を述べる。ここにあげた以外にも、放医研 HIMAC や東北大 CYRIC、京大原子炉など、不安定核研究を行っ

ている施設はあるが、分量の制約から全ての施設をあげることができなかつたことをお詫びする。装置の名称、略称に下線を引いた。次節以降で引用する場合もあるので参照していただきたい。

■理化学研究所・RI ビームファクトリー(RIBF) [Yan07]

新世代 RI ビーム施設として世界に先駆けて 2007 年に稼働を開始し、現在ビーム強度で世界最高性能を誇る施設である。重イオン加速器群により加速した重イオンの入射核破砕反応や飛行核分裂反応で得られた不安定核を超伝導 RI ビームセパレータ BigRIPS で収集、分離、分析し、二次ビームとして実験に供する。SPIRAL2(仏)、FRIB(米)、FAIR(独)などの新世代 RI 施設が完成し、本格稼働するまでの間、少なくとも 5~10 年間は RIBF がこの分野を牽引していくことになる。

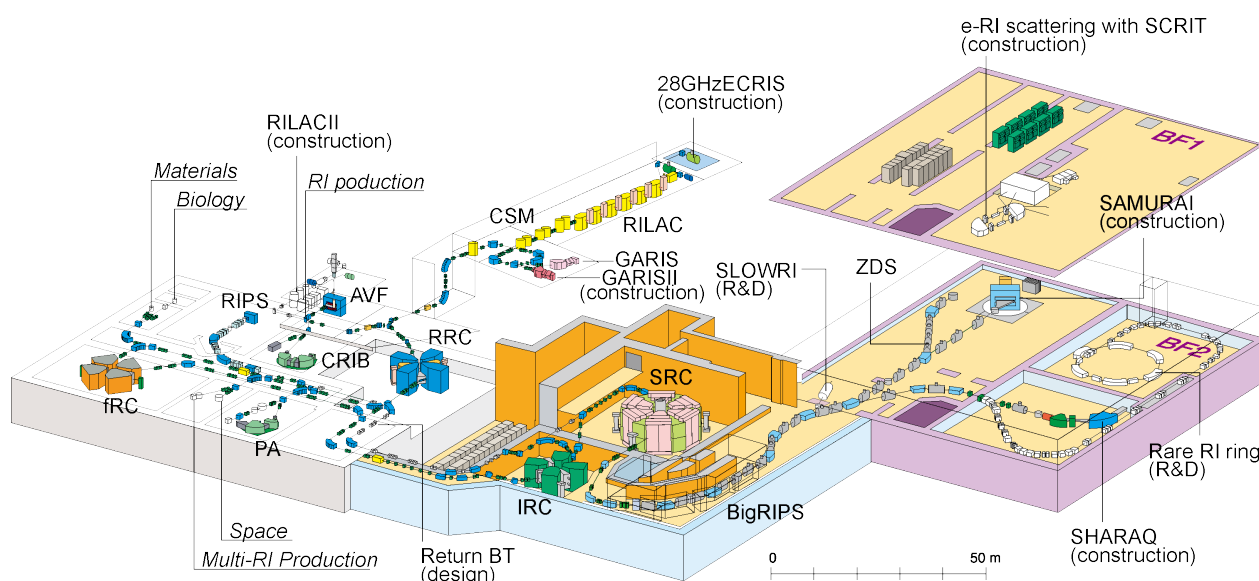


図 2-1-2: RIBF の鳥瞰図。

加速器群は入射用の AVF サイクロトロンと 2 台の線形加速器(RILAC/RILAC2)、常伝導リングサイクロトロン 3 台(RRC, fRC, IRC)及び超伝導リングサイクロトロン(SRC)からなり、組み合わせを変えて使用することで、水素からウランまで全ての元素のイオンを 345A MeV^1 に加速することができる。ビーム強度の設計性能は $1\mu\text{A}^2$ で、軽い核種(α , ^{18}O など)については既に達成している。BigRIPS は大きな角度アクセプタンス($80\text{mrad(H)} \times 100\text{mrad(V)}$)と運動量アクセプタンス(6%)を持ち、ウランの核分裂片を数 10%もの効率で収集することができるため、強い一次ビームと相まって、得られる不安定核ビームの種類と強度は世界を凌駕している。

RIBF には大型の実験装置として以下のものがある。

a. ZeroDegree スペクトロメータ

不安定核ビームと二次標的との二次反応で生成された二次反応生成核を分析するための磁気スペクトロメータ。インビーム γ 線分光など、主として束縛状態の研究に使われる。

¹ Ar 程度までの軽い粒子は 440A MeV まで加速できる。

² Particle micro Ampere; ビーム電流を加速粒子の電荷数で割ったもので、イオンの種類によらず単位時間当たりの粒子数に比例する。 $1\mu\text{A} = (1\mu\text{C/s})/e \sim 6 \times 10^{12} \text{ counts/s}$ 。

b. SAMURAI スペクトロメータ

二次反応によって生成された複数の粒子(重イオン、陽子、中性子など)を同時に分析するための大口径スペクトロメータ。分解反応やロックアウト反応などによる非束縛状態を対象とした実験を行う。

c. 高分解能スペクトロメータ SHARAQ³[Ues12]

高分解能ビームラインと組み合わせることで運動量分散整合を行い、不安定核ビームでありながら高分解能を達成する。ビームとして供給される不安定核の構造を調べるという従来の手法だけでなく、不安定核ビームをプローブとして安定核を励起し、これまでに到達できなかった励起モードを探索するという新しい方向への研究展開も行っている。

d. SLOWRI

高エネルギーで生成された RI ビームをガス中で減速し冷却する装置。RF イオンガイドを世界で初めて導入することで、減速冷却収集の効率を劇的に向上させた。標的破碎型(核分裂も含む)の ISOL と違い、化学的な過程を用いないため、汎用性が高い。汎用の低速 RI 源として有望で、再加速型の RI 施設への発展計画もある。

e. 希少 RI リング

不安定核を蓄積するためのリングで、質量測定や β 崩壊半減期測定を主眼としている。安定線から遠く離れた希少な核を 1 つずつ蓄積し、周回するイオンからの信号を検出することで質量測定や崩壊事象の同定を行う。稀にしか生成できない安定線から遠く離れた超不安定を一つずつ蓄積するという新しい着想に基づく装置である。

f. CRIB³

AVF サイクロトロンからの 104MeV 程度の重イオンビームをもとに、核子移行反応などで生成した不安定核ビームが得られる。宇宙核物理研究に適したエネルギー領域で、CNO サイクルなどに関わる核反応研究が行われている。

g. 自己束縛不安定核標的 SCRIT [Wak04]

不安定核研究の大きな夢の一つである電子散乱を実現するための装置。電子蓄積リングのビームに沿って不安定核イオンを注入すると、イオンが電子ビームの負電荷によって蓄積されると同時に散乱標的ともなることを利用した革新的な装置である。安定核での散乱測定は実証されており、不安定核の散乱実験も近いうちに実現する見込みである。

h. 気体充填型反跳核分離装置 GARIS/GARIS2

核融合反応によって生成された低エネルギー重イオンを分離するための磁気分析装置。ガスを充填することにより、反応標的で生成された重イオンを、その価数に依らず収集が可能で、高い収集効率を実現している。113 番元素の合成が行われたことで有名である。

■大阪大学・核物理研究センター(RCNP)・サイクロトロン施設・EN コース[Mit96]

5~304MeV というユニークなエネルギー領域の比較的高品質な不安定核ビームが得られる。入射核破碎反応や飛行核分裂に基づく RI ビーム施設は高エネルギー化の方向にある一方、ISOL⁴再

³ SHARAQ と CRIB は東大 CNS と理研の共同事業である。

⁴ Isotope Separator On-Line。高エネルギーの陽子や中性子、電子などを標的に照射し、スプレーション反応や核分裂反応などで標的中に生成した不安定核を反跳エネルギーや熱運動を利用して取り出す方法。

加速型の施設は現在のところ数 AMeV にとどまっている。EN コースでは、その間隙にあるビームエネルギーを生かし、核子移行反応など安定核研究で確立された核構造研究の手法を適用した特徴的な研究が推進されている。

■高エネルギー加速器研究機構・TRIAC

ISOL 型再加速型のパイロット施設として ISOL イオン源、荷電増幅装置、線形加速器の開発研究が行われ、1.14MeV までの不安定核ビーム加速に成功した。ECR 荷電増幅器による荷電増幅は世界で初めての成果である。2005 年から 2011 年の間、全国共同利用に供され、核物理および物性研究が行われた。荷電増幅装置、線形加速器は韓国の KAERI へ委譲され、当地での RIB 施設計画 KoRIA のテスト機としてさらなる技術開発に供される。

■日本原子力研究開発機構

世界最大級のタンデム（最高約 19MV）と超伝導ブースターとの複合加速器により、陽子からビスマスまで 50 種以上の元素を、10MeV~1GeV までの連続エネルギーで加速でき、しかも核燃料・RI 標的を照射できる世界的に見てもユニークな実験環境を有する。これにより、重・超重元素領域の原子核反応や超変形状態等の原子核構造などの先端的な研究をはじめ、アクチノイド原子核の核分光実験や核分裂実験、代理反応による未知原子核の核データ測定が進められている。

2.1.1.3 新しい施設・検出器の建設の提案

2.1.1.1 節に述べたことを実現するために以下の施設の新設、更新を提案する。ここでは項目をあげるだけにとどめ、必要性および必要性能については次節で詳しく述べることにする。

A. 不安定核ビームの増強

1. RIBF での高エネルギー不安定核ビームの増強

一次ビーム強度の増強 (2017 年)

ISOL 又は SLOWRI を新設し、RI の再加速とその再破碎による RI ビーム生成 (2025 年)

2. 低エネルギー大強度不安定核ビームの開発

RIBF での Energy degraded beam (2012 年)

KISS による r 過程第 3 ピーク核の生成 (2012~2015 年)

ISOL / SLOWRI による低速(~10keV)ビーム (2015~2025 年)

ISOL / SLOWRI から再加速した大強度で良質な低エネルギー不安定核ビーム (2020 年)

B. 検出器/大型実験装置

1. 大型 γ 線検出器の新設

4 π LaBr₃ 検出器アレイ (2020 年)、4 π Ge 検出器アレイ (2025 年)、

2. 大型アクティブ標的の新設 (2015~2020 年)

3. 稀少 RI リングのアップグレード (2020 年)

4. SCRIT アップグレード (2030 年)

イオン化した後に、質量分離や再加速を行うことも多い。元素ごとに取り出しとイオン化の方法を最適化する必要があるなど高い技術を要するが、質のいいビームが得られる。

2.1.2.1 存在限界と基礎量

— 原子核の存在限界はどこまで広がっているのか？

■概要

今まで到達できなかった核図表領域の奥深くで原子核は存在できるのか、存在できたとして、どのような姿をしているのであろうか。こうした疑問を探求するという、自然科学研究の最も根源的なアプローチで不安定核の物理に挑む。自然は人間の想像力を遥かに超えており、未踏の地 Terra Incognita には我々が考えもしなかった驚きが必ず待っているはずである。

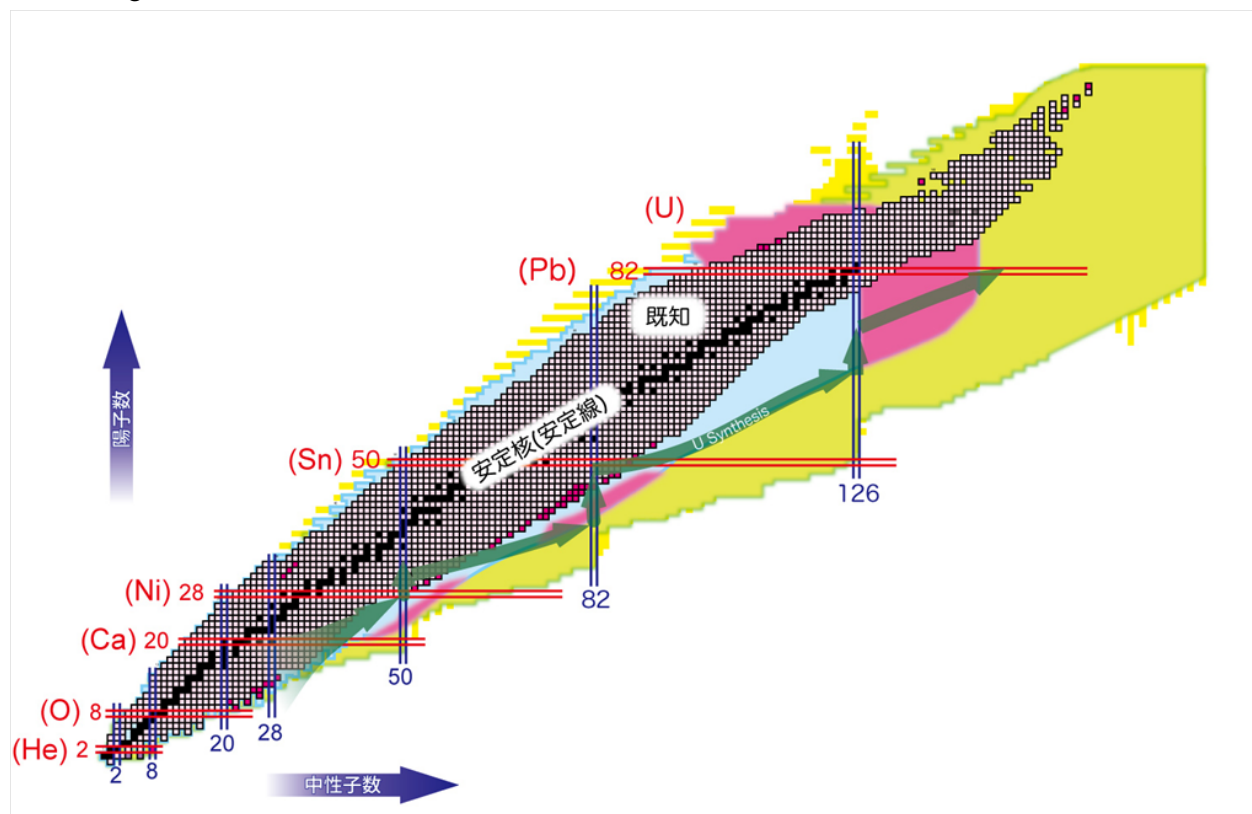


図 2.1.3: 核図表。黒が安定核、黒枠が既知核。赤が RIBF で発見された原子核。鶯色の範囲が KTUY 質量公式[Kou05]で予想される束縛核の領域。

原子核の「不安定さ」を表す指標には、安定線からの距離のほか、フェルミ面のずれ、中性子分離エネルギーなど様々なものがあり、それぞれ、質的に異なる構造変化を引き起こすと考えるべきである。比較的軽い原子核ではドリップラインに到達することが可能で、その外側の非束縛の原子核を共鳴状態として生成することすらできるため、弱束縛に起因する特殊構造の格好の研究の場である。Ca同位体中性子ドリップライン近傍では、かなり多数の中性子が弱束縛の一粒軌道を運動していると考えられており、低密度環境での核子系に特有の新しい構造が現れるかもしれない。地上で中性子物質の性質を調べるのに理想的な環境でもある。一方、ある程度重い原子核の場合、バレンス核子が様々な一粒軌道を占める長い同位体鎖に沿って構造の変化をみることができる。例えばSn同位体($Z=50$)の場合には ^{98}Sn から ^{140}Sn 程度まで、中性子数を40以上に

も渡って変化させて実験研究ができる。広い範囲にわたって中性子数を変化させた時に陽子軌道はどのように振る舞うのであろうか。我々の興味は、超重核領域にも広がっている。重い領域で殻構造はどうなっているのか、増え続けるクーロン斥力は核構造にどのような効果を生むのか。原子核の未踏領域への挑戦はさまざまな方向に広がる。

未踏の地への挑戦は原子核としての存在の確認からはじまる。特に軽い領域ではドリップラインに到達することが可能で、その位置の確定は、異常な核構造のシグナルの第一報である。次に、質量や半減期、核半径、偶偶核の第一 2^+ 状態のエネルギーなどの基礎量を測定する。こうした物理量は高効率で測定が行えるため、低いビーム強度でも測定ができうえ、明快な物理的な意味を持つため、異常構造の探索針として優れている。

本章では、中性子過剰核および陽子過剰核についての計画について述べ、超重核探索については節を改めて3.6節で述べる。

■最近の進展

RIBFの前身である理研加速器施設のRIPSフラグメントセパレータでは ^{48}Ca などの入射核破碎反応による新同位元素探索が行われ、二重魔法核であるはずの ^{28}O が存在せず酸素同位体の中性子ドリップラインが $N=16$ である ^{24}O にとどまっていること、それに陽子をつ一つつけるだけで、ドリップラインが少なくとも中性子6個分のびて、 $N=22$ 核の ^{31}F が束縛していることが分った[Sak99]。この特徴的なドリップラインは核構造理論への大きな挑戦となり、テンソル力や三体力の重要性を再認識させることとなった。

RIBFの稼働によって、到達できる原子核領域が劇的に広がった。インフライト型の不安定核ビームラインBigRIPSにより、入射核破碎反応や飛行核分裂で不安定核を効率よく生成できる世界を圧倒的に凌駕する施設である。ウランの核分裂では、念願であった r 過程核にいよいよ手が届くようになった。これまでに、 r 過程核を含む47個の新同位元素を生成・確認した。18個の原子核で新たに測定した β 崩壊半減期は従来理論で推定されていたよりも短く、 r 過程のシナリオに影響を及ぼす可能性がある。崩壊 γ 線測定では、低励起状態の励起エネルギーを決定したのに加え、 ^{108}Zr にアイソマー状態が見つかり、四面体変形が発現した可能性との関係など活発な議論が始まっている。

■今後の計画(10年)

原子核の存在限界を追求するためには、安定線から遠い原子核をなるべく効率よく作る方法を開発することが肝要である。その点で世界最高の能力を誇るRIBFにおいて、さらに広い質量領域と広いエネルギー領域に渡って最適なビーム生成方法を開拓していく。

質量数100程度以下の核は当面は従来通り入射核破碎反応を使うことになる。中性子過剰不安定核の生成には一次ビームとして安定核の中でも比較的中性子過剰な ^{18}O , ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{86}Kr を、陽子過剰不安定核には陽子過剰な ^{76}Kr , ^{124}Xe を用いることで、それぞれ得意とする領域をカバーする。まずは一次ビームを目標である $1\mu\text{A}$ の強度で得ることを目指す。

並行して post-RIBF 計画として現在検討が進んでいるアップグレードを推進する(図 2.1.4)。post-RIBF 計画とは、a) fRC の改造によりウランビームの大強度化を図る。b) ドライバー用の線形加速器を使った ISOL もしくは SLOWRI を新設し、大量に生成したウランの核分裂片を現存の加速器群に入射する、というものである。

a)は低い荷数のウランを加速できるように fRC を改造することで、従来直前にあった荷電変換膜を使用せずに加速を行うというものである。荷電変換によるビームのロス、荷電交換膜を通過する際のビームの質の劣化、荷電交換膜の寿命問題を解決し、大強度化、長期安定化が実現する。ウランの飛行核分裂は質量数 80 から 160 領域の中性子過剰核の生成に威力を発揮し、その領域の核図表を大きく広げる。 r 過程核もこの領域に含まれており、100 近くの新しい r 過程核の存在の確定、半減期測定などが実現するはずである。

b)により、0~345A MeV の不安定核ビームを安定核一次ビームと同じエミッタンスで得ることができる。直接使うことで、質の良い不安定核実験ができるだけでなく、再度入射核破砕反応を起こすことで、さらに中性子過剰な核を作ることにもできる。 ^{94}Kr の破砕反応では Ar 程度までの中性子ドリップラインに到達することを目指す。

さらに重い質量数 200 近傍の中性子過剰核を得るために多核子移行反応を利用する KISS 計画が KEK グループにより推進されている。KISS 計画については 3.7 節のコラムで詳しく述べる。

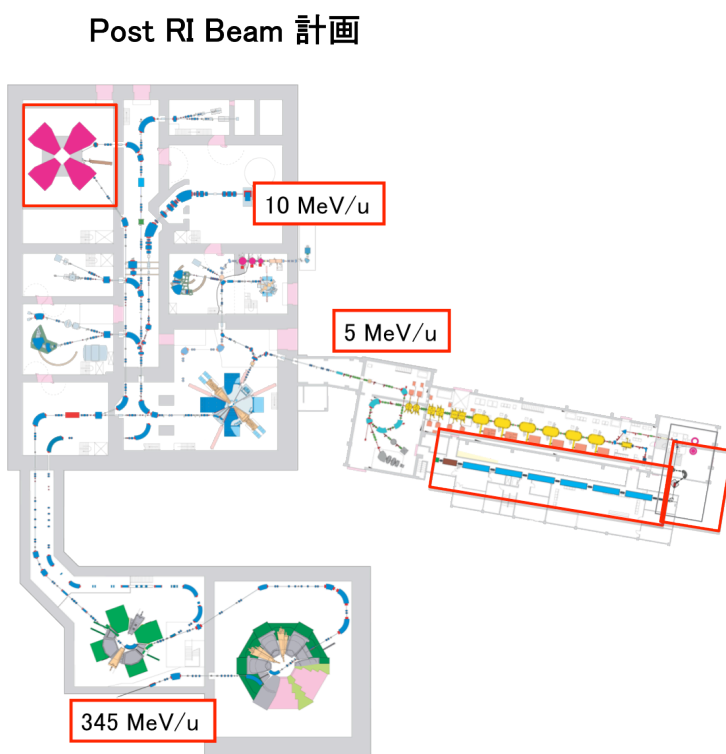


図 2.1.4: post-RIBF 計画

2.1.2.2 一粒子運動

—殻構造は安定線から離れた領域でも原子核の基本構造たりうるのか?

■概要

強い相互作用という極めて複雑な相互作用によって核子が自己束縛した系という一見手に負えないようにも思える原子核を、一粒子運動する核子の集まりというモデルで記述するという試みは、原子核の理解を大きく進展させることになった。Mayer と Jensen による強いスピン軌道結合の導入以来、殻模型が広い領域に渡って原子核の記述に成功を納めてきたのは、この描象の正当性を裏付けている。質量測定や中性子捕獲反応、核子移行反応などを用いた安定核の研究の結果、一粒子軌道に関する理解はほぼ完成されたと思われていたが、1990年代から精力的に行われた不安定核ビーム実験(主にガンマ線分光実験)によってその常識が覆された。

殻形成機構の理解は、魔法数の発見、中性子ドリップラインの位置、超重核領域における「安定性の島」の存在、など原子核の存在限界、存在形態を理解する上で必須のものである。一粒子軌道が変化するメカニズムを核図表全域に渡って解明することは、不安定核物理学の全領域と関わる最も根本的な課題である。

■最近の進展

ガンマ線分光などの実験で明らかになった中性子過剰核における殻構造の変容(殻進化)は、不安定核研究の黎明期におけるハイライトのひとつであり、その後の不安定核研究に多くの研究の種を蒔いた。

^{32}Mg 周辺核で見つかった中性子数 $N=20$ の魔法性喪失は、基底状態にあるはずの中性子閉殻配位と励起

状態にあるはずの2粒子-2空孔配位とが逆転した反転の島(Island-of-Inversion)を形成することが分かった[Mot95, Sor08](図2.1.5)。その後の研究で、魔法性の消失現象は $N=20$ だけに起こる特殊なものではなく、 $N=8$ や $28,40$ においても生じていることが分かった。また逆に $N=16$ [Oza00]や $N=32$ などが中性子過剰領域で新たに魔法性を持つ例も発見された。このように、安定線から離れた領域での殻構造は、従来の研究で明らかになっている安定線近傍とは全く異なる様相を示していることが明らかになってきており、その背後で殻構造を支配するメカニズムの解明に視点が行移している。スピン・アイソスピン依存性をもつテンソル相互作用が原子核を構成する中性子数陽子数比の変化にともなうスピン軌道分裂の変化をもたらし、このことが広い核図表領域で系統的に起こる殻進化の要因の一つである事が分かりつつある[Ots05]。ドリップライン近傍核では価核子の弱束縛性によって一粒子運動が変化するためエネルギー準位が再構成され、殻構造の変化が生まれる[Boh69, Oza00]。殻進化はそれ自体が重要であるだけでなく、ハロー構造や変形の誘発、対相関の変容[Ber91, Mat05]など、安定核にない構造変化と相互に影響を及ぼし合う点でも注目されており、核構造研究に新しい展開をもたらしている。

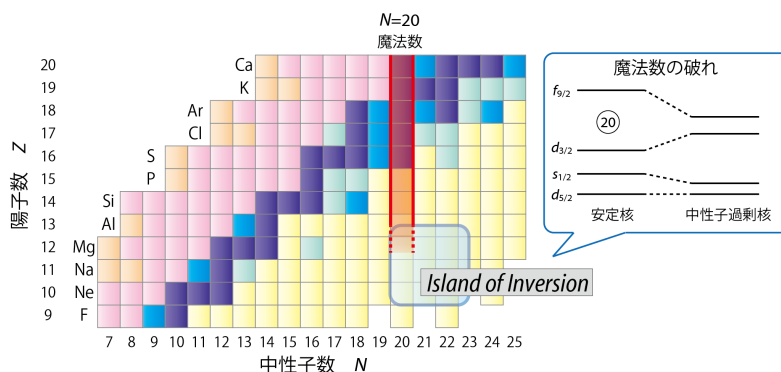


図 2.1.5: Island of Inversion 付近の核図表。

■今後の計画(10年後)

RIBFなどで得られる大強度不安定核ビームを活用した実験により、殻構造変容機構をより統一的に核図表全体で説明する「標準模型」として確立するのが今後10年のゴールである(図2.1.6)。これまでの研究から、急激かつ(おそらく)非単調な殻変化を司る機構の解明が必要であることが明らかになっている。安定線近傍での魔法数形成を内包する「標準模型」確立に向けて、実験と理論の両面から精力を傾ける。その際、軸となるのが、 $Z=28$ (Ni), 50 (Sn)の同位体鎖、 $N=40$, 50 , 82 同調体鎖の研究である。従来の理論で魔法数と考えられていたこれらの核子数が、不安定領域でどのようにふるまうかを調べることを研究の足がかりとする。

質量測定とガンマ線核分光は、今後もこれまで通りアイソスピフロンティアでの異常構造探索手法であり、核構造研究の中心手法である。 ^{78}Ni , ^{132}Sn , $N=40$ 同調体などがここ5年の中心課題となるが、その先 ^{100}Sn , ^{48}Ni , $N=126$ 同調体、超重元素領域に豊かな成果が期待される。この領域にアプローチするためには実験効率を劇的に向上させる新しい装置(高機能標的、SHOGUN(3.4節)など)が必要である。

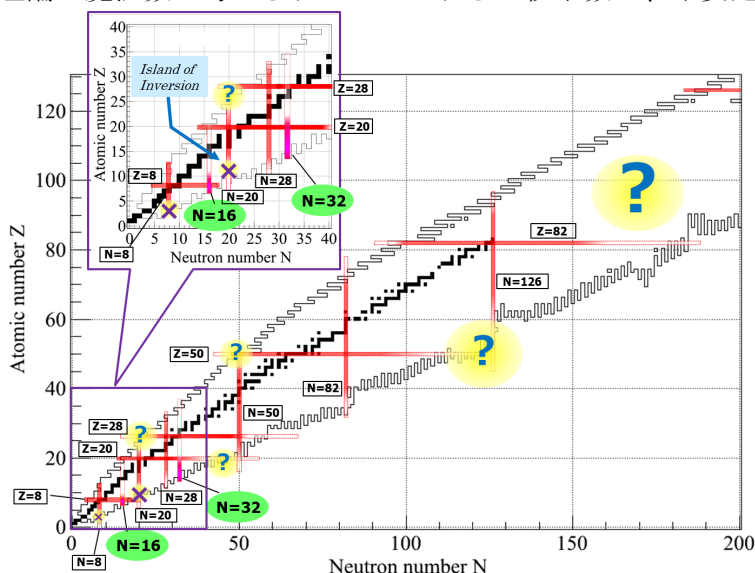


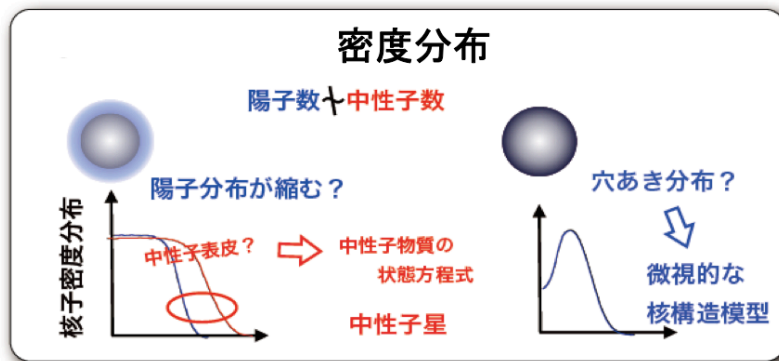
図 2.1.6: 全核図表領域での殻構造の理解。

不安定核の電子散乱 –SCRIT–

不安定核研究の幕開けは、全相互作用断面積から導出された中性子ハロー構造とスキン構造の発見であったが、その当時、半径の増大が本当に中性子のみによるものであるということを実験で直接証明したわけではなかった。現在に至っても、中性子分布半径と陽子分布半径を独立に測定した例は荷電半径がレーザー分光法によって測定されたわずかな核についてのみである。電子散乱が実現すれば電荷分布をモデルによらずに決定でき、相互作用断面積や陽子散乱から得られた密度分布と組み合わせ、中性子分布と陽子分布を独立に決定できる。

SCRIT(Self-Confining RI Ion Target)[Wak04]は電子蓄積リング中に不安定核をトラップし、自動的に電子散乱が測定できる新しい方法で、日本のグループによって発明され、開発が進んでいる。

今後10年間の間に、二重魔法核である ^{132}Sn とその周辺核の電荷密度分布を詳細に測定することを目指している。その後、ルミノシティを二桁以上あげる改造を行えば、非弾性散乱や核子ロックアウト反応へと測定を拡大することができる。



一粒子軌道状態の最も確立した研究手法は、核子移行反応 $[(d,p), (p,d)$ 反応など]である。逆運動学での実験が困難であったためこれまで不安定核に適応された例は少なかったが、アクティブ標的によって実現の道が開かれつつある。核子移行反応に適した10-30 MeV/uの不安定核ビームラインの整備も阪大RCNPで進んでおり、今後10年で飛躍的に発展していくことが期待される。

これらに加えて、核子ノックアウトや核子移行反応などの直接反応実験によって一粒子軌道変容の起源・機構に直接的アプローチする。RIBFでは、そのエネルギーの特徴を十二分に活かした (p,pN) 反応により一粒子ホール状態の分布を直接測定する研究が極めて有効である。東大CNS・理研グループが開発した偏極陽子固体標的と組み合わせることでスピン自由度の活用という新しい軸を実験研究にもたらす。不安定核の電子散乱実験を可能にしたSCRITを将来大規模にアップグレードし、 $(e,e'p)$ などの実験を実現することにも大きな期待が寄せられる。

一方、核モーメントは核配位を純粋に反映するという性質を持つため、核配位に現れる単一粒子状態の異常性の有無や、集団性の発達などを調べるのに適している。特に後者に関しては四重極モーメントが核変形（四重極変形）に高い感度があり、集団性の発達に伴う核変形を調べるのに最適なプローブの一つといえる。これまで用いられてきた核偏極法に加え、最近RIBFで開発された分散整合二段階偏極法や超流動ヘリウム・SLOWRIとレーザー照射を組み合わせる方法により、その適用範囲が大きく広がると期待できる。

以上の実験研究を通じて集積された広い領域での一粒子状態の知見は、「標準理論」に至る道筋を明確に示すはずである。一方理論も、極端に弱束縛な系での量子効果や、テンソル力により媒介される陽子と中性子の相互影響を明らかにすると同時に、三核子力の寄与などを明示的に取り扱った、より統一的な解明に向けて進んでいる。2.8章で述べる京などの先端計算機を用いた大規模計算による進展も期待され、「殻構造は安定線から離れた領域でも原子核の基本構造たりうるのか?」という根本問題に対して、この10年で新たな光を当てる事ができると確信している。

■今後の計画(20年後)

ルミノシティの向上は構造研究に質的な変化をもたらす。例えば、ルミノシティが三桁向上すれば、これまでに存在は確認されたものの分光学情報の得られていない超希少核(例えば ^{48}Ni)に対してガンマ線分光が行えるようになり、またガンマ線分光しかなかった核(例えば ^{100}Sn 、 ^{78}Ni)の核反応研究が可能となるなど、研究領域が劇的に拡大する。

内部標的を備えたエネルギー補償型蓄積リング(図 2.1.7)は、ビーム量をそのままルミノシティ増強を可能にする夢の装置である。1~10 mg/cm^2 の内部標的によるエネルギー損失を加速キャビティ(~ 100 kV)により補償することにより、一粒子に対して最大 10^{24} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを実現することを目指す。現在 RIBF に建設が予定されている稀少 RI リングを、将来エネルギー補償型蓄積リングにアップグレードする計画が現在検討されている。

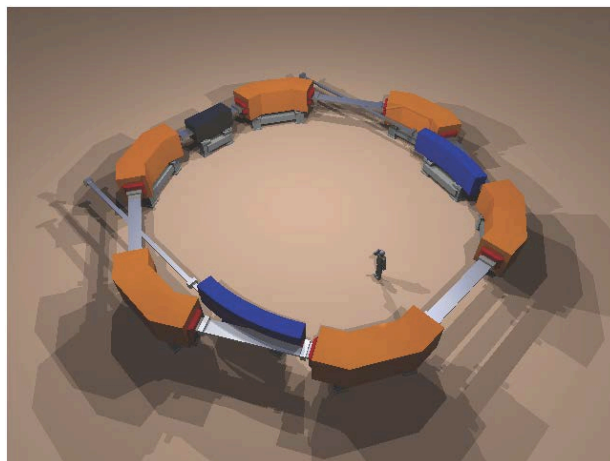


図 2.1.7: エネルギー補償型蓄積リングによる超希少核研究への挑戦。

2.1.2.3 n 核子相関:

—— 核子相関は不安定核に新しい相をもたらすか？

■ 概要

原子核は「核子」多体系であるが、時として強く相関した数個の核子でできた塊(クラスター)があたかもその構成要素のようにふるまう現象が生じる。独立粒子描像に基づく一粒子運動から、強い多核子相関をもつ状態への転換は、いわば原子核の「相転移」であり、原子核に豊かな構造をもたらしている。相関は空間的なものだけでなく、運動量空間や、スピン、アイソスピン空間におけるものなどもある。現れる相とその転移を引き起こす機構の解明は原子核の存在形態を支配する秩序を理解する上での鍵といえる。

核子間相関の重要性は安定核研究で大いに認識されているが、不安定核では、質的に異なる相関が現れ、核構造研究に新しい展開をもたらすと期待できる(図2.1.8)。例えば、最も基本的な相関である対相関は、安定核では運動量空間上で相関したBCS様の超流動状態を生みだすが、中性子過剰核の外縁部に現れるような低密度状態では空間的な相関に転換し、

中性子対がボース・アインシュタイン凝縮した状態に変化する可能性が指摘されている。このような状態が見つかれば低密度核物質の性質の理解や新現象の発見に新たな進展を与えるであろう。また、4体の相関によって現れた α クラスター状態は、余剰中性子を付加すると、分子状態やイオン状態を形作りさらに安定化する。 α クラスターの数が増えれば、結晶に対応する状態が現れる可能性があるなど、原子核の相図は一層多様化する。

核子系で忘れてはならない相関にテンソル相関がある。テンソル力は核力の主要な部分を占めるにもかかわらず、取り扱いが難しいため中心力やスピン・軌道力に頼り込むことで直接的な取り扱いが避けられてきた。最近になって実験理論両面の進歩により正面から取り組む機運が高まっており、様々な角度からの研究が活発化している。テンソル相関は同じ軌道をとる中性子と陽子間で最も強く働くため、軽い核では安定線($N \sim Z$)から離れることで減少する効果として顕在化すると考えられ、不安定核研究に大きな期待がかかっている。

相関に関する重要な課題に変形現象があるが、大きなテーマであるため、節を分けて述べる。

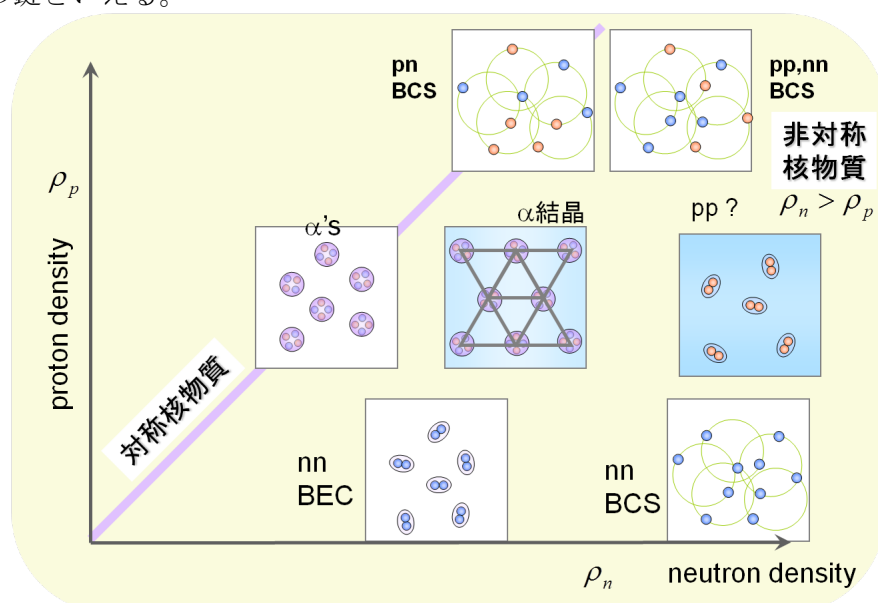


図2.1.8: 中性子数と陽子数の変化によって出現する多様な原子核相。

■最近の進展

低密度状況で二中性子の空間的局在化（ダイニュートロン相関）が増大する可能性が指摘され、注目されている。例えばハロー原子核である ^{11}Li において弱く束縛された余剰中性子が強い空間的な相関をもつことが理論的に指摘されている[Ber91, Mat05]。 ^{11}Li のクーロン励起で得られている、低励起エネルギーに現れる強い電気双極子(E1)強度(ソフトダイポールモード)や低い相対運動量を持つ中性子対の存在はその証であると考えられている(図2.1.9参照)。

4核子相関に関しては、 ^{12}C や ^{16}O の励起状態に α クラスター気体という現象が予言され、理論・実験の両面で解明が進められている。この現象は、密度の低い環境下で4核子相関の極限的状況として実現しうる α 凝縮相と関連しており、核子多体系の新しい存在様式として重要な意義をもつ。その他にも、中性子過剰核での分子的構造など、顕著な多核子相関をもつ現象が様々な不安定核で発見されてきた。

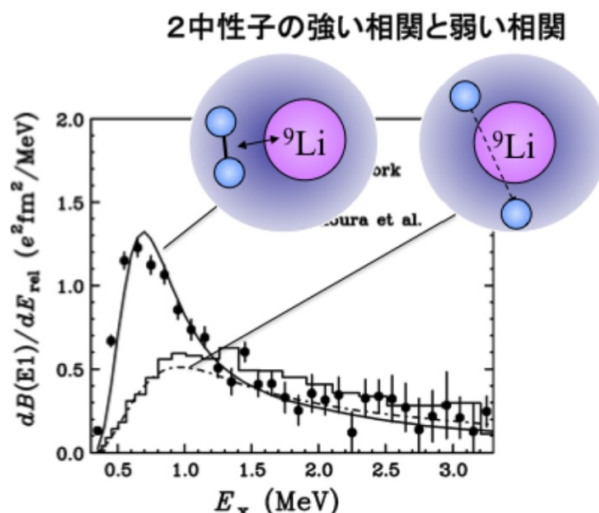


図 2.1.9: ^{11}Li のクーロン分解反応で得られた電気双極子(E1)遷移強度とハロー中性子の空間的な相関 [NAK06]。

ダイニュートロン相関と α 凝縮

粒子間力の弱いフェルミオン系では低温下でBCS相が出現するが、粒子間力が強く対の大きさが、核全体で平均した核子間距離と比べて十分小さくなると、一つの対があたかもボース粒子として振る舞い、ゼロ運動量状態に凝縮したボース・アインシュタイン凝縮(BEC)に転じると考えられている(BCS-BECクロスオーバー)。このようなBEC状態はフェルミオン系での新しい存在様式として興味を集めており、冷却原子系などで研究が進んでいる。

原子核の場合、核子間力は変化しないが、密度の変化で相関の強さが変化するため、低密度状態で同様の相変化が生じる可能性がある。安定核での核子間相関は、多くの場合 nn や pp などアイソスピン1の弱結合の対相関で、核子対が原子核の大きさほどに広がったBCSタイプの超流動状態をとっている。この相関は、密度が低下するにつれて、空間的に強く相関したBEC様の相関に転移するはずである[Ber91, Mat05]。中性子過剰核で発達する中性子スキンやハローはまさにこのような低密度環境であり、2中性子ハロー核である ^{11}Li に一つの中性子対が空間的に相関したダイニュートロン構造が見つかった。重い中性子ドリップライン近傍核では多数のダイニュートロンが凝縮したBEC相がある可能性が高く、その観測は今後の大きな課題である。

原子核におけるもう一つの重要な相関である α クラスターも低密度ではBEC相を生みだし、 α 粒子がボース凝縮した α 凝縮状態を作り出すであろう。最近安定核の研究が進み、 ^{12}C や ^{16}O に α 気体状態と考えられる励起状態が見つかっており[Toh01]、 α 凝縮と関連した状態として白熱した議論が展開されている。この延長線上にある重い na 核、例えば ^{100}Sn には、非常に多くの α 粒子が凝縮した状態があるかもしれない。

短距離斥力とテンソル相関

短距離相関やテンソル相関は最も強く、かつ、全ての原子核に存在するはずの相関である。これまで、理論上の困難さから、中心力、スピン・軌道力及び密度依存力に繰り返り込んで記述され、実験データの解釈において一定の成功を収めてきた。しかし、本来短距離力やテンソル力は中心力やスピン軌道力の形で一体場に繰り返り込めるものではないはずで、実際、最近の中性子過剰核の研究からはこのアプローチでは説明できない事象が見つかってきている。今後の十年間、短距離斥力・テンソル力を陽に扱うことで核構造や反応を自然に記述し、実験で検証することが重要な課題となる。

テンソル相関は核内に重陽子様相関(スピン1、アイソスピン0の pn 対が異なる角運動量状態で混合する。図2.1.10参照。)を誘起する。そのため、分光学的因子のクエンチング問題、 pn 対相関や中性子星で生じるパイオン凝縮相の構造に大きな影響を与えるなど、広い領域の研究と密接に関連している。

核子間に働く短距離斥力及びテンソル力は、高い運動量を持った2核子が総運動量ゼロに組んだ対を原子核内にもたらす。最近、JLABやBrookhavenにおいて、 $(e,e'pN)$ [Sub08]や (p,ppN) [Pia06]反応を用いた実験が精力的に行われ、高運動量を持った pn 、 pp 対の測定から原子核内の核子間短距離相関及びテンソル相関について議論が展開されている。今後、RCNPでは、200~400 MeVの陽子ビーム及び偏極陽子ビームを用いた (p,pN) 、 (p,dN) 反応、また、RIBFでは、200~300 MeV/nucleonの不安定核ビーム及びSCRITを用いた (p,pN) 、 (p,dN) 、 $(e,e'pN)$ 反応等によって、テンソル相関・短距離相関の研究が一層進むと期待できる。

現実的核力から出発する第一原理計算及び短距離斥力・テンソル力を陽に取り扱うUCOM、TOSM等の理論の発展及び上述した実験が短距離相関・テンソル相関への理解を促進し、核構造の物理や中性子星の内部構造・ダイナミクス解明に新たな手掛かりを与えるであろう。

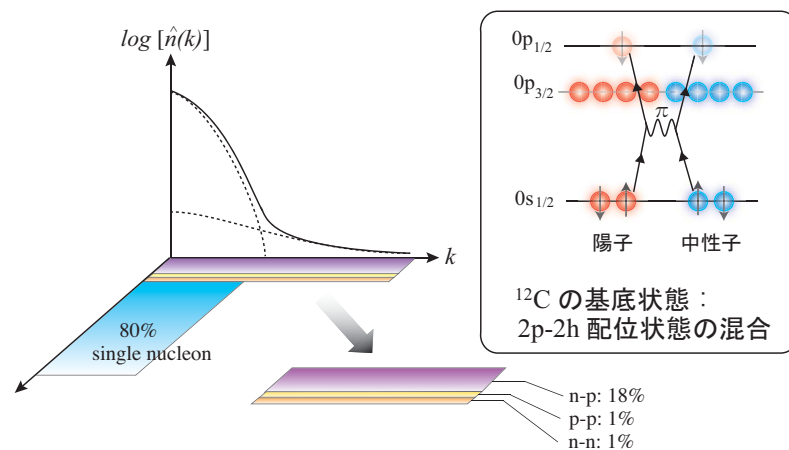


図 2.1.10: 原子核内の一核子の運動量分布並びに一粒子及び核子対の割合。テンソル相関により2粒子-2空孔配位状態が混合する。

■今後の計画（10年）

ダイニュートロン相関を示唆する現象と考えられている低エネルギーE1共鳴や低相対運動量中性子対を中性子過剰度や束縛エネルギーの関数として調べることにより、ダイニュートロン形成のメカニズムの理解を目指す。一方で、ダイニュートロン凝縮が示唆されている中性子スピン・ハローが発達した原子核でのE1共鳴の測定・中性子の運動量相関を見ることも重要である。

二核子移行反応 $[(t,p)$ や (p,t) など]や二核子ノックアウト反応は、対相関の情報より直接反映しており、ダイニュートロン相関のよいプローブである。まずはこのような反応を用いて基礎とな

るデータを十分に取得し、微視的反応理論の発展と相補的に展開することが必要である。実験上は、終状態を決めるのに、反跳粒子を測定する方法と、脱励起 γ 線を測定する方法がある。重い不安定核ビームと p や t などの軽い標的核との散乱は逆運動学条件になるため、散乱角度と Q 値(すなわち励起した状態の励起エネルギー)を精度よく測定するためには前者が有効である一方、後者は標的を厚くできるため、安定線から遠く離れた核を対象とした測定に向いている。

関連に関わる大問題に分光学的因子のクエンチングがある。前節で述べたように、原子核は一粒子運動する核子の集合体と第一近似としてはみなすことができるが、そのように記述できる成分は波動関数の6割程度で、残りの4割は関連によって高運動量成分に散逸していると考えられている。現在までのところこの効果は分光学的因子のクエンチングとして現象論的に扱うにとどまっているが、不安定核での関連の変化を手掛かりに、理解を深化できるであろう。これまでに、弱束縛核ではクエンチングが解消傾向にあるとという示唆もあり[Gad08]、注目が集まっている。

α クラスタと元素合成

不安定核における α クラスタ共鳴状態は超新星爆発やX線バーストなどの高温環境での (α, n) 反応や (α, p) 反応の反応率を増大させる可能性がある。低エネルギーRIビームにより α 共鳴を測定する試みが始められたが、これまでのところ、陽子過剰核側ではCRIBなどで安定線に近い核に対して数例、中性子過剰側では国内外の施設で ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応が測定された程度である。今後、低エネルギーRIビームの大強度化と ${}^4\text{He}$ アクティブ標的の高度化により共鳴状態の探索や反応断面積測定が進展が期待される

■今後の計画(20年)

不安定核ビームに対する核子移行反応の実験を行うためにはアクティブ標的が今後の主流になる。ガス検出器を散乱標的としても使用し、不安定核ビームとの散乱で反跳された粒子をその検出器自身で測定するものである。アクティブ標的は標的中で測定も行うため、散乱角が小さく反跳粒子のエネルギーが低い場合でも検出が可能で、超前方の測定には不可欠である。また、束縛状態も非束縛状態も区別なく測定できる点も大きな利点である。そのため、低励起状態から巨大共鳴までを一度に測定し、角度分布からスピンやパリティの情報を引き出すといった測定で大いに力を発揮する。大型化により標的厚を損なうことなくより低エネルギーの反跳粒子をとまなう超前方測定を実現し、さらに磁場や高エネルギー反跳粒子検出器と組み合わせることにより、高分解能で広い励起エネルギーおよび散乱角度を同時に測定可能な大型アクティブ標的の開発を検討している。

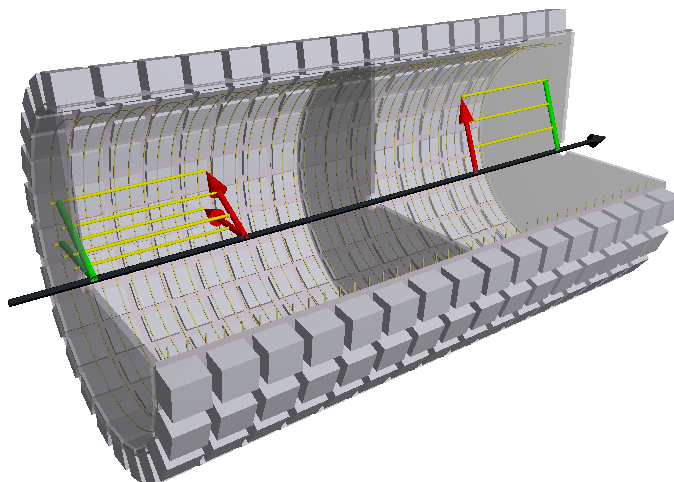


図 2.1.11: 大型アクティブ標的の概念図。

2.1.2.4 変形

—— 自発的対称性の破れは原子核にどのような形を生み出すのか？

■概要

孤立した自己組織化系である原子核は、等方的な空間にあ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い(図2.1.12)。変形の大きさは広範囲にわたり、短軸と長軸の比が1:2の超変形といわれる原子核までもが発見されている[Sin02]。変形した原子核は対称性を取り戻すために回転運動を引き起こし、その回転運動は一粒子運動や表面振動とのカップリング等様々な量子現象の場ともなっている。

変形した原子核は多く見つかっているが、これまでに知られている変形はほとんどがプロレート型の軸対称四重極変形である。理論的にはオブレート型や非軸対称な四重極変形だけでなく、八重極など高次の変形もあるとされているが、軽い核など特殊な例を除いて

実験で確認が得られたものはない。八重極変形は、球対称性だけでなく空間反転対称性をも破る変形で、その対称性を回復するためにアンモニア分子に似たパリティ二重項が現れるはずである。こうした変形を観測しその性質を調べることで、変形をつかさどる機構の本質を理解することを目指す。

原子核の変形に従来の変形概念と異なる「量子的変形」とでもいうべき奇妙な状態があることが分かってきた。原子核を変形させるのは殻効果であり、量子力学の帰結であるが、ひとたび変形が生じ安定化した場合には古典的な物体としての描像が良く成り立つことが多い。このいわば古典的変形に対して、量子的変形とは、ポテンシャル障壁で隔てられた複数の古典的変形が量子効果(量子ゆらぎやトンネル効果)で混合した状態である。数種類の形が混合する「変形混合」や、連続的に変化した形が無数に混合する「ソフト変形」などがある可能性がある。原子核物理の長年の難問である核分裂のダイナミクスを解く鍵ともなると期待している。

■最近の進展

不安定核における変形の研究は殻構造の変遷を調べるという観点で始まった。 ^{32}Mg 周辺核で見つかった変形状態[Mot95]は中性子数 $N=20$ の魔法性が喪失していることを示しており、不安定核で殻構造が変化することを決定づけた実験の一つである。強度が弱く質も悪い不安定核ビームでの実験が成立したのは、実験効率の高いインビームガンマ線核分光法によるクーロン励起を採用したためであり、世界に先んじて立教大学・理研が建設したNaI(Tl)シンチレータで構成された不安定核ビーム用の 4π γ 線検出器DALI/DALI2の大きな成果である。その後、東大CNSが分解能を

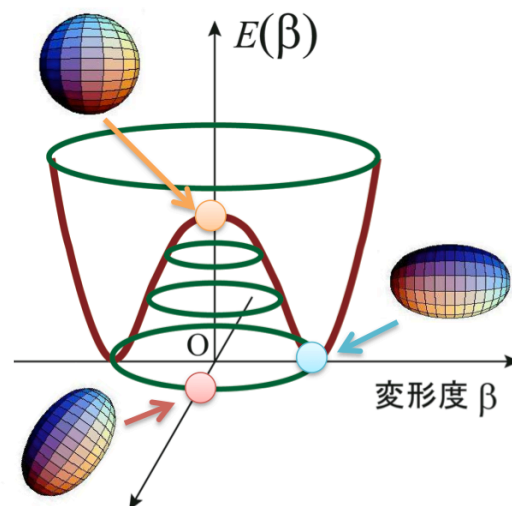


図 2.1.12: 自発的に対称性が破れて変形が発現する。

重視したGe半導体検出器アレイであるGRAPEを建設し[SHI04]、不安定核の殻構造研究の黎明期を支えた。

^{32}Mg 近傍核に関する研究はその後実験理論両面で進展し、この領域の変形は単に $N=20$ の殻間エネルギーが減少したために生じた単純なものではなく、球形の状態と強く変形した状態とを行き来する大振幅振動を伴った、不安定核で新しく発現する機構にともなうソフト変形である可能性が指摘されている[Hin11]。この現象は $N=20$ の殻間エネルギーが絶妙な値をとったために、球形状態と変形状態がほぼ縮退したことに加えて、フェルミ面近傍に $\Delta l=2$ で結ばれる2つの一粒子軌道があること、バレンス中性子軌道が弱束縛であるために一粒子状態、ひいてはそれらの対相関が変化したためであることなどが原因としてあげられている。中性子を2つ加えた ^{34}Mg ではもはやこの条件は満たされず、変形が安定化する。現在は、この研究を広大な核図表に広げ、殻間エネルギーや一粒子軌道の量子数や束縛エネルギーなどに関して様々な条件下での集団性の変化を調べることで、原子核が形状を決める機構を解明する研究が展開されようとしている。

殻進化と変形のInterplay

原子核は、全体が液滴のように振舞うと考える巨視的な描像と、構成粒子である核子が一体場中を一粒子運動していると考えられる微視的な描像との2つの側面を持つ。液滴としての原子核は常に球形を好むが、フェルミ面近傍に位置する核子の一粒子運動およびそこから生まれる相関は、準位密度や軌道の性質に応じて変形を促す。その反対に、変形は一粒子軌道の変化を生むという関係にもあり、原子核の変形は殻構造と表裏一体であるといえる。一粒子軌道の変化は、軌道間の相関に質的な変化をもたらす、プロレート変形、オブレート変形、三軸非対称変形、静的変形、動的変形など、様々な変形状態を誘起することが理論的に指摘されている[Uts12]。殻進化によって揺さぶられる原子核変形を明らかにすることは実験研究の当面の課題の一つである。

原子核の超変形状態は重い質量数領域で核融合反応を用いて研究が進められ、図2.1.13に示すように主として安定線より陽子過剰側で発見された。最近では軽質量数領域での探査が進み質量数40近傍の $N=Z$ 核である ^{40}Ca [Ide01]と ^{36}Ar [Sve00]で、更に中性子過剰側の ^{40}Ar で発見された[Ide10]。 ^{40}Ar の超変形は国内の実験で初めて観測された超変形である。特定の質量数領域に超変形原子核が点在しているという事実は超変形殻構造の存在を示唆しており、中性子過剰領域には更に超変形殻構造に起因した超変形原子核の存在が予言されており、将来の不安定核ビームを用いた研究で中性子過剰原子核での超変形殻構造が明らかになると期待される。

■今後の計画

RIBFにより到達可能な領域が劇的に拡大し、原子核の変形現象の理解を進展させる素地が整いつつある。これにより、研究が新しい局面を迎え、2つの方向で発展が推進されようとしている。

一つはエキゾチックな変形状態の探索である。四重極よりも高次の変形は、回転対称性のみならず空間反転対称性や更にアイソスピン対称性などの破れとも関連しており、その研究を通して「自発的対称性の破れは原子核に新しい形を生み出すのか?」「そもそも原子核はなぜ変形するのか?」という基本的な問いに答えることを目指す。具体的な対象としては、中性子過剰変形核でのバナナ型超変形、テトラヘドラル形や洋ナシ形、三角形の変形の探索が始まっている。

四重極変形であってもこれまで明確な証拠が見つかっていない三軸非対称変形やハイパー変形(短軸-長軸比が1:3)の探索や、オブレート変形核を生成することによるプロレート変形優勢機構の解明も変形現象の統一的理解に至る重要な道筋である。このような変形状態はこれまでは実験で到達できなかったような中性子数と陽子数の組み合わせの原子核に出現すると考えられている。例えば、質量数が150や

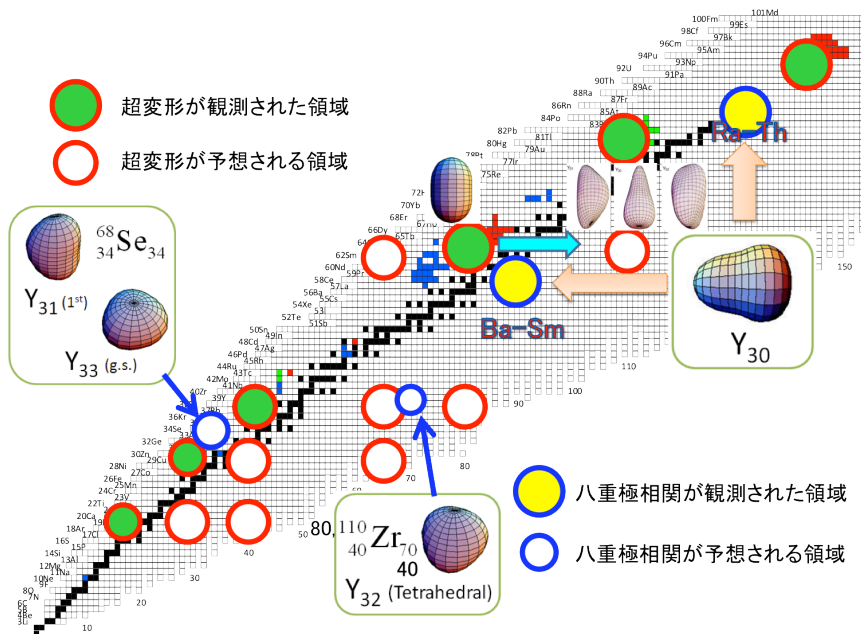


図 2.1.13: 核図表上に現れる様々な変形。

190の領域で見ついている超変形状態に中性子を加えていくと超変形状態に対する不安定度が増し、8つ程度の中性を加えたところでバナナ形の変形状態が現れるという予想がある[Nak92]。こうした原子核を作るためには不安定核を使用した反応が必要で、大強度の低エネルギービームと高感度、高エネルギー分解能のガンマ線検出器によって初めて実験が可能になる。

もう一つの方向性は、量子的変形の解明である。一部の $N=Z$ 核や ^{32}Mg でその可能性が指摘されている量子的変形は、原子核という有限量子多体系に特有な現象であり、原子核物理が発信する新しい“形”の概念である。例えば、陽子過剰核 ^{68}Se はプロレート型とオブレート型が同じ割合で変形共存すると考えられている。量子的変形の解明には、特定の古典的変形を選択的にピックアップする量子操作を原子核に施せばよい。例えば1核子移行反応では、娘核の各状態への分岐比が、各古典的変形への波動関数の収縮を反映する。

実験方法は大きく二つのスタイルに分れる。一つは主として基底状態に現れる変形状態の測定で、非弾性散乱や核子剥離反応など高エネルギーでの反応によって基底状態バンドの励起状態を生成する。断面積は一般に非常に大きいため、 γ 線の検出に際してS/N比は問題にならない、一方で、検出効率さえ高ければ、安定線から遠く離れた極低ビーム強度の不安定核を対象にできる。分解能は中程度でも許容できるが、高い効率の検出器が望ましい。この種の研究は現在DALI2を使用して行っているが LaBr_3 シンチレータなどの分解能の良いシンチレータを使用した 4π アレイへの更新が望ましい。現在SHOGUN計画が検討されており、検出効率でDALI2の2倍、分解能で4倍の能力を持ち、 $\gamma\gamma$ 同時計測感度はDALI2の数十倍にもぼる。

もうひとつは、高励起準位に現れるエキゾチック変形状態の研究である。こうした状態を生成するためには、従来通り低エネルギーでの核融合反応や深部非弾性散乱、多重クーロン励起などが有効であるが、RIBFで生成されるビームエネルギー(200~300MeV)は高すぎる。高エネルギー

ービームを効率よく5-104MeVに減速する技術の開発が進んでおり、ISOLの再加速ビームと相補的な方法として期待が持てる。

奇妙な変形状態に関する γ 線の強度は全体の γ 線強度の1%以下であると考えられており、高分解能、高コンプトン抑制測定でS/N比の向上を図り、多重同時計測解析により、バックグラウンドに深く埋もれた信号を拾い出す必要がある。高分解能・高効率検出器による多重同時計測感度の向上が研究の死命を制するといえ、トラッキング型 4π Ge検出器が理想的である。これが実現すれば、これまで安定核ビームによる超変形研究を強力におしすすめたGammasphereやEuroballと比較しても1000倍にも及ぶ感度を持つため、 10^9 cps程度の一次ビームで行っていた一次ビームでの実験が 10^6 cps程度の二次ビームで行えることになる。

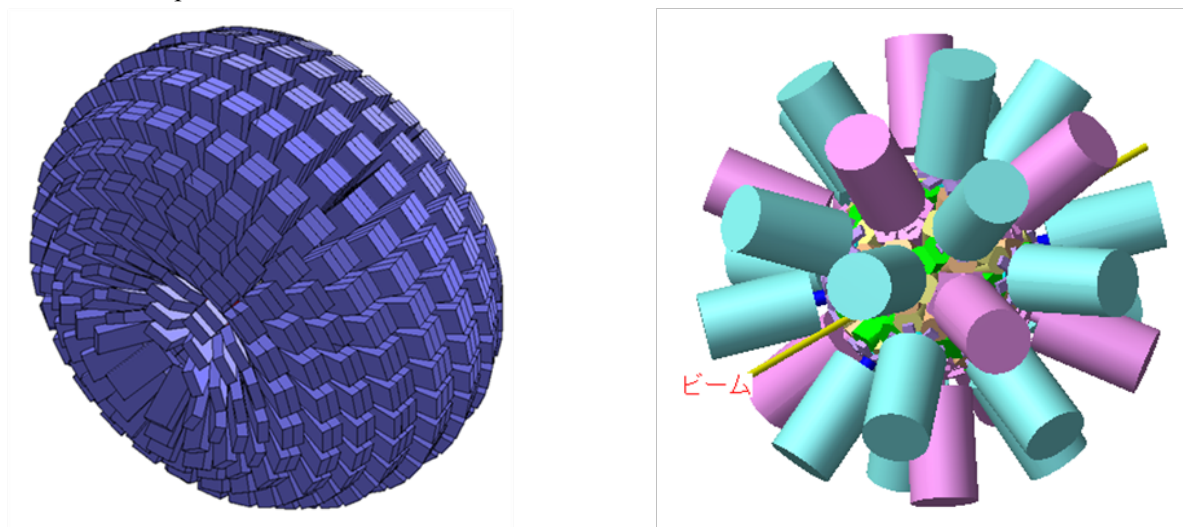
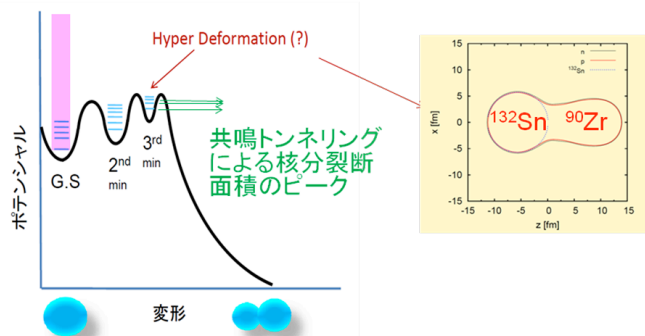


図 2.1.14: (左) SHOGUN (4π LaBr₃ シンチレータ)の構想図。(右)トラッキング型 4π Ge 検出器。

核分裂とハイパー変形

低エネルギー核融合や核分裂は、幅広いレンジの古典的変形が関与する大振幅な量子的変形である。散逸・非平衡系という観点も含め、量子多体系の物理におけるもっともチャレンジングな課題の一つとして研究を深化させる。応用面でも原子炉内の核ダイナミクスの包括的理解や日本における超重元素の合成にも資することをめざす。

一例としてハイパー変形した形状異性体（下図の 2nd minimum）が存在する場合、このポテンシャル中での振動状態と基底状態バンドとの結合により、核分裂閾値以下の励起エネルギーでも核分裂断面積の微細構造が共鳴状態として現れると期待され、ハイパー変形の存在を調べることも可能となる。実験的には J-PARC での大強度中性子を用いた飛行時間分析や、数 keV のエネルギー分解能での (d,p) 反応分析装置などの実験装置で測定可能と考えられる。



2.1.2.5 状態方程式

—— 中性子物質は固いのか?柔らかいのか?

■概要

原子核のバルクとしての性質を考えると、密度(ρ)・中性子陽子非対称度($\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$)・エネルギー(E)・温度(T)の関係を表す式を核物質の状態方程式(Equation of State, 以下EOS)と呼ぶ。EOSの解明は原子核物理全体にかかわる問題で、様々なエネルギー領域で様々な角度から研究が行われている。最近、 $\rho \sim 0$ で高温の状態(図2.1.15の赤い矢印)での研究がRHIC・LHC 加速器を用いて発展し、大きな成果を上げつつある。低エネルギー原子核研究では、 $T \sim 0$ のEOSを対象としており、以下に述べるようにここ10年余、非対称度がほぼゼロの対称核物質についての研究が進み、著しい理解の進展があった。

現在、興味の対象は中性子過剰核物質に移ってきている。核構造の理解のみならず、超新星爆発機構や中性子星の構造を解明する上で本質的に重要であるからである。中性子星は原子核対称度 δ が1に近く、密度 ρ が非常に大きい究極の非対称核物質で、その構造はEOSの対称エネルギーに強く依存している。実験室で δ を1に近い核物質を作ることはできないが、中性子過剰な原子核の反応や構造を通してEOSの情報を引き出す努力が始まっている。

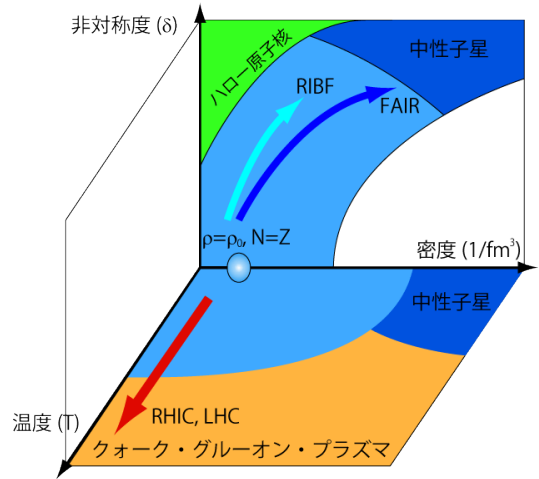


図 2.1.15: 物質相概観図(想像図)。
今後は δ の大きな領域を探索していく。

■最近の進展

$T \sim 0$ での EOS(図 2.1.15 の密度-対称度面) は ρ と δ によって以下の様に記述される。

$E(\rho, T=0, \delta)$
 $= \varepsilon(\rho, \delta=0) + S(\rho) \delta^2$
 このうち、 $\varepsilon(\rho, \delta=0)$ は、飽和密度(0.17 fm^{-3})、飽和束縛エネルギー(核子当り 16 MeV)、荷電スカラー非圧縮率からほぼ確定されている。荷電スカラー

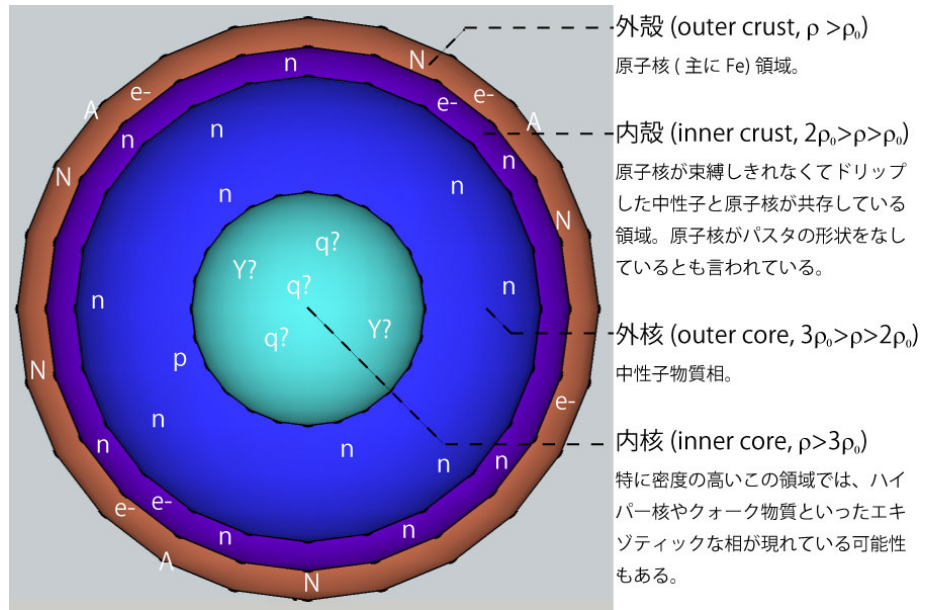


図2.1.16: 中性子星の内部構造の概念図。

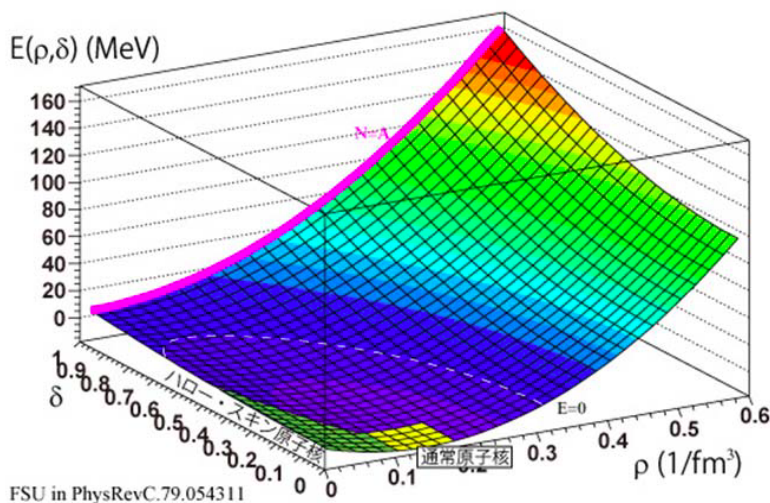


図 2.1.17: 状態方程式の例 [Pie09]。FSU と呼ばれるハイペロン構造を考慮していないもの。 $N=A$ 、 $\rho \gg \rho_0$ の領域については外挿で、不確定性が大きい。

られている情報をもとに構築されるEOSの例を示す。

天体中では実際に核物質の存在が実現していることから、その観測からEOS についての情報を引き出すことができるはずである。質量が太陽の約 2 倍である中性子星(図2.1.18中の J1614-2230)の観測が2010年10月に報告された[Dem10]。この事実は現在考えられているEOSに対し強い制限を与え、特に中性子コアでのハイペロン構造をもつEOSは全て除外される。2 倍太陽質量の中性子星を説明するには、3 体力(NNNはもちろんの事、NNY、NYY)を考慮したEOSの理解がポイントであると考えられている。

■今後の計画(10 年)

究極的には T, ρ, δ 全ての依存性を考慮したEOSの確立が目標であるが、中短期的には対称エネルギー項の確立、長期的には高密度状態下でのハイペロン等新しい自由度の獲得を考慮したEOS の確立が展望される。以上をふまえ、これから将来的に実験研究が望まれる問題を以下にあげる。

1) 核構造研究による EOS の導出

核構造実験で検証可能な密度領域は、核密度の飽和性故に $\rho \sim \rho_0$ 程度か、もしくは中性子スキンやハロー構造に存在する希薄な $\rho < \rho_0$ 領域である。この密度領域で δ を変数とし、EOSの実験研究を進めていくことがこれからの目標とな

一非圧縮率の決定は数十年来の悲願であったが、阪大RCNPでの0度 α 非弾性散乱により信頼できる非圧縮率の値が得られたのはここ10年の大きな成果である。対称核物質に関する結果から、その状態方程式は図2.1.17中の $\delta=0$ ($N=Z$)の線になることが分かっている。一方原子核対称度(δ)に依存する最低次の項である $S(\rho)\delta^2$ 、すなわち対称エネルギーに関しては、研究が着手されたばかりと言ってよく、これからの発展が期待される。図2.1.17に現在得

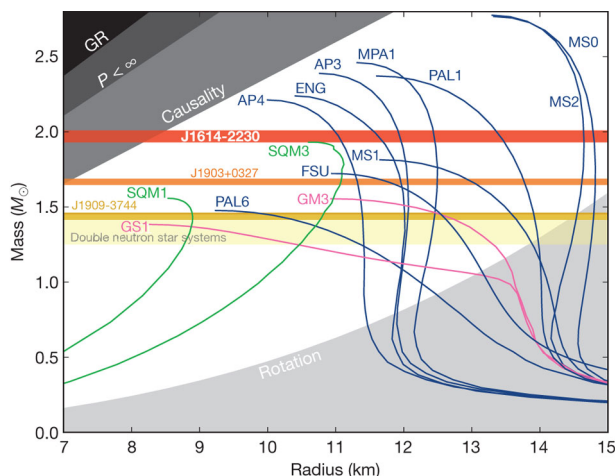


図2.1.18: 様々なEOSが予想する中性子星の質量と半径。青い線が中性子のみの場合、紫の線がハイペロン構造を考慮した場合、緑色の線が内部構造がクォークの場合を示す。[Dem10]

る。核構造研究にてEOS を決定していく上で主な観測対象は原子核の巨大共鳴状態である。これまでで $\delta \sim 0$ 原子核の共鳴状態の測定からEOSに対し、一次的制限を与えた。これをふまえ、次の短期・中期的なステップとして超中性子過剰核領域での共鳴状態の実験研究が展望される。特に、Pigmy双極子共鳴(PDR)や、中性子過剰核のモノポール巨大共鳴(GMR)は、 $\delta > 0$ 領域でのEOS を確立していく為に重要で、今後実験研究を推進していくべきである。

長期的にはより多くの中性子が関与した(擬)中性子物質の研究が望まれる。Ca同位体のドリップライン付近では多数の中性子がハローもしくはスキン構造を成している可能性があり、 $\delta > 0$ 領域でのEOS研究の格好の場となるかもしれない。ウランもしくはそれより重い超重原子核における核半径や中性子スキン厚の決定も実験における課題にあげられる。

2) 重イオン衝突実験による $\delta > 0$, $\rho \neq \rho_0$ 領域の実験的 EOS の導出

近年理研RIBFで高輝度RIビームの生成が可能となり、RIを用いた重イオン衝突実験に手が届きつつある。超新星爆発過程の計算で仮定されている $\delta = 0.25 \sim 0.35$, $\rho \sim 2\rho_0$ にも到達可能で、超新星爆発過程に重要な知見を与えると期待している。RIBF での代表的な重イオン衝突実験プログラムとしてSAMURAI-TPC計画が進行している(2014年実験開始予定)。この計画により、重イオン衝突における陽子中性子非対称度、荷電パイオン比、粒子非等方性、アイソスピン拡散が観測され、対称エネルギーに対して強い制限を与えることになる。初段階の実験としては $^{132}\text{Sn}(\delta = 0.24)$ ビームを用いた重RI 衝突実験を考えており、 $\delta > 0$, $\rho \neq \rho_0$ 領域におけるEOS を決定していく。

長期的な展望としては原子核非対称度の大きいRIビーム(例えば $^{78}\text{Ni}(\delta = 0.28)$)を用いた実験、もしくは高エネルギーRIビームによる高密度領域での実験が考えられるが、その為には現行の加速器のアップグレードが必要である。

J-PARCでのハイパー核の研究結果によっては、中性子星の構造を明らかにするために、ハイペロン自由度を考慮したEOSの研究が必要になる可能性がある。中性子星でのコアで実現する様な $\rho > 3\rho_0$ の系ではハイペロンが生成される可能性があり、その場合、高密度領域ではEOS へのハイペロン項の導入が必要になってくる。J-PARC では基礎的なハイペロン相互作用の研究が発展するはずで、その基礎研究を基に新しいEOS が確立していくことが期待されている。ただし中性子過剰な条件でハイペロン自由度を導入した系のEOS を実験で確立していく為にはハイペロン生成に十分なエネルギーをもった中性子過剰核ビームが必要であり、その為にはRIBFの大幅な増強か新しい加速器施設が必要である。

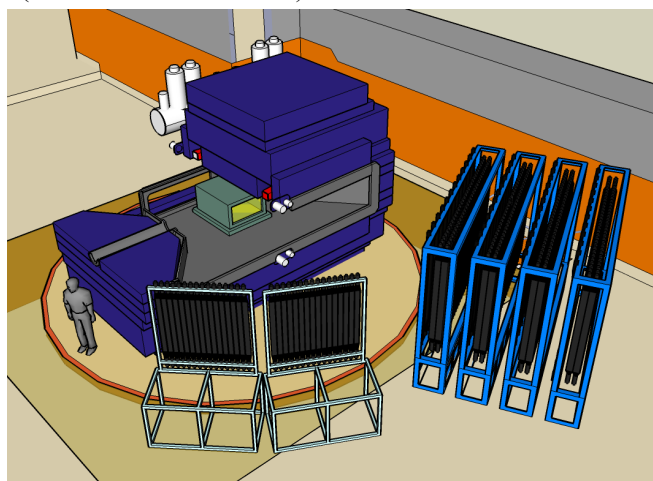


図 2.1.19: RIBF の SAMURAI スペクトロメータ。
中心に緑色で示したのが SAMURAI-TPC。

2.1.2.6 存在限界と基礎量：超重核

— 安定の島は存在するのか？人類はそこに到達し得るのか？

■概要

どこまで重い元素が存在しうるのだろうか。自然界に存在しない重い元素は、これまで原子炉や加速器等を使って人工的に合成されてきた。今日まで原子番号が 113 および 115 番を除き 116 番までが国際的に承認され、112 番までの元素に名前が付けられている。近年、理化学研究所での 113 番元素の合成が報告されており、我が国初の命名権取得に大きな期待がよせられている。

諸外国においては 118 番元素までの合成が報告されているが、理論的には原子核の存在限界は更に大きな原子番号まで広げられていることが予測されている。質量公式の一つである KTUY 公式による予測(図 2.1.20)によれば、陽子数 126 と中性子数 228 に二重閉殻構造があり、比較的寿命の長い“安定の島”が存在する可能性がある。人類が到達しうる最も重い原子核を合成する試み(超重核探索)は、原子核物理学研究における最大の挑戦の一つである。

今後はこの超重核探索を主軸とし、より効率的に合成できる原子核反応の探索や核分裂など崩壊様式の研究を進め、新同位体の合成および原子核構造を明らかにするような超重核領域の総合的な研究を推し進めるべきである。

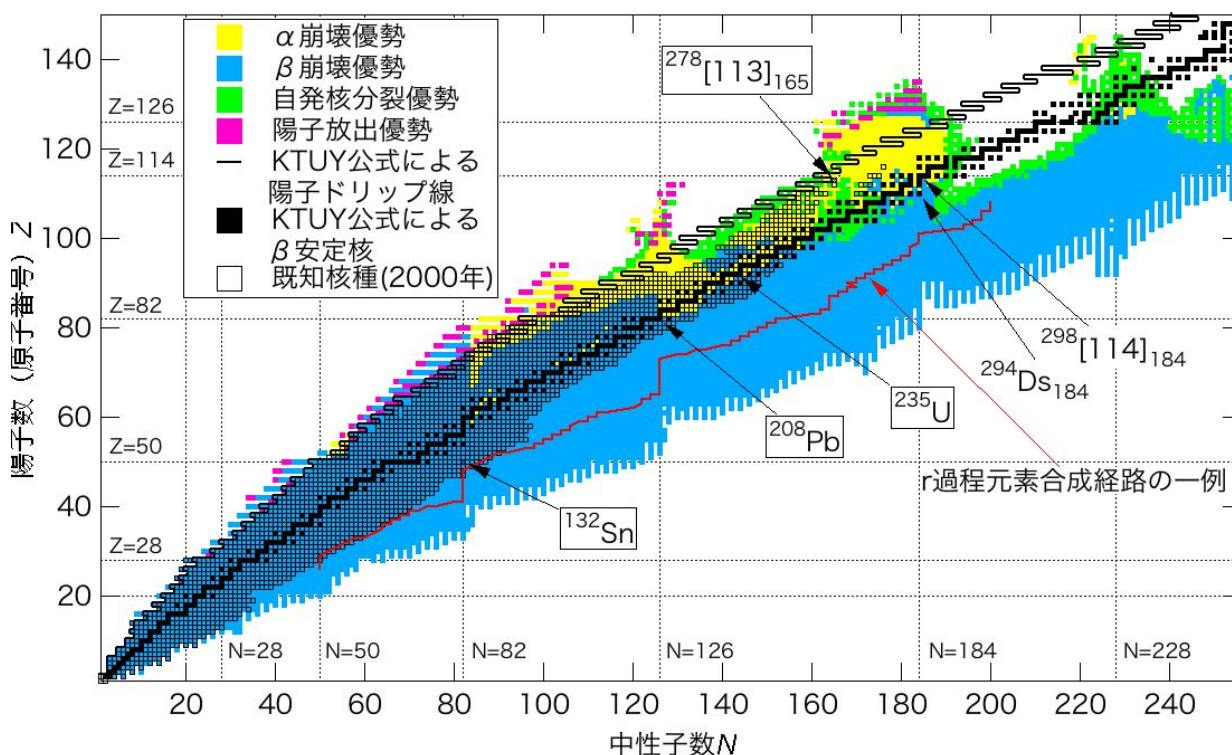


図 2.1.20: KTUY 質量公式による崩壊様式の予想図。

■最近の進展

最近のハイライトはなんとと言っても 2004 年から 2005 年にかけて報告された理研における 113 番元素の合成であろう[Mor04](図 2.1.21)。重イオン線形加速器からの大強度 ^{70}Zn ビームを ^{209}Bi

標的に照射し、融合反応で合成した原子核 $^{278}113$ を気体充填型反跳分離器(GARIS)で分離し、 α 崩壊連鎖が既知核へ到達することをもって原子番号と質量数の両方を実験的に決定した。国内初の元素命名権取得に史上最も近いところにいる。

■今後の計画(10年)

超重核合成反応の精査と実験装置の改良を行い、さらに重い元素の合成を目指す。

現在合成が行われている領域の超重核生成断面積は最大でも $\text{pb}(10^{-12})\sim\text{fb}(10^{-15})$ と極めて小さく、世界最高強度の加速器による数カ月にわたる実験でも、わずかに数個しか合成できない。しかも、ビームエネルギーが最適な値から数%外ただけで核分裂等のチャンネルに逃れてしまうため観測ができなくなる。したがって、大強度ビームとその熱に耐えうる標的等、実験装置の改善に加えて、入射核、標的核の選択及び、入射エネルギーの制御が極めて重要である。

理研での113番元素の合成は二重閉殻近傍核を標的とした「冷たい融合反応」によって行われ、Dubna(露)などでの118番元素までの合成は重い放射性同位体であるアクチノイド核を標的とした「熱い融合反応」によって行われてきた。熱い融合反応は一般に断面積が大きいため、重い核を合成するのに有利である一方、合成される核が中性子過剰であるが故に、その崩壊により既知核へ到達しないために粒子識別に不定性が残るという重大な問題があった。理研が冷たい融合を選択してきたのはこのためである。

今後は熱い融合により超重核の到達領域を先に延ばしたうえで、 α 崩壊測定に代わる新しい粒子同定方法を開発していく。熱い融合に特化した反跳核分離装置(GARIS-II)を新設し、今まさに超重核探索に適用しようとしている。また、崩壊を待たずとも原子核の陽子数と質量数を直接測定する新しい手法として、 $\Delta E-E$ 法, GARIS+IGISOL 法, GARIS+TRAP法, 特性X線観測法などを開発している。今後広大な超重核領域の開拓が大きく進むと期待されるが、手始めとして人類未踏の120番元素の合成 $^{248}\text{Cm}(^{54}\text{Cr}, xn)^{302-x}120$ などへの挑戦を行っていく。

113番元素命名への道

これまでは、他機関による追試をもって元素の命名権が認定されてきているが、113番元素に関しては、生成断面積が極めて小さいため、他研究機関での再現実験は極めて困難である。IUPAPとIUPACから結成される委員会(JWP)は、同一研究機関からの実験であってもデータに“High degree of internal redundancy and of the highest quality”があれば評価するとしているため、まずはこの基準のクリアを目指す。2009年、娘核 ^{266}Bh および ^{262}Db の壊変特性を調査し113番元素同定の検証を深めた事により、今後は原子核 $^{278}113$ の観測量を増やす事により条件を満たすべく全身全霊で生成実験を継続している。(2011年夏)

超重核の生成効率があがると、探索・発見段階からその崩壊様式や核構造自体の研究へも大き

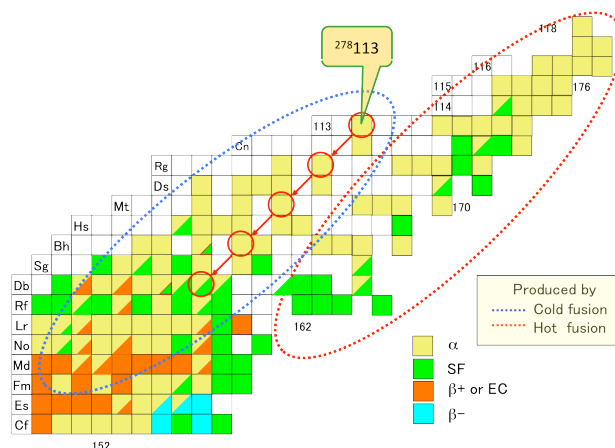


図 2.1.21: 超重核領域の核図表。

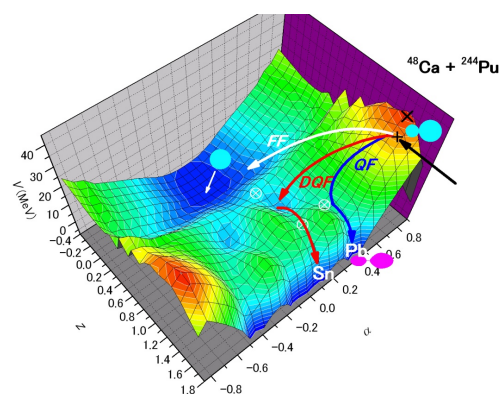
な展開が期待できる。超重核の寿命や α 崩壊エネルギーの値は、閉殻の位置や強さを明らかにする良い指標となる。また、超重核の生成断面積は核分裂障壁の高さと強い相関があり、そこからも超重核の殻構造に関する情報を得ることができる。一方、分光学的手法で超重核の基底状態や励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、一粒子軌道配位を明らかに出来れば、より直接的且つ定量的に超重核の殻構造を明らかにできる。現在 JAEA では、 α 崩壊核分光と isomer- α 核分光によって 106 番元素まで核分光実験が行われているが、GARIS-II など で収量さえ増やすことができれば、同じ手法で $Z=114$ 近傍核の核分光実験も可能である。 $Z=114-120$ 領域の球形閉殻近傍の殻構造を直接核分光実験により明らかにすることを今後強力に推進すべきである。

核融合反応機構の解明に向けて

核融合反応機構の理解は、新しい超重核生成の鍵である。融合反応では、反応時間が長くなるに伴いより半古典的な描像で表現されると考えられていたが、実際は散逸過程などを含む複雑な量子多体問題であり、本質的な理解には至っていない。特に超重元素に関わるアクチノイド標的の場合は、クーロン斥力も大きく、入射核と標的核が接触した後の動的ダイナミクスに大きく依存するため、詳細なエネルギー関数や、多数の入射、標的核の組み合わせで理解を深める必要がある。

これまで JAEA を中心としたグループが、エネルギーを keV 単位で微調整できるタンデム・ブラスター加速器等を用いて融合反応における核の変形効果や融合障壁分布の測定などを行っており、核融合反応のメカニズムの理解進展に貢献することが期待されている。

一方、重核融合の競合過程である、核分裂反応の理解も重要である。融合反応と同様に、変形や対相関などの核構造因子が分裂確率や分裂片の分布に与える影響を明らかにするのが今後 10 年のゴールである。高励起状態からの脱励起は中性子放出に伴う場合が主なチャンネルなので、中性子放出の時間情報や、多重度、放出角度などを精密に調べる大がかりな実験装置ができれば、核分裂過程の理解が一層進むであろう。



■今後の計画(20年)

原子番号 120 を大きく超え安定の島に到達することは、原子核物理学の夢である。そのためには、超重核の生成の鍵となる重イオンビーム強度の向上とそれに耐える標的システムの開発、高効率生成手法(反応)の開発、高感度・高選択性検出手法の開発が必要である。その魅力的でチャレンジングな開発要素のひとつとして、高強度の低エネルギー中性子過剰核ビームを用いた核融合反応がある。過剰中性子の蒸発により複合核の温度を効果的に下げ、生き残り確率をあげられることが期待される。さらに過剰中性子による付加的な複合核の生成確率増加も考えられ、中性子過剰核による低エネルギー核反応機構の理解が超重核合成の進展を大きく押し進める可能性がある。これにより、 $Z=100\sim 120$ 領域での超重核構造研究も可能となると同時に、原子核物理学の枠を越えた「超重元素科学」創成への道が開けていくと期待できる。

2.1.2.7 宇宙核物理

—— 我々の世界を形作る元素はどこでどのようにして作られたのか？

■概要

宇宙核物理学の究極の目標は、自然界に見られる多様な元素や核種の起源を明らかにすることである。現在の中心課題は、

- ・ r 過程の現場となっている具体的な天体現象と r 過程の反応経路
- ・ 安定線よりも陽子過剰側に存在するため中性子捕獲では生成できない p 核の起源
- ・ 最高エネルギーの天体現象と見なされるガンマ線バーストでの元素合成

など、爆発的元素合成に関する問題である。またそれらの過程が進行する場としては重力崩壊型(II型)超新星爆発が有力されており、爆発機構自体の解明にあたっては、高密度での核物質の状態方程式(EOS)や、エネルギー輸送を支配するニュートリノ-原子核反応、大質量星の進化を支配する ${}^4\text{He}(2\alpha,\gamma){}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ 反応率等、原子核の情報が必須となっている。

■最近の進展

安定核を標的とする反応について直接測定が達成されているのは、稀少な安定同位体の(n,γ)断面積、閾値近傍での(γ,n)断面積、一部の軽核が起こす反応のガモフエネルギー領域での断面積である。一方不安定核の反応については、CRIB や TRIAC などを用いて、軽い不安定核の反応測定が実現している。さらに最近、RIBF において質量数 110 近傍の中性子過剰核の β 崩壊半減期の系統的測定に成功し、 r 過程が従来の質量公式に基づく予想よりも速く進むことを示唆する結果として注目されている[NIS11]。

■今後の計画(10年)

2010年代は、次期 X 線天文衛星(ASTRO-H)や 30m 地上望遠鏡などによる精密観測や、次世代スーパーコンピュータ「京」などを用いた大規模シミュレーションが実現する。原子核物理学分野では、理研 RIBF や J-PARC 中性子源などの大強度ビーム源が運用を開始し、不安定核に関するデータを戦略的に収集する道が開かれた。今後 10 年間でそれらの分野での進歩が集約され、爆発的元素合成に関する定量的研究が進展すると期待される。

(1) r 過程研究

r 過程の解析には中性子過剰核の質量、半減期、中性子捕獲反応率等のデータが不可欠である。



TMT



宇宙の進化

京



ASTRO-H



RIBF では、

- ・ RI ビーム停止実験による β 崩壊測定
- ・ 質量リング・SLOWRI+MRTOF による質量測定

により、第二ピークまでで重要な核種、特に中性子魔法数 50、82 に沿った滞留点近傍核の質量と半減期測定を行う。次に重要な中性子捕獲率は、 (n,γ) 反応を模倣する逆運動学(d,p) 反応を用いた ANC 法によって得る。また大強度中性子源との併用による直接測定の試みも検討している。

(2) 超新星爆発機構に関する物理量

重力崩壊型超新星の爆発機構を支配する物理量のうち、原子核が関与するものは、主に i) 核物質の EOS(3.5 節参照)、ii) ニュートリノ-原子核反応率、iii) $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 断面積である。このうち ii) については、安定核で確立したハドロン反応によりスピン・アイソスピン応答を決定する実験が中心となる。既に RIBF で実現された (p,n) 反応に加え、 $(d,^2\text{He})$ 、 $(^7\text{Li},^7\text{Be})$ 反応実験により多くの成果が得られると期待される。また、J-PARC 3GeV ブースターで生成されるニュートリノビームを用いた安定核標的の測定や、RCNP のミュオン源を用いた不安定核による μ 粒子捕獲実験なども、弱い相互作用に対する応答を直接プローブする実験として検討されている。

iii) については、九州大学グループが反跳核測定法により、また、KEK グループが即発ガンマ線測定法により重心系エネルギー 1MeV 以下での測定を目指している。

(3) p 過程研究

p 核の生成機構としては、従来から提案されている安定核を種とした光分解過程 (γ 過程) に加えて、II 型超新星爆発時に起きるニュートリノ誘起水素燃焼過程 (νp 過程) が最近提案された[FRO06,PRU06,WAN06,WAN11]。

νp 過程は、爆発初期の高温・高密度の陽子過剰物質流の中で起きると考えられている。また $p(\nu,x)n$ 反応により中性子も供給される。 νp 過程の流れを調べるには β 崩壊半減期、陽子過剰核の (p,γ) 反応と (n,p) 反応の断面積が必要である。 νp 過程の経路上には、半減期が長く (p,γ) 反応の Q 値が小さいかまたは負の滞留点近傍核 (^{56}Ni 、 ^{64}Ge 、 ^{68}Se 、 ^{72}Kr 等) があり、それらの反応率が最も重要である。 (p,γ) 反応率を決定する実験としては、RIBF に建設中の大立体核多重粒子磁気分析装置(SAMURAI)を用いたクーロン分解反応測定、および東大 CNS・CRIB を用いた逆運動学の

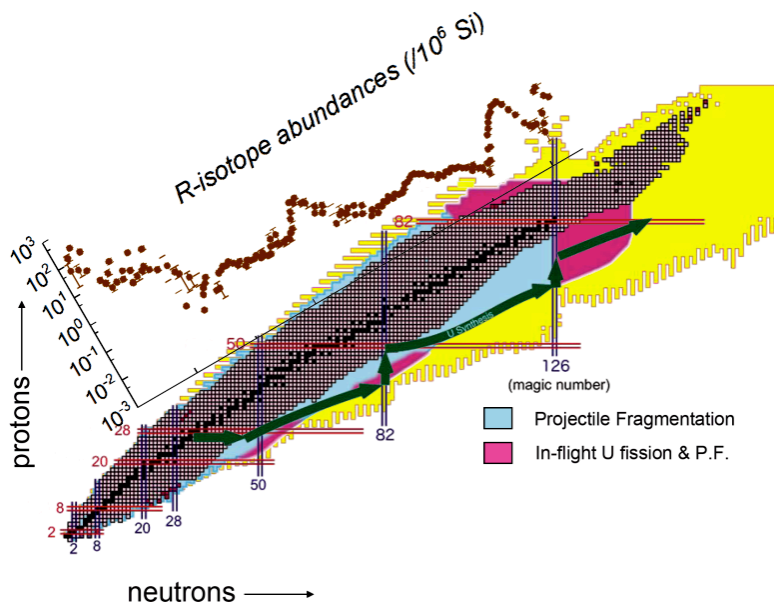


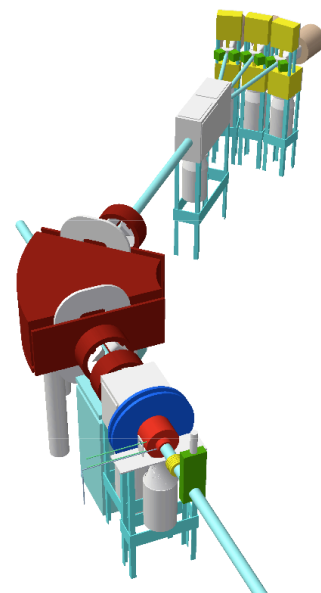
図 2.1.22: グリーン; 予想される r 過程経路。ピンク・ライトブルー; RIBF で 1 個/日以上生成率が期待される核種。

$(^3\text{He},d)$ 反応による陽子幅測定が進められている。 (n,p) 反応については、 d 等の核内中性子を標的とする方法を用いる。核子当たり数 MeV の高輝度不安定核ビーム発生装置と高分解能磁気スペクトロメータを用いて逆運動学の $(d,2p)$ 等の反応を測定する。現在 RIBF の BigRIPS と SHARAQ を用いた実験計画が検討されている。

KISS 計画:多核子移行反応による r 過程第三ピークへの挑戦 [Jeo10]

r 過程によって生成された元素の存在比に質量数80, 132, 196の3つのピークが存在している。その質量近傍の中性子過剰核が r 過程で合成された際に律速になっていたために存在量が多くなったのだと考えられている。従って、対応する r 過程経路上の原子核の寿命や質量は r 過程が進行する環境の中性子密度や、温度に関して大きな制約を与えることになる。既に第2ピークに位置する中性子過剰核までは、RIBFでUのinflight-核分裂反応を用いることで、手が届く範囲になってきた。実際、最近のRIBFでの一連の β 崩壊測定結果では、予想よりも元素合成の速度が速いことが分かっており、爆発モデルにも影響を与えたと考えられる。

一方で、第3ピーク周辺の中性子過剰核は核分裂や破碎反応で生成することが困難で他の生成方法の検討が必要である。KEKグループはRIBFに同位体分離装置KISSを建設し、数MeV/uでの ^{136}Xe - ^{196}Pt 間の多核子移行反応によって r 過程第3ピーク核を生成する方法の開発を開始した。



■今後の計画(20年)

2020年代以降の展開としては、

- i) 光学観測によって爆発パラメータが推定可能な比較的標準的な超新星爆発については、爆発機構とそこで起きる元素合成がほぼ統一的に理解できるようになる
- ii) 爆発イベントごとの観測データから、複数の超新星の爆発パラメータ分布が把握できるようになる
- iii) 特異的な爆発現象、元素合成（特に非熱的過程が関与するもの）に関する研究が進む

などが予想される。さらにひとつの未来形として、天体核物理的な考察を通して原子核の新しい姿を“見る”ということが考えられる。たとえばマグネターの観測から $\sim 10^{15}$ G という超強磁場中の原子核のふるまいを調べることで、超新星ニュートリノのエネルギー／時間スペクトルから超高密度な核物質に関する情報を得ること、超高エネルギー重イオン宇宙線の観測から核子あたり数 TeV 以上での原子核反応を調べることで等である。さらにそれらの間接的な知見は、加速器や検出器、標的等の技術発展にしたがって、順次地上実験で検証されてゆくものと考えられる。

2.1.3 他のワーキンググループとの連携

原子核物理の分野はハドロンから重イオンまで様々な対象を扱い、エネルギー領域も広範囲に渡るが、有限量子多体系の物理現象を解明するという点で共通の視点に立っている。クォークを構成要素と考えるハドロン物理や核子構造研究は、核子を構成要素と考える(狭義の)原子核物理と階層は違っていても多くの共通した多体効果、例えば三体力やテンソル力による相関を扱っており、原子核構造と平行して議論すべきものである。状態方程式はほとんどの分野が重要な問題として設定しており、それぞれがアクセスできるエネルギー範囲や密度範囲での状態方程式解明に挑む。ハドロン多体系の相図の完成には、全分野が一丸となって取り組む必要がある。

- 精密核物理

対象や物理的興味は共有しており、それを異なった視点で見ているという関係にある。本ワーキンググループは「不安定核物理」であるが、不安定核自体が最終的な目的ではなく、原子核の解明をするという目的のための道具と位置付けられる。その目的のためには安定核を精密に研究するというアプローチと組み合わせることも重要で、常に表裏一体となって強く連携していくことになる。なお、本ワーキンググループで提案しているトラッキング型 Ge 検出器アレイは精密核物理との共同提案である。

- ハイパー核

ハイパー核分野と不安定核分野は共通して、原子核に現れる多体効果を、その構成粒子を変化させることで研究している。ストレンジネスをプローブとすることにより、核子や電磁プローブでは見えない原子核の姿を捉えられると期待でき、同じ多体系を研究するものとして大いに注目している。

不安定核に現れる数々の特異現象には、アイソスピンあるいは、中性子数や陽子数の変化がそのまま原因となっているものの他、中性子数と陽子数のアンバランスの結果生じた弱束縛性が原因になっているものもある。例えば、殻構造の再編は、強いアイソスピン依存力による一粒子軌道の変化と弱束縛軌道のエネルギー変化の両者が関係しうる。ストレンジネスの注入により、アイソスピンを固定したまま束縛エネルギーを変化させることで両者の弁別が可能である。また、ストレンジネスの注入で原子核を安定化することで、ドリップラインを広げることができ、より広いアイソスピン領域の研究ができることも期待する。

高密度核物質ではストレンジネス自由度を考える必要があり、中性子星の理解には連携が必要である。

- ハドロン物理／核子構造

クォークを構成要素とするハドロン物理や核子構造研究は、核子を構成要素とする原子核物理と階層は違っていても多くの共通した多体効果、例えば三体力やテンソル力による相関を扱う。もち、原子核構造と平行して議論すべきである。

原子核中の核子構造の変化は原子核の構造を議論する際に重要であり、逆に、それを核子構造のプローブとできる可能性もある。

- 高エネルギー重イオン

広いハドロン相図をハイパー核物理との三者で解明していく。

- 基礎物理

基礎物理分野は原子核を実験室とした素粒子物理研究である。測定環境を与える原子核として、スピンやパリティ、束縛エネルギーなどの条件が最適なものを選ぶことで、自由空

間よりもはるかに高い感度を得ることができることを利用している。原子核の崩壊過程が重要であることも多く、寿命や崩壊分岐など、なるべく多くの選択肢の中から最適な原子核を選ぶことが研究の肝であるともいえる。不安定核の生成法やハンドリング方法など、不安定核で培った技術を応用できる場面も多く考えられ、連携して研究を進めていきたい。

● 計算核物理

実験と理論との強力な連携が不可欠であることは言うまでもない。大規模核構造計算が進展することで、より多くの原子核や物理量に対して、測定と理論との定量的比較が可能になり、原子核の理解が進むはずである。また、構造の情報を得るために、反応を利用することが多いが、得られた構造の情報の不定性を減らすには信頼のおける核反応理論が必要である。

2.1.4 タイムライン

不安定核の研究は曙を迎えたばかりで、今後本格的な段階に入る。様々な装置を駆使し、あらゆる角度から研究を進めることになる。本稿で述べた研究戦略と装置開発の時系列を図 2.1.23 にまとめる。

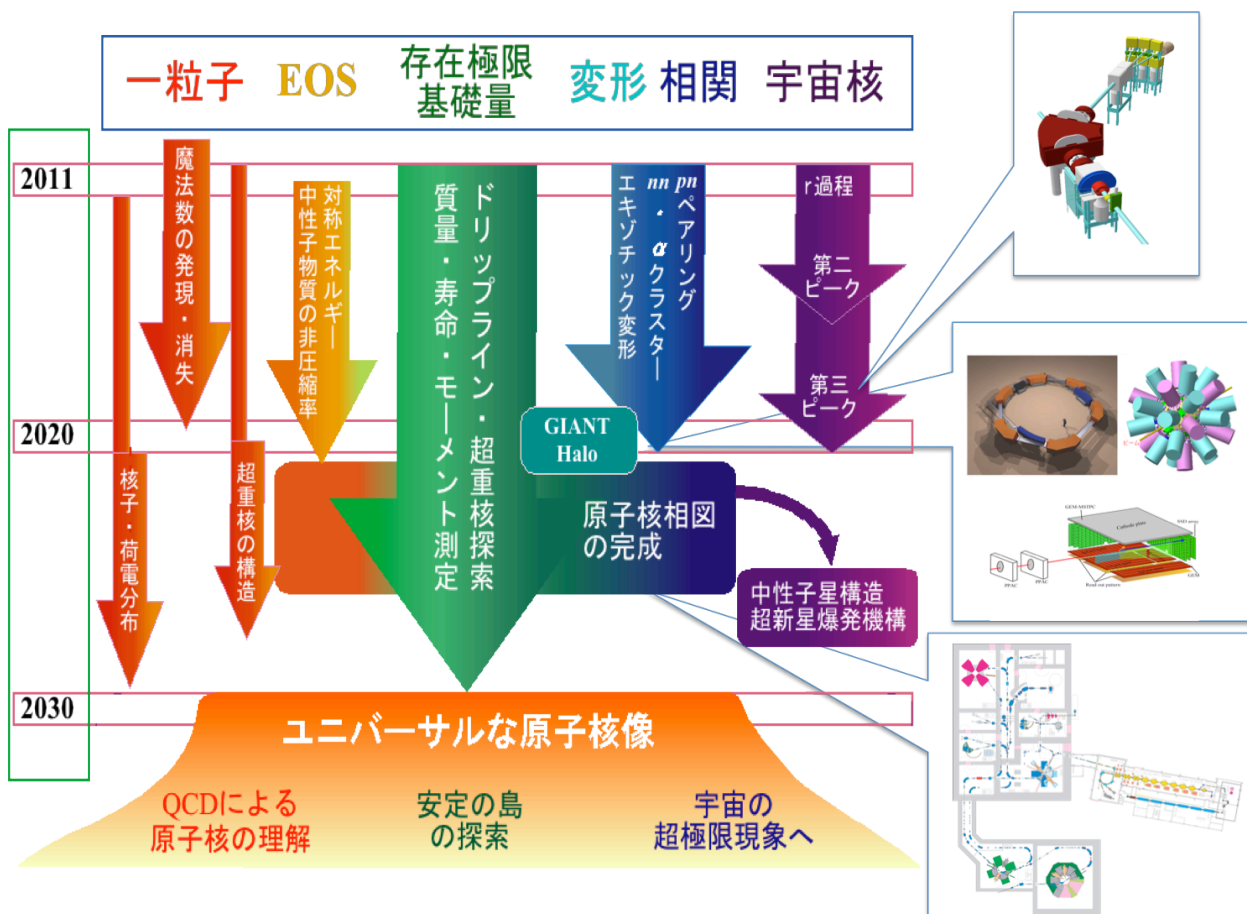


図 2.1.23: 不安定核研究タイムライン。

2.1.5 リソース

■関係する研究者概数

・施設ごとのユーザー数

RIBF	500 人(国内 400+国外 100)
RCNP EN コース	30 人
原研タンデム	30 人
NewSUBARU	6 人
J-PARC	7 人

・コミュニティー構成数(上とオーバーラップあり)

停止低速 RI の会	120 人
γ 線核分光の会	70 人(国内のみ。国外も同数程度以上)

■本稿で提案した将来計画を実現するために必要な予算と人員数の概算を以下にまとめる。

		金額	人員	開発期間
エネルギー補償型蓄積リング		20 億円	10 名	6 年
γ 線検出器	$1\pi\text{Ge}$	12 億円	7 名	5 年
	$4\pi\text{Ge}$	+40 億円	7 名	+5 年
	$4\pi\text{LaBr}_3$	10 億円	5 名	5 年
アクティブ標的		15 億円	10 名	5 年
KISS		5 億円	7 名	5 年

2.1.6 まとめと展望

原子核研究が安定線から離れた領域に拡大をはじめ、安定核で築かれた常識が覆されるような“異常な”構造が次々と見つかった。しかし、原子核が中性子と陽子と言う二種類のフェルミオンからなる系であることを考えると、不安定核を特殊であると考えるのは適切ではない。安定核や不安定核という分類は便宜的でしかなく、両者を含めより一般的な核子多体系としての原子核を理解することがこれからの研究の大きな方向である。日本の原子核分野は新世代 RI ビーム施設として世界に先駆けて RIBF が稼働を開始し、アイソスピンフロンティアを大きく拡大し始めている。さらに RCNP や CYRIC, JAEA などの施設ではエネルギーや質量領域においてユニークな不安定核生成法を推し進めると同時に、不安定核ビーム実験と組み合わせて“原子核”を理解するための相補的な安定核ビーム実験を推進し、研究の幅を広げている。

本報告書では、こうした好機にある不安定核物理の今後の展開を以下の 6 つ「視点」に分類し、それぞれ基本問題を設定して研究戦略について議論した。

- 存在限界と基礎量: 原子核の存在限界はどこまで広がっているのか?
安定の島は存在するのか? 人類はそこに到達し得るのか?
- 一粒子運動: 殻構造は安定線から離れた領域でも原子核の基本構造たりうるのか?
- n 核子相関: 核子相関は不安定核に新しい相をもたらすか?
- 変形: 自発的対称性の破れは原子核にどのような形を生み出すのか?
- 状態方程式: 中性子物質は固いのか? 柔らかいのか?
- 宇宙核物理: 我々の世界を形作る元素はどのようにして作られたのか?

こうした研究を進めるための道具立てを、不安定核を供給する RI ビーム施設とそれを用いた実験を行うための実験装置に分けて考える。RIBF が稼働を開始し、これまで全く不可能であったような原子核領域の研究を世界で唯一進めることができる環境が整っていることを考えると、まずは実験装置の整備が急務である。具体的には以下の装置の建設が必要である。

- エネルギー補償型蓄積リング
- $4\pi\gamma$ 線検出器(LaBr3 ボール、トラッキング型 Ge ボール)
- アクティブ標的
- SCRIT の高輝度化

並行して、不安定核ビームのさらなる多様化を目指し、RIBF のアップグレード計画を推進する。これにより、得られる原子核種がさらに増加し、エネルギー領域も広がる。上で述べた実験装置と組み合わせることで研究が格段に豊かになる。

- 大強度低エネルギー不安定核ビームの開発
 - 高エネルギーRI ビーム減速技術の開発
 - KISS による多核子移行反応を利用した r 過程第 3 ピーク核の生成
 - ISOL / SLOWRI による低速($\sim 10\text{keV}$)RI ビーム
 - ISOL / SLOWRI からのビームを再加速した大強度で良質な低エネルギー(数 MeV)不安定核ビーム。
 - 高エネルギー不安定核ビームの増強
 - RIBF での一次ビーム強度の増強
 - ISOL/SLOWRI からの低エネルギービーム再加速とその再破碎反応による RI ビーム生成
- さらに長期的には、低エネルギー($\sim 10\text{MeV}$)及び高エネルギー(1~数 10GeV)の大強度不安定核ビームを生成するための新しい加速器群の建設が必要である。技術的に越えなければならない壁も高く、世界の情勢を見ながら具体化していくことになる。

2.1.7 謝辞

本稿の執筆にあたり、ワーキンググループメンバー以外にも多数の方々に議論に参加していただいた。個々にお名前をあげることはできないが、深く感謝する。

参考文献

- [Ber91] G. F. Bertsch, and H. Esbensen, *Ann. Phys. (New York)* 209, 327 (1991).
- [Boh69] A. Bohr and B.R. Mottelson, *Nuclear Structure Vol. 1* (W.A. Benjamin, 1969), Fig.2-30.
- [Dem10] P.B. Demorest et al., *Nature* 467 (2010) 1081.
- [Fro06] C. Frohlich et al., *Astrophys. J.* 637, 415 (2006).
- [Gad08] A. Gade et al., *Phys. Rev. C* 77, 044306 (2008).
- [Ham04] I. Hamamoto, *Phys. Rev. C* 69, 041306(R) (2004).
- [Hin11] N. Hinohara et al., *Phys. Rev. C* 84, 061302(R) (2011).
- [Ide01] E. Ideguchi et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 222501 (2001).
- [Ide10] E. Ideguchi et al., *Phys. Lett. B* 686, 18 (2010).
- [Jeo10] S.C. Jeong edit, “*KISS: KEK isotope separator system for β -decay spectroscopy*”,
KEK report 2010-2 (2010).
- [Kou05] 小浦寛之、橘孝博、日本物理学会誌60、No. 9, (2005), p.717-724.
- [Mit96] S. Mitsuoka et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*372, 489 (1996).
- [Mor04] K. Morita et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 73 (2004) 2593.
- [Mat05] M.Matsuo, K.Mizuyama, Y.Serizawa, *Phys. Rev. C* 71, 064326 (2005).
- [Mot95] T. Motobayashi et al., *Phys. Lett. B* 346 (1995) 9.
- [Nak06] T. Nakamura et al. *PRL*96,252502(2006).
- [Nak92] T. Nakatsukasa et al., *Prog. Theor. Phys.* 87, 607 (1992).
- [Nis11] S. Nishimura et al., *Phys. Rev. Lett.* 106, 052502 (2011).
- [Ots05] T. Otsuka et al., *Phys. Rev. Lett.* 95, 232502 (2005).
- [Oza00] A. Ozawa et al., *Phys. Rev. Lett.*, 84, 5493 (2000).
- [Pie09] J. Piekarewicz et al., *PRC* 79 (2009) 05431.
- [Pru06] J. Pruet et al., *Astrophys. J.* 644, 1028 (2006).
- [Shi04] S. Shimoura, *Nucl. Instru. Meth. A*525 (2004) 188.
- [Pia06] E. Piasetzky et al., *Phys. Rev. Lett.* 97, 162504 (2006).
- [Sin02] B. Singh, R. Zywina, R.B. Firestone, *Nucl. Data Sheets* 97, 241 (2002).
- [Sak99] H. Sakurai et al., *Phys. Lett.*, 448B, 180(1999).
- [Sor08] O. Sorlin and M.-G. Porquet, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 61, 602 (2008).
- [Sub08] R. Subedi et al., *Science* 320, 1476 (2008).
- [Sve00] C.E. Svensson et al., *Phys. Rev. Lett.* 85, 2693 (2000).
- [Tan85] I. Tanihata et al., *Phys. Rev. Lett.* 55, 2676–2679 (1985)
- [Toh01] A. Tohaki et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 192501 (2001).
- [Ues12] T. Uesaka et al., *Prog. Theo. Exp. Phys.* 03C007(2012).

[Uts12] Y. Utsuno et al., Phys. Rev. C 86, 051301(R) (2012).

[Wan06] S. Wanajo, Astrophys. J. 647, 1323 (2006).

[Wak04] M. Wakasugi et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 532, 216 (2004).

[Wan11] S. Wanajo, H.-T. Janka and S. Kubono, Astrophys. J. 729, 46 (2011).

[Yan09] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 261(2007) 1009.