

# 不安定核の将来

不安定核の将来ワーキンググループ

v.1.0 (2011.9.15)

## 概要

本稿では、不安定核の将来ワーキンググループでの検討結果を報告します。

### 1 概説

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を生み出す。しかしながら、1980年代中庸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みていたのみであった。近年になってもたらされた不安定核生成技術の進歩によって、長らくとらわれていた安定線への束縛から解き放たれ、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。これまでの実験は主として軽い領域で行われてきており、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なかに特異な構造を見出し、その発現機構を調べ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の本来の姿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の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、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った研究を通じて不安定核の姿を明らかにすることで、安定核の理解ですら塗り替えられようとしている。こうした観点から、原子核研究をより広い核図表領域に拡大し、より詳細な研究を進めることの重要性が認識され、世界で多くの不安定核生成施設が計画されている。日本では世界に先立てて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)が稼動を開始したところで、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。ここでは、RIBFを中心に RCNP や CYRIC、JAEA などの現有の施設を最大限に生かすための近未来の研究戦略と、その先での更なる研究の拡大について概観する。

第2節では不安定核研究の分野を6つの細分野に分け、それぞれについて概観する。第3節では各細分野について詳しく説明する。

**n核子相関**

**無限核物質**

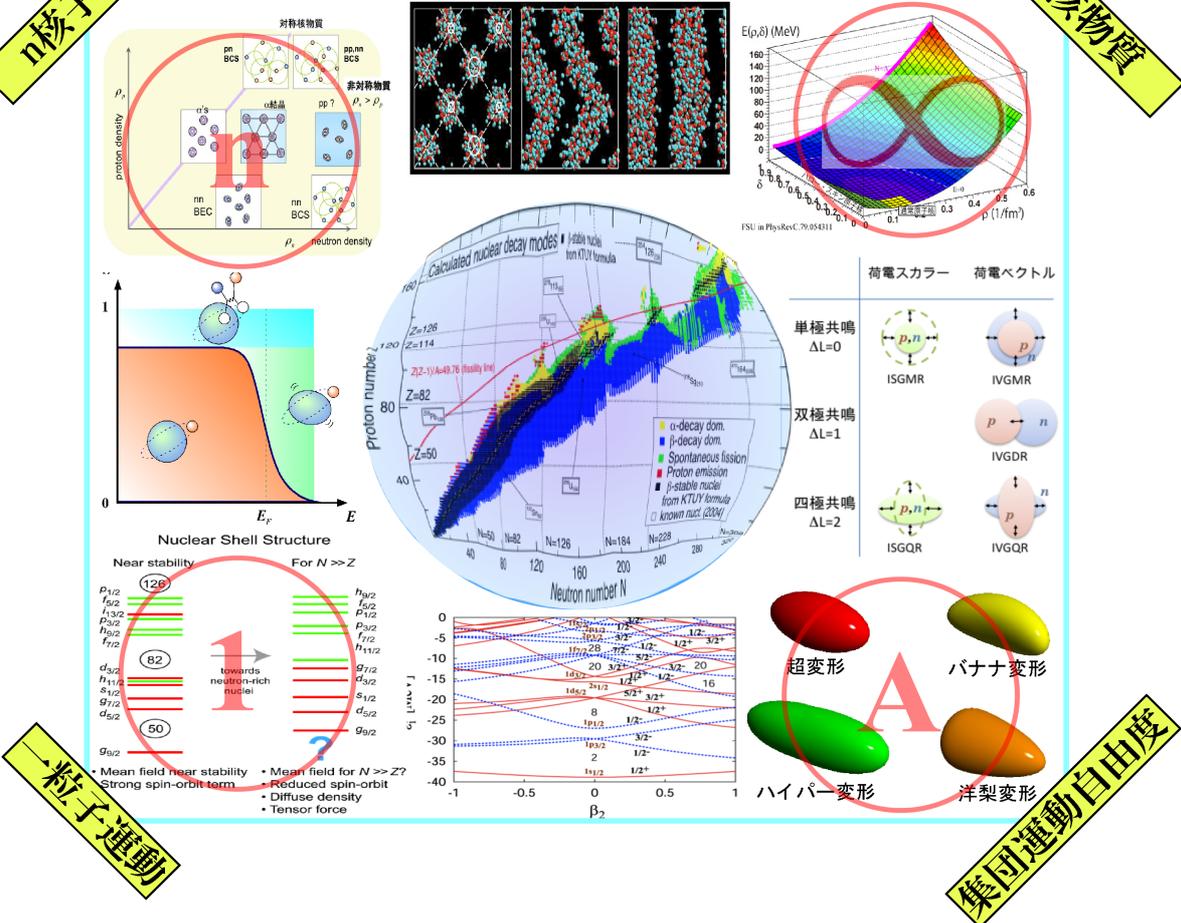


図 1:不安定核分野の細分野分け。

## 2 不安定核分野の細分野分けと基本問題

不安定核研究の分野は極めて多岐にわたるため、便宜的に以下の6つの細分野に分け、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(中性子過剰核、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統一的に扱う。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1は各細分野を象徴的な図で示したものである。以下に各細分野の概要を説明する。

## 2.1 細分野の概説

### 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安定でいられるのか。どれだけ重い原子核が存在するのか。そこにたどり着くにはどうすればいいのか。そこで原子核はどのような姿をしているのか。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フロンティアとしての使命である。

### ① 一粒子運動：

--- 魔法数発現、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潔で美しい秩序をもたらしている。この基本的な構造は決して不変なものではなく、安定線から離れると魔法数が消失するなどの現象が分かってくるが、安定線からさらに離れたときにどうなるのだろうか。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、不安定核物理学の全領域と関わる最も根本的な課題である。

### ① 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実際は相関が働いており、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。通常はBCS様の対相関が低密度ではBEC様に変化するなど、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。

### ① A 変形：

--- エキゾチック変形の探索と変形機構の解明 ---

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？

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、形状が安定して定まっ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。束縛エネルギーや価核子の一粒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 ---

中性子物質は固いのか？ 柔らかいのか？

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どのような状態方程式に従うのか。特に、状態方程式の中性子過剰度依存性は、これまでほとんど知られていない。こうした中性子過剰な物質の理解は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うえでも不可欠である。

### ☆ 宇宙核物理： --- 爆発的要素合成シナリオの確立 ---

我々の宇宙を形作る元素はどのようにして作られたのか？

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。特に爆発的な現象の場合、短寿命の原子核が関与するため、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。

## 2.2 細分野間の関連

上で述べたように、この報告書では不安定核分野を 6 つの細分野に分類して戦略を議論するが、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エネルギーの一粒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。核子間の二体の対相関はクーパ対の凝縮という形で、また、二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 EOS とともに、一粒運動、核子間相関の全てに支配されている。このように、細分野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。

## 2.3 施設/検出器

上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。これらの必要性および必要性能については 3 節で詳しく述べることにし、ここでは項目だけをあげる。

1. 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 (2017 年)
  - RIBF での ISOL または SLOWRI からのビーム再加速とその再破碎反応による RI ビーム生成 (2025 年)
2. 大強度低エネルギー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)
3. 大型  $\gamma$  線検出器
  - $4\pi$  LaBr<sub>3</sub> 検出器アレイ (2020 年)、 $4\pi$  Ge 検出器アレイ (2025 年)、
4. アクティブ標的 (2015~2020 年)
5. 蓄積リング (2020 年)
6. SCRIT アップグレード (2030 年)

### 3.1 原子核の存在はどこまで広がっているのか?

不安定核には様々な構造変化が予想されており、その構造変化の解明を狙って研究を行うことで研究が戦略的に行える。それと同時に、今まで到達できなかった領域に少しでも深く踏み入り、そこ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か、という疑問に挑むというアプローチは自然科学研究の最も根源的な立場であり、原子核の新奇な一面を見せてくれるであろう。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。

なるべく不安定な原子核を目指す、と言った場合に、色々な方向で「不安定さ」を増すことができる。比較的軽い原子核ではドリップラインに到達し、その外側の非束縛の原子核まで研究することができる。Ca同位体の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いる。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。一方、ある程度重い原子核の場合、価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 $^{98}\text{Sn}$ から $^{140}\text{Sn}$ 程度まで、中性子数の変化が40以上にも渡る原子核の研究が現有の施設でも可能である。これだけ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? 未踏の地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。

このように、原子核の未踏の領域への挑戦は様々な方向に広げるべきである。主としてウランの核分裂片を利用した中性子過剰中重核領域の拡大、重い重イオンの破碎反応による陽子過剰核領域の拡大、軽い中性子過剰重イオンの破碎反応を利用した軽い核のドリップラインの探索そして、重イオン同士の融合反応や多核子移行反応による重・超重核合成などである。その領域で質量や半減期、核半径、第一 $2+$ 状態のエネルギーといった基礎量を測定し、異常が見つければそこを重点的に研究することで、予想もしない核構造の変容に迫ることができる。

超重核探索については節を改めて述べる(3.6節)。

#### 今後10年

原子核の存在限界を追求するためには不安定核ビームの強度が重要である。現在最も不安定な原子核を生成できる RIBF においても、質量領域、エネルギー領域によって適切な生成方法を開拓していく。

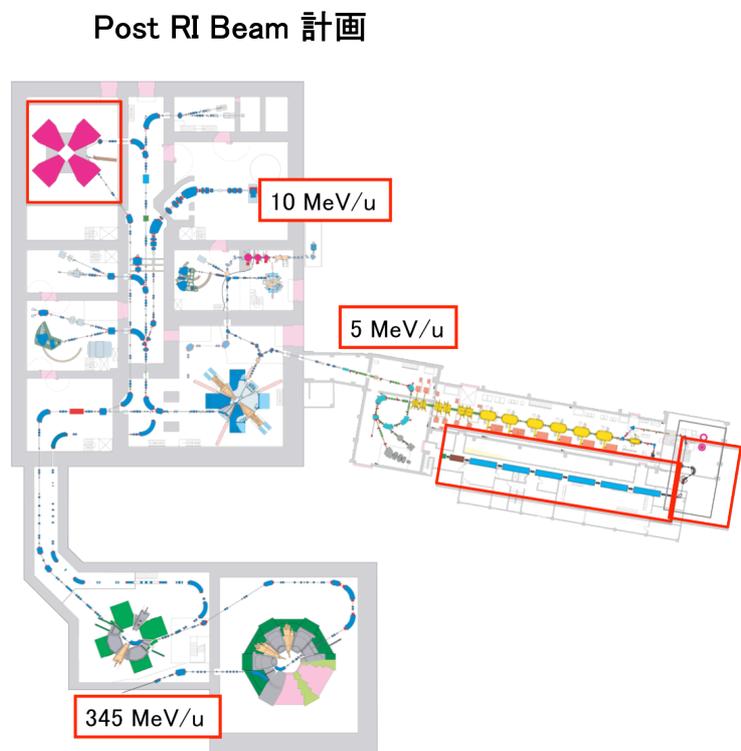


図 2:post-RIBF 計画

質量数 100 以下の核は当面は従来通り安定核の中でも比較的中性子過剰な  $^{18}\text{O}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{86}\text{Kr}$  もしくは陽子過剰な  $^{76}\text{Kr}$ ,  $^{124}\text{Xe}$  の破砕反応を使うことになる。まずは一次ビームを目標である  $1\text{p}\mu\text{A}$  の強度で得ることを目指す。次のステップとして中性子過剰核については ISOL もしくは SLOWRI で得られた中性子過剰核の再加速ビームの再破砕反応(ポスト RIBF 計画の一部)で大幅に中性子過剰側に領域を拡大する。 $^{94}\text{Kr}$  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。

質量数 80 から 160 領域の中性子過剰核はウランの核分裂による生成が最も効率が良い。既に RIBF でインフライト型の BigRIPS が稼働しており、r 過程核に手が届き始めている。当面はこの手法を押し進めて、より中性子過剰領域に臨むのが適当であろう。今後 5 年のスコープでウランビームの強度を現在の  $1\text{pnA}$  から  $100\text{pnA}$  程度に増強する計画が進められている(ポスト RIBF 計画の一部)。そのために中段のサイクロトロンである fRC を超伝導化し、入射前の荷電交換過程を除くことで荷電分布によるロス、荷電交換膜を通過する際のビームの劣化、荷電交換膜の寿命問題を解決する。この領域も次のステップは ISOL/SLOWRI 再加速ビーム(ポスト RIBF 計画の一部)の再破砕反応である。 $^{132}\text{Sn}$  の破砕反応では r 過程核をより大量に生成できるであろう。

より重い質量数 200 近傍の中性子過剰核を得るために多核子以降反応を利用する 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。

### 3.2 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

有限フェルミオン多体系である原子核を記述するとき、一粒子運動を出発点とするのは最も自然な考え方の一つである。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。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、魔法数の発現、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種を蒔いた。<sup>32</sup>Mg 周辺核で見つかった中性子数  $N=20$  での魔法性喪失は、いわゆる Island of Inversion

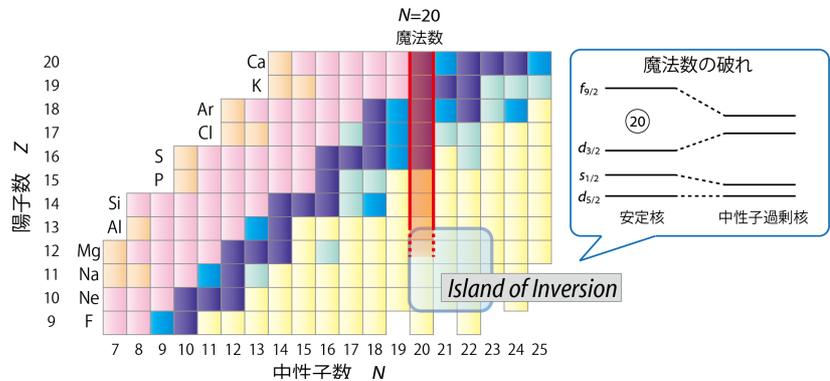


図 3 : Island of Inversion 付近の核図表

現象の端緒である。その後の研究で、この現象は  $N=20$  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一般的なものであること、また逆に  $N=16$  や  $N=32$  などが中性子過剰領域で新たに魔法性を持つことがあることも分かった。

この現象の解明を通じて、原子核の一粒子状態が中性子数陽子数比や束縛エネルギーによって大きく変化する機構について多くの議論がなされた。その結果、原子核の一粒子軌道を理解するのに、古くから用いられてきた単純な中心力場+一体スピン軌道力では不十分であることが明らかになってきた。

#### 今後 10 年

RI ビームファクトリー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。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が傾ける。その際、軸となるのが、 $Z=28$ (Ni)、 $50$ (Sn)の同位体鎖、 $N=40, 50, 82$ の同調体鎖の研究である。

質量測定とガンマ線分光は、今後もこれまで通りアイソスピンプロントニ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。<sup>78</sup>Ni、<sup>132</sup>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 <sup>100</sup>Sn、<sup>48</sup>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 (SHOGUN 計画(3.4 節参照)、高機能標的システムなど) が必要である。

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へ

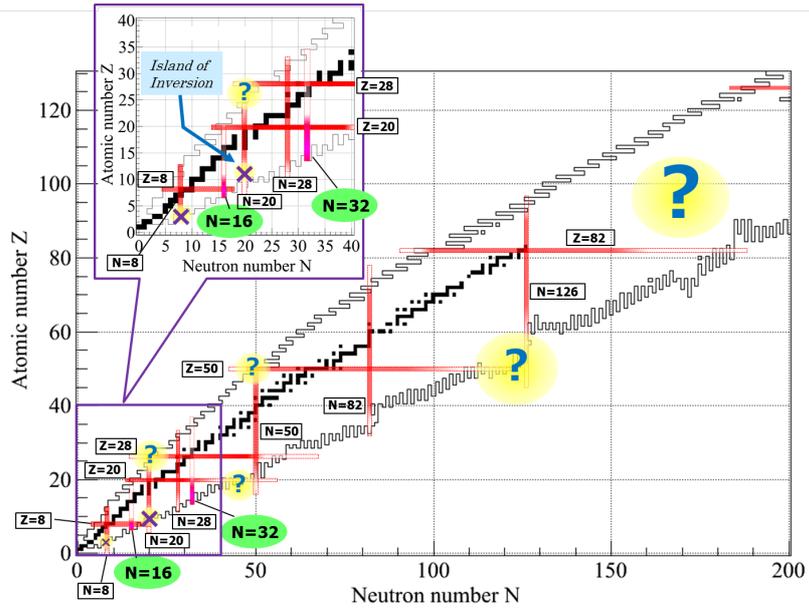
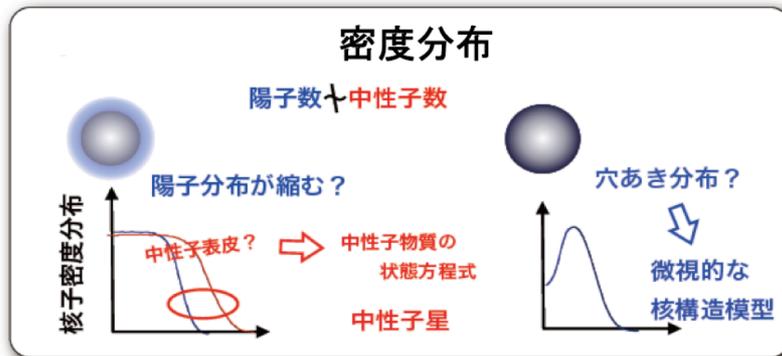


図 4:全核図表領域での殻構造の理解。

### 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い。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)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 $^{132}\text{Sn}$ 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上げるためのアップグレードを行えば、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。



リウム・SLOWRI とレーザー照射を組み合わせた方法により、その適用範囲が大きく広がると期待できる。

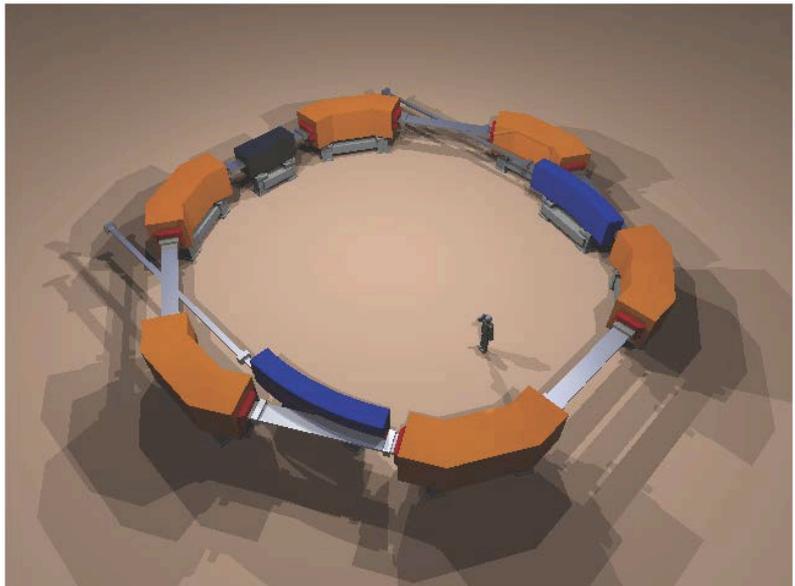
これらに加えて、核子ロックアウトや核子移行反応などの直接反応実験によって一粒子軌道変容の起源・機構に直接的アプローチできるようになるのが今後10年間の大きな潮流である。RIビームファクトリーでは、そのエネルギーの特徴を十二分に活かした $(p,pN)$ 反応により一粒子ホール状態の分布を直接測定する研究が極めて有効である。東大CNS・理研グループが開発した偏極陽子固体標的と組み合わせることでスピン自由度の活用という新しい軸を実験研究にもたらす。不安定核の電子散乱実験を可能にしたSCRITを将来大規模にアップグレードし、 $(e,e'p)$ などの実験を実現することにも大きな期待が寄せられる。

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。

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データは、「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。XX章で述べられてい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、我々は「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。

### 将来プロジェクト

ルミノシティが三桁向上すれば、存在は確認されたものの分光学情報の得られない超希少核(例えば  $^{48}\text{Ni}$ )のガンマ線分光が可能となり、またガンマ線分光しかできない核(例えば RIBF での  $^{100}\text{Sn}$ 、 $^{78}\text{Ni}$ )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は、ビーム量をその

ままに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<sup>2</sup>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<sup>24</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>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質量リングを、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 5: 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。

### 3.3 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、時として数個の核子よりなる塊(クラスター)があたかもその(有効)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、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統一的に理解する上での大きな鍵となる。

不安定核の研究を通じて、2体、4体、さらに多体の相関を取り入れることが原子核構造や励起構造を理解する上で重要な役割を果たすことが再認識されてきた。2体の相関では、核力の性質に起因して短距離相関やテンソル相関が存在するはずであり、ダイニュートロン相関も含め、こうした2体相関の直接測定が実現されるであろう。また、4体の相関である $\alpha$ クラスターは、安定核と不安定核でクラスター状態を形成する鍵となっているおり、 $\alpha$ クラスターを構成要素とする新奇な構造の形成が期待される。またクラスター励起状態は元素合成の観点からも精力的に研究されている。変形現象は集団的相関の一例であり、クラスター相関などの多体相関がエキゾチックな変形や新奇な励起モードとも関係しうる。

不安定核において期待される相関の変化や新しい相関の現れを通し、豊かな核構造をもたらす相関の理解を深め、核力の記述の深化、原子核という量子多体系の多体問題の解にせまる。

#### 最近の進展

近年、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、注目された課題となっている。例えばハロー原子核である $^{11}\text{Li}$ において弱く束縛された余剰中性子が強い相関をもつことが理論的に指摘されており、その証とされる、低エネルギーのE1共鳴(ソフトダイポールモード、ピグミー共鳴)の存在や低相対運動量の中性子がクーロン励起の実験から得られている(図6参照)。さらに、中性子過剰なNi, Sn同位体の核表面でダイニュートロン相関が増大するという理論的示唆があり、その実験的解明が強く望まれている。また、4核子相関に関しては、 $^{12}\text{C}$ や $^{16}\text{O}$ の励起状態に $\alpha$ クラスター気体という現象が提案され、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况として実現しうる $\alpha$ 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。

#### 今後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

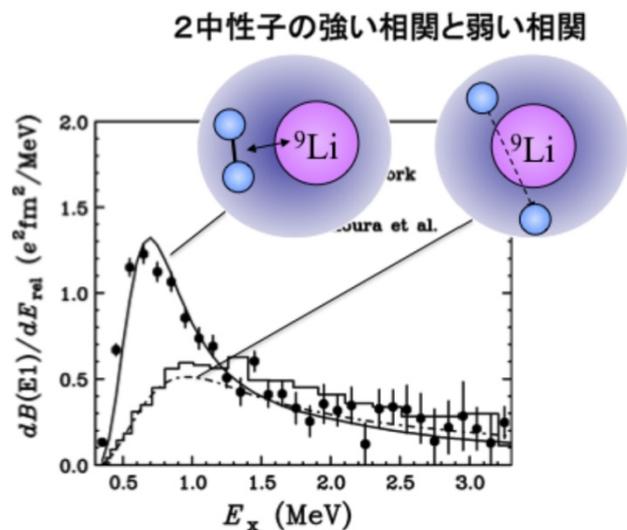


図 6:  $^{11}\text{Li}$  のクーロン分解で得られた E1 遷移強度とハロー中性子の空間的な相関 [NAK06]。

成のメカニズムの理解につながっていくと考えられる。一方で、対相関の密度依存性により中性子スキン・ハローが発達しているような原子核では表面付近のダイニュートロン形成が示唆されている。このような原子核での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。

ダイニュートロンをより直接的に観測可能な反応を用いることも重要となる。例えば、 $(t, p)$  や  $(p, t)$  のような二核子移行反応を用いることによって、対相関の情報を引き出せると期待される。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。

また、3、4体、それ以上の核子相関として、 $t$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  や C などのクラスター形成に注目し、これらを構成要素とするクラスター状態の探査を行う。クラスターの発達や減衰、どのようなクラスターが発現するかは、陽子・中性子数や励起エネルギーなど依存する。不安定核における新奇なクラスター状態や新たな励起モードを探索しつつ、その発現機構の解明とクラスター相関の統一的理解を目指す。

### 将来プロジェクト

不安定核ビームに対する核子以降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。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

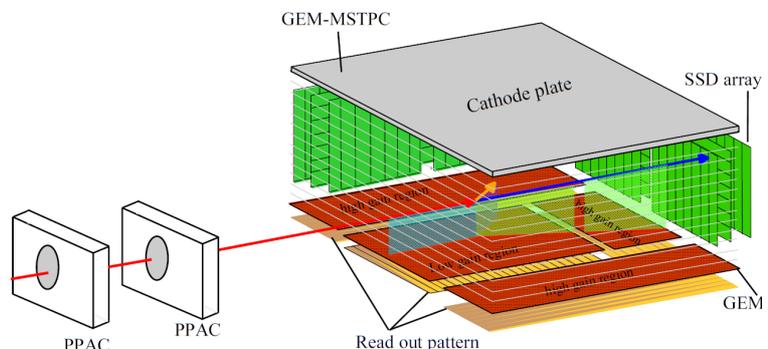


図 7: アクティブ標的

$Q$  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散乱粒子ではなく反跳粒子を測定する方法が有効である。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おおいに力を発揮する。

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

### $\alpha$ クラスターと元素合成

不安定核における  $\alpha$  クラスター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  $(\alpha, n)$  反応や  $(\alpha, p)$  反応の反応率を増大させる可能性がある。近年、低エネルギー RI ビームにより  $\alpha$  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の進展が期待される

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。

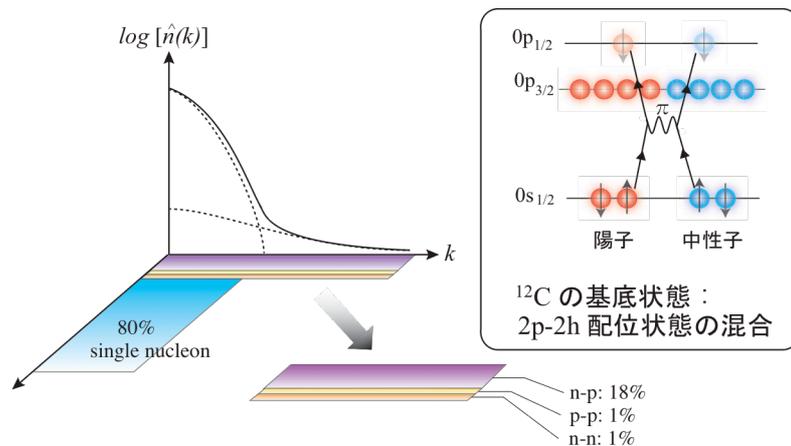
### 短距離斥力とテンソル相関

これまでの原子核構造や反応は、短距離斥力やテンソル力が繰り込まれた中心力、スピン・軌道力及び密度依存力で記述され、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、本来テンソル力は中心力やスピン軌道力に繰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であろう。

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、 $(e, e'pN)$ や $(p, ppN)$ 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。

テンソル相関は、最も強くかつ全ての原子核に遍在する相関であり、核内の重陽子様相関(スピン1、アイソスピン0の $pn$ 対が異なる角運動量状態、例えば $s$ 波状態と $p$ 波状態で混合する。図参照。)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、核構造研究の全ての領域と密接に関連している。

現実的な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等の理論の台頭、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、上で挙げた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：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空孔配位状態の混合が予想される。

### 3.4 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

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。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。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。

多くの原子核は変形していることが分かっているが、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、高次の変形など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検証が得られたものはない。高次の変形のなかでも八重極変形は、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。数種類の形が共存する「変形共存」や、連続的に変化した形が無限個共存する「ソフト変形」などがある可能性があり、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なる可能性も期待している。

#### 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。<sup>32</sup>Mg周辺核で見つかった変形状態は中性子数 $N=20$ 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実現したのは、効率の高いインビーム $\gamma$ 線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・理研が建設した不安定核ビーム用 $4\pi$  NaI(Tl)  $\gamma$ 線検出器ボール

#### 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は、そこでの準位密度や軌道の性質に応じて変形を促す。準位密度の濃淡は殻構造に他ならず、原子核の変形は殻構造と表裏一体であるといつてよい。殻構造の変容、すなわち一粒子準位のエネルギーの変化は核内での核子間相互作用の性質や、弱束縛による効果を直接反映しているため、不安定核構造の研究の基本であるが、個別の一粒子準位の詳細を見るよりは、その結果現れる集団性、もしくは変形度の変遷を調べることで全体を概観することができる場合がある。

DALI/DALI2の大きな成果と言える。その後、東大CNSが分解能を重視したGe半導体検出器アレイであるGRAPEを建設し、不安定核の殻構造研究の黎明期を支えた。

$^{32}\text{Mg}$ 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。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 $\Delta I=2$ で結ばれる2つの一粒子軌道があること、価中性子が弱束縛であるために一粒子状態、ひいては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。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の条件を様々に変化させた場合、原子核がどのような形状をとりうるのかという問題に研究が展開されようとしている。

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8に示すように安定線より陽子過剰側で主に発見された。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 $^{40}\text{Ca}$ と $^{36}\text{Ar}$ で発見され、更に中性子過剰側の $^{40}\text{Ar}$ で発見された。 $^{40}\text{Ar}$ 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。これら特定の質量数領域に超変形原子核が点在している実験結果は超変形殻構造の存在を示唆しているが、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想されている。それらの探索は不安定核ビームを用いて初めて可能であるため、将来の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10年

RIBFにより到達可能な領域が劇的に拡大し、原子核の変形現象を統一的に理解できる素地が整いつつある。これにより、変形研究が新しい局面を迎え、2つの方向性での発展が推進されようとしている。

一つはより高次の変形状態の探索である。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(原子核の)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、中性子過剰超変形核でのバナナ型超変形の発現、テトラヘドラル形や洋ナシ形、三角形型の変形の探索が始まっている。四

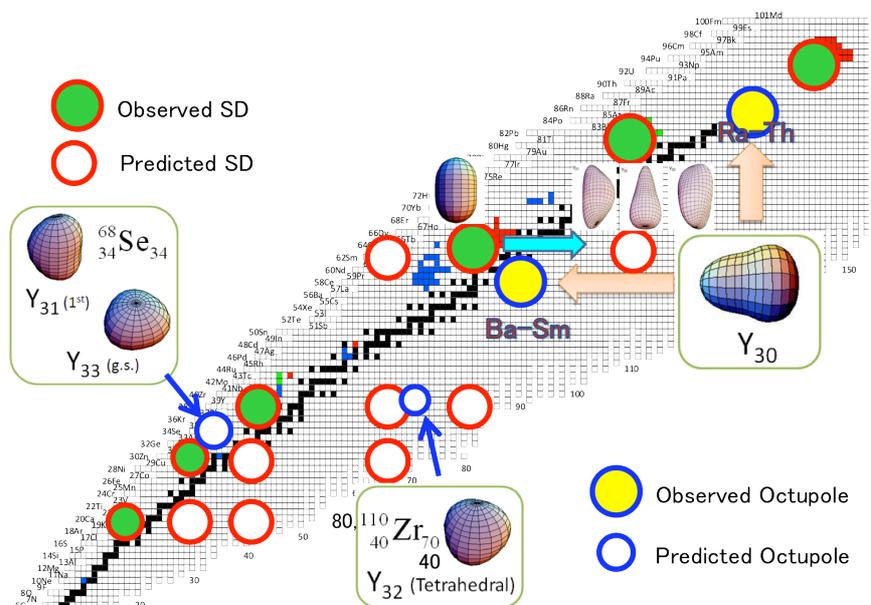


図 8: 各図表上に現れる様々な変形

図 8: 各図表上に現れる様々な変形

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つ程度中性子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。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 $\gamma$ 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 $^{32}\text{Mg}$ 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 $^{68}\text{Se}$ 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。

### 将来プロジェクト

上で述べた未発見の現象の証拠を引き出すには、大強度不安定核ビームとともに高いエネルギー分解能と高い検出効率を持つガンマ線検出器アレイが必須である。なかなか生成されない稀な変形に伴って放出される複雑な $\gamma$ 崩壊連鎖を同定するためには、複数のガンマ線の同時計測を行うことになる。そのためには検出効率を向上させることに加えて、エネルギー分解能を向上させ、かつ、部分エネルギー吸収事象を減らすことで高いSN比を得ることが重要である。同時計測をする場合、計測数の冪で効果が利くため、その重要度はいっそう増す。

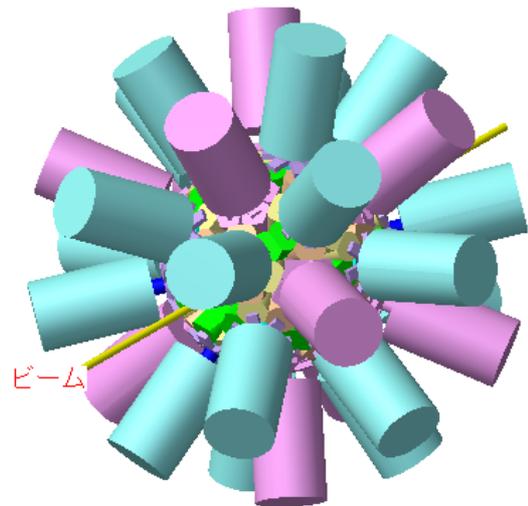


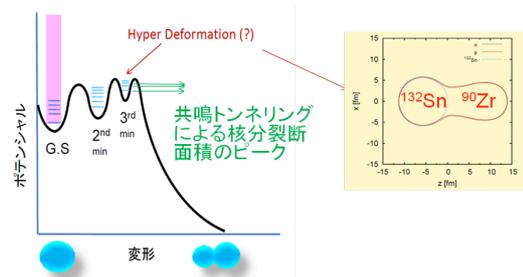
図 9: トラッキング型  $4\pi$  Ge 検出器

短期的には $\text{LaBr}_3$ シンチレータの $4\pi$ アレイが、長期的にはトラッキング型Ge検出器アレイが望ましい。 $\text{LaBr}_3$ シンチレータボールであるSHOGUN計画は検出効率でDALI2の2倍、分解能で4倍の能力を持つ検出器の計画で、DALI2の16倍の $\gamma\gamma$ 同時計測感度を持つ。トラッキング型Ge検出器はエネルギー分解能をさらに3倍向上させ、部分エネルギー吸収を半分に抑えることができるため、 $\gamma\gamma$ 同時計測感度でSHOGUNのさらに40倍向上する。超変形の研究を強力におしすすめたGammaSphereやEUROGAMと比較しても数100倍の感度を持つため、 $10^9$ cps程度の一次ビームで行っていた実験が $10^6$ cps程度の二次ビームで行えることになる。奇妙な変形に関係する $\gamma$ 線放出の強度は全体の $\gamma$ 線強度の1%以下であると考えられており、高分解能・高効率検出器による多重同時計測感度の向上は研究の死命を制するといえる。

## 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。



### 3.5 中性子物質は固いのか?柔らかいのか?

#### 概要

原子核のバルクな性質を考えると、密度( $\rho$ )・中性子陽子非対称度( $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ )・エネルギー( $E$ )・温度( $T$ )の関係を表す式を原子核状態方程式(Equation of State, 以下EOS)と呼ぶ。下記に述べるようにここ10年強の研究で非対称度がほぼゼロの対称核物質については理解が進んだ。

現在、興味の対象は中性子過剰核物質に移ってきているが、それは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  $\delta \rightarrow 1$ 、 $\rho \rightarrow \infty$  という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。EOS と中性子星の半径-質量曲線はTOV 方程式で一意に結びつける事ができる。つまり観測された中性子星の情報から逆にEOS へ制限を与える事ができる。

#### 最近の進展

最近、 $\rho \sim 0$ 、 $T \rightarrow \infty$ の極限(図10の赤い矢印)での状態の研究がRHIC・LHC 加速器を用いて発展し、大きな成果を上げつつある。一方で、 $T \sim 0$  でのEOS(図10の密度-対称度面)は  $\rho$  と  $\delta$  によって以下の様に記述される：

$$E(\rho, T=0, \delta) = \epsilon(\rho, \delta=0) + S(\rho)\delta^2$$

このうち、 $\epsilon(\rho, \delta=0)$  は、飽和密度( $0.17 \text{ fm}^{-3}$ )、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  $\alpha$  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12中の  $\delta = 0 (N=Z)$  の線の様になることが分かっている。一方原子核対称度( $\delta$ )に依存する最低次の項である  $S(\rho)\delta^2$  は、対称エネルギーと呼ばれる。対称エネルギーに関する研究は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11に現在得られている情報から得られているEOSの例を示す。

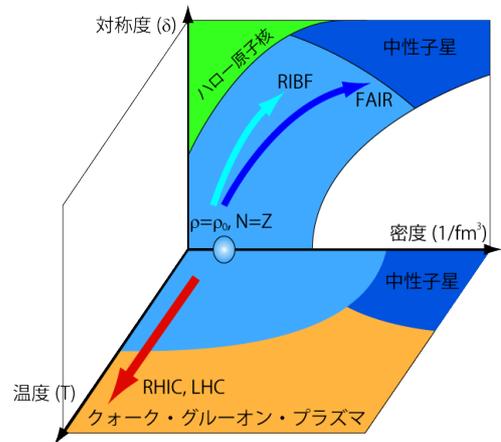


図 10：物質相概観図(想像図)。

今後は  $\delta$  の大きな領域を探索していく

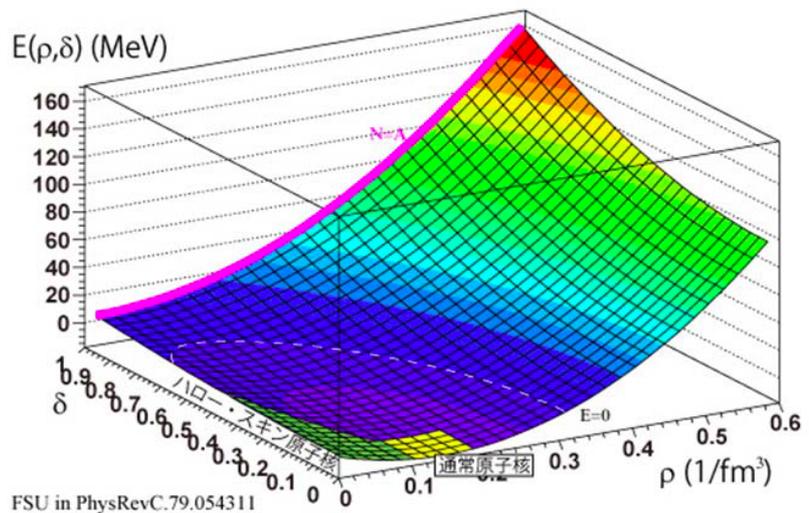


図 111：状態方程式の例 [Pie09]。FSU と呼ばれるハイペロン構造を考慮していないもの。  $N=A$ 、 $\rho \gg \rho_0$  の領域については外挿で、不確実性が大きい。

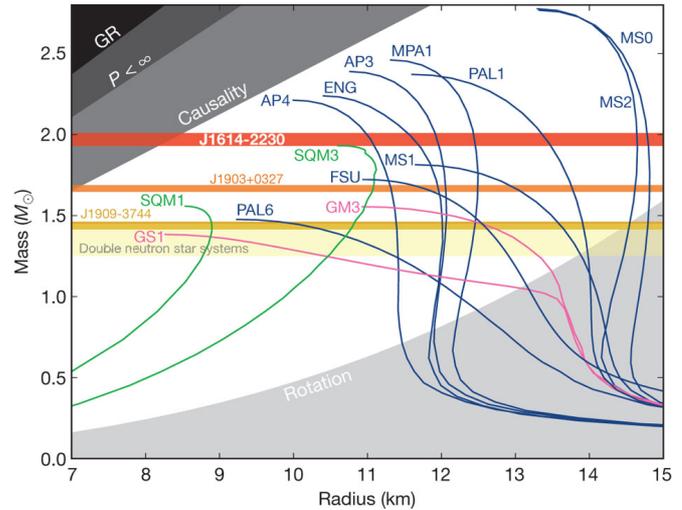
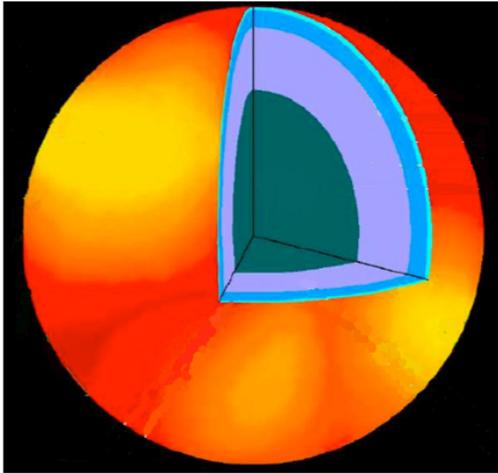


図 12: (左図)中性子星の内部構造。外側から内側に向かって密度が上がり多彩な構造が存在すると考えられている。(上図) 様々な EOS が予想する中性子星の質量と半径。青い線が中性子からのみの場合、紫の線がハイペロン構造を考慮した場合、緑色の線が内部構造がクォークの場合を示す。[Dem10]

また一方、観測により2010年10月質量が太陽の約2倍である中性子星(図12中のJ1614-2230)が報告された[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10年

究極的には $T$ 、 $\rho$ 、 $\delta$ 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の確立を目標とした実験的研究が展望される。

以上をふまえ、これから将来的に実験的研究が望まれる問題を以下にあげる。

### 1) 核構造実験による 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、もしくはハロー構造に存在する希薄な領域 $\rho < \rho_0$ である。この密度領域で $\delta$ を変数とし、実験的にEOSの研究を進めていくことがこれからの目標となる。核構造実験にてEOSを決定していく上で主な観測量は原子核中の共鳴状態である。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的研究が展望される。特にこれまでPigmy双極子共鳴(PDR)の実験や、中性子過剰核のモノポール巨大共鳴(GMR)はその実験例がほとんどないため、 $\delta > 0$ 領域でのEOSを確立していく為に、これらの測定実験が必要であると考えられる。

長期的にはウランもしくはそれより重い超重原子核における中性子スキン構造の解明が実験における課題として考えられる。この様な超重原子核は一般的に変形核であり、EOSを含めた統一的な理解の為には理論的支持が必須である。

## 2) 重イオン衝突実験による $\delta > 0, \delta \neq \delta_0$ 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が計画されるようになった。特にRIBFでの重イオン衝突で実現されるような系は超新星爆発プロセスの計算で仮定されている  $\delta : 0.25 \sim 0.35, \rho \sim 2\rho_0$  程度の系と同程度であり、RIBFでの実験研究は超新星爆発プロセスに重要な知見を与えると期待される。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プロジェクトが進行している(2014年実験開始予定)。このプロジェクトにより、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と期待される。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衝突実験が考えられており、この実験で $\delta > 0, \rho \neq \rho_0$  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となる。

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と考えられ、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と考えられ、その基礎研究を基に新しいEOSが確立していくと考えられる。ただし実験的にEOSを確立していく為にはハイペロン生成に十分な衝突エネルギーが必要であると考えられ、その為にはRIBF2次ビームの再加速機構等の高エネルギー化が必要である。

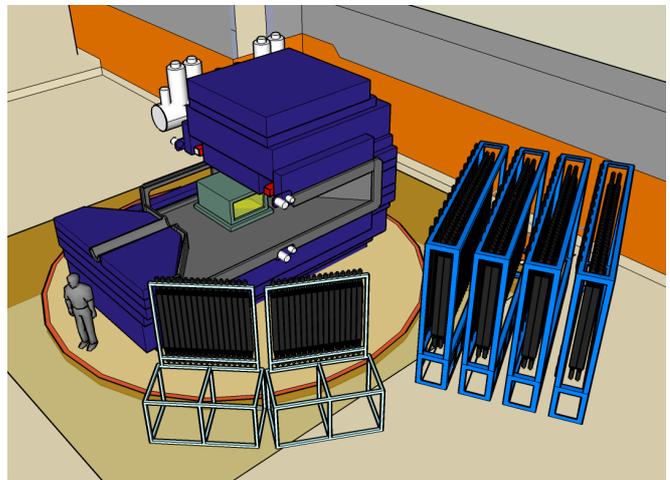


図 13: RIBF の SAMURAI スペクトロメータ。  
中心に緑色で示したのが SAMURAI-TPC。

### 3.6 安定の島は存在し得るのか？ 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か。これまで自然界に存在しない重い元素は、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112番までの元素が国際的に承認され、元素名が付けられている。近年、理化学研究所において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14)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。

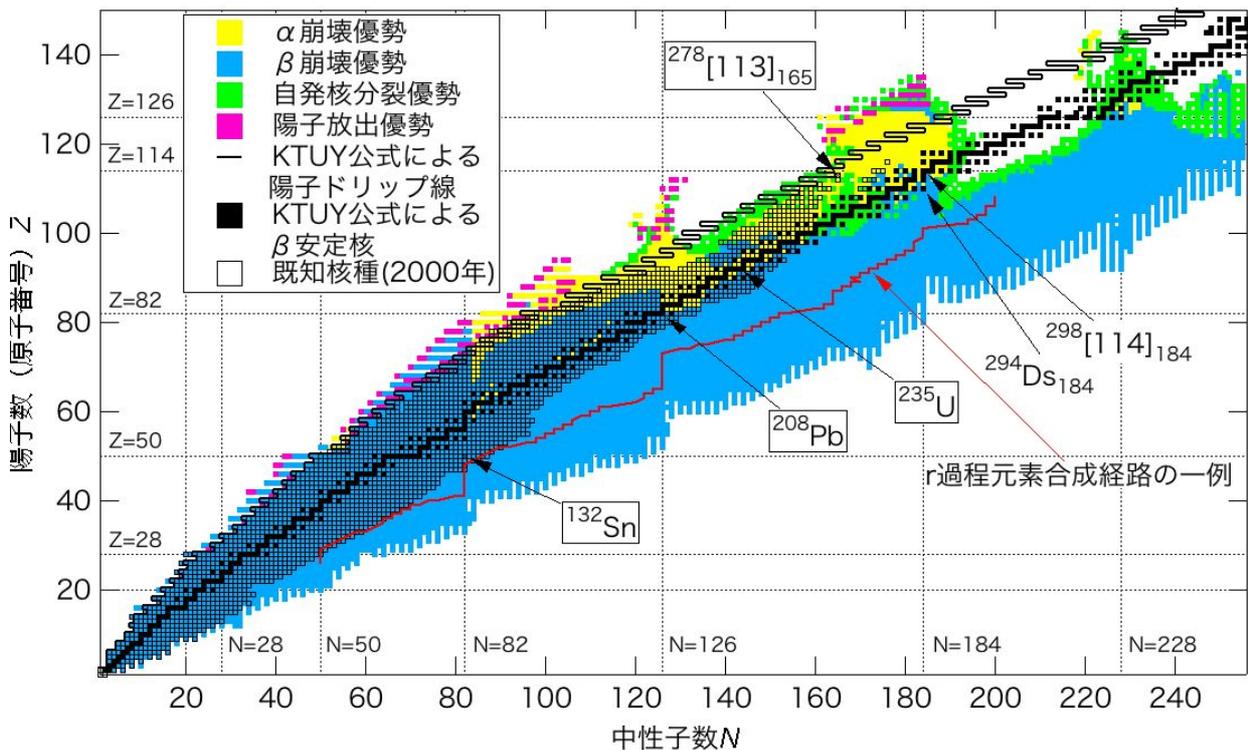


図 14 : KTUY 質量公式による崩壊様式の予想図

#### 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113番元素の合成であろう。理研の重イオン線形加速器からの大強度 $^{70}\text{Zn}$ ビームを $^{209}\text{Bi}$ 標的に照射し、重イオン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、 $\alpha$ 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10年

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」を用いて、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」を用いて行われてきた。しかし、生成断面積は最大でもpb( $10^{-12}$ )～fb( $10^{-15}$ )と極めて小さく、世界最高強度の加速器でも数カ月の実験でわずか数個しか合成でき

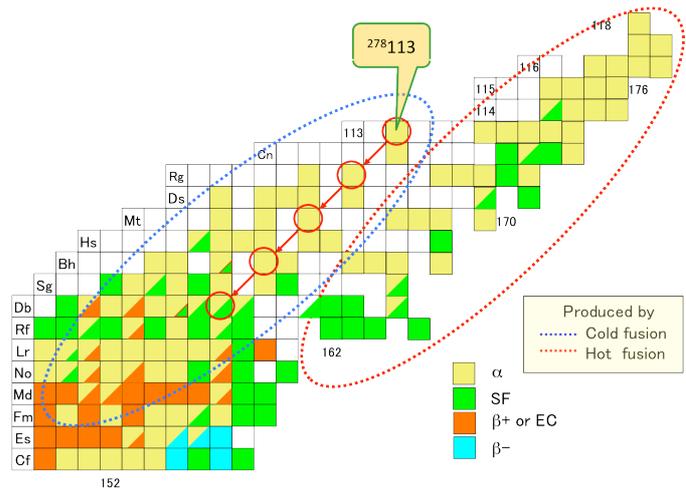


図 15：超重核領域の核図表

きない。この断面積はHiggs粒子の予想生成断面積10-100 pbと比較しても極端に小さい。しかも、最適なエネルギーから数%外れただけで核分裂等のチャンネルに逃れてしまい更に一桁断面積が小さくなる。したがって、大強度ビーム、大強度ビームの熱に耐えうる標的等の実験装置の改善に加えて、入射核、標的核及び、入射エネルギーを適切に選ぶことが極めて重要である。

アクチノイド核との熱い融合反応は、より中性子過剰な超重核を合成できる可能性があるため、理研ではこの熱い融合に特化した性能を持つ反跳核分離装置 (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。今後は、このGARIS-IIを利用した新元素探索ならびに核構造研究が研究の中心的役割を担い、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。また、この熱い融合で合成された核種は中性子過剰であるが故に、その崩壊により既知核へ到達する事が困難であり、崩壊鎖による原子番号質量数の同定が出来ない。さらには、超重核の“安定の島”へ近づくにつれて長寿命となっていく。今後はこれまでの $\alpha$ 崩壊による核種同定法に代わり、崩壊を待たずとも原子核の原子番号と質量数を直接測定する新しい手法 ( $\Delta E$ -E法, GARIS+IGISOL 法, GARIS+TRAP法, 特性X線観測) が主要な研究手法となり、手法の発展に伴い広大な超重核領域の開拓が大きく進むと期待される。

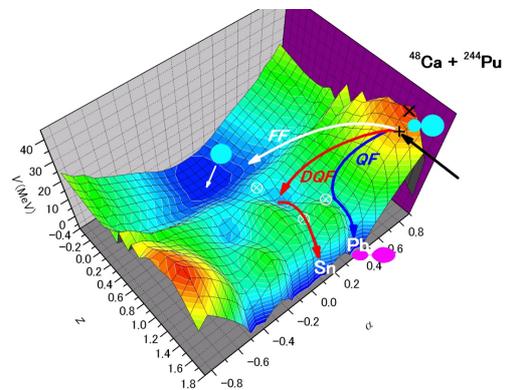
### 113番元素命名への道

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  $^{266}\text{Bh}$  および  $^{262}\text{Db}$  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な展開が期待できる。超重核の寿命や $\alpha$ 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、 $\alpha$ 崩壊核分光と isomer- $\alpha$ 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、動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・ブー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。

### 将来プロジェクト

原子数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。これについては最終セクションで述べる。これらのシステムが確立すれば、 $Z=100-120$ 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。

### 3.7 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は、稀少な安定同位体の  $(n, \gamma)$  断面積、閾値近傍での  $(\gamma, n)$  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の直接測定が達成されている。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寿命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 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。

RIBF では、

- ・ RI ビーム停止実験による  $\beta$  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、 $(n, \gamma)$  反応を模倣する逆運動学 (d, p) 反応



を用いた ANC 法により導出される。

(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  $\mu$  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。

また iii)については、九州大学グループによる反跳核測定法および KEK グループによる即発ガンマ線測定法を用いた実験が重心系 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 ( $\gamma$  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 ( $np$  過程) が最近提案された [FRO06, PRU06, WAN06, WAN11]。

$\nu p$  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  $p(\nu_x, x)n$  反応により中性子も供給される。 $\nu p$  過程の流れを調べるには  $\beta$  崩壊半減期、陽子過剰核の  $(p, \gamma)$  反応と  $(n, p)$  反応の断面積が必要である。 $\nu p$  過程の経路上には、半減期が長く  $(p, \gamma)$  反応の  $Q$  値が小さいかまたは負の滞留点近傍核 ( $^{56}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ge}$ 、 $^{68}\text{Se}$ 、 $^{72}\text{Kr}$  等) があり、それらの反応率が最も重要である。 $(p, \gamma)$  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  $(^3\text{He}, d)$  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。

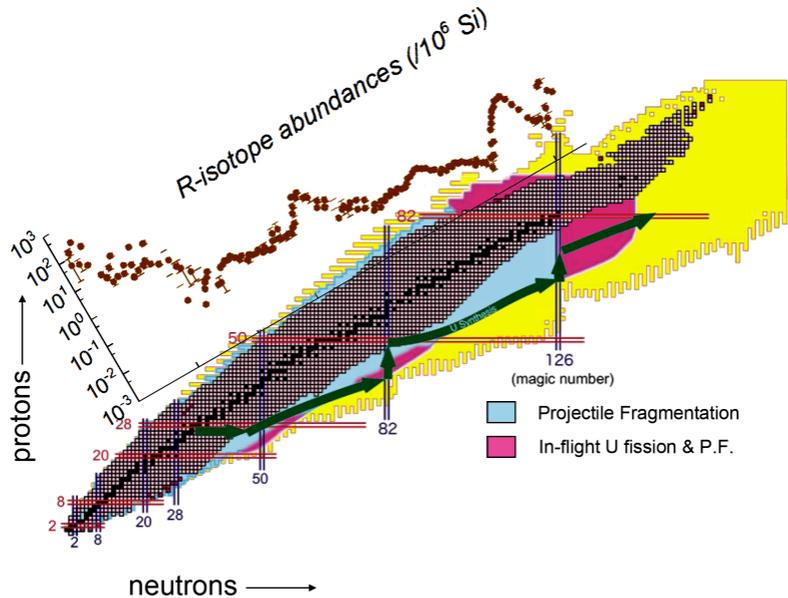


図 16: グリーン; 予想される  $r$  過程経路。ピンク・ライトブルー; RIBF で 1 個/日以上生成率が期待される核種。

### 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

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 $\beta$ 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り、爆発モデルにも影響を与えると考えられる。

一方で、第3ピーク周辺の中性子過剰核は核分裂や破砕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 $^{136}\text{Xe}-^{196}\text{Pt}$ 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。



### 将来展望

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) イベントごとの観測データから、爆発パラメータの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という超強磁場中で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。

#### 4. まとめ --- 新施設で存在限界に挑む ---

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 17 にまとめる。

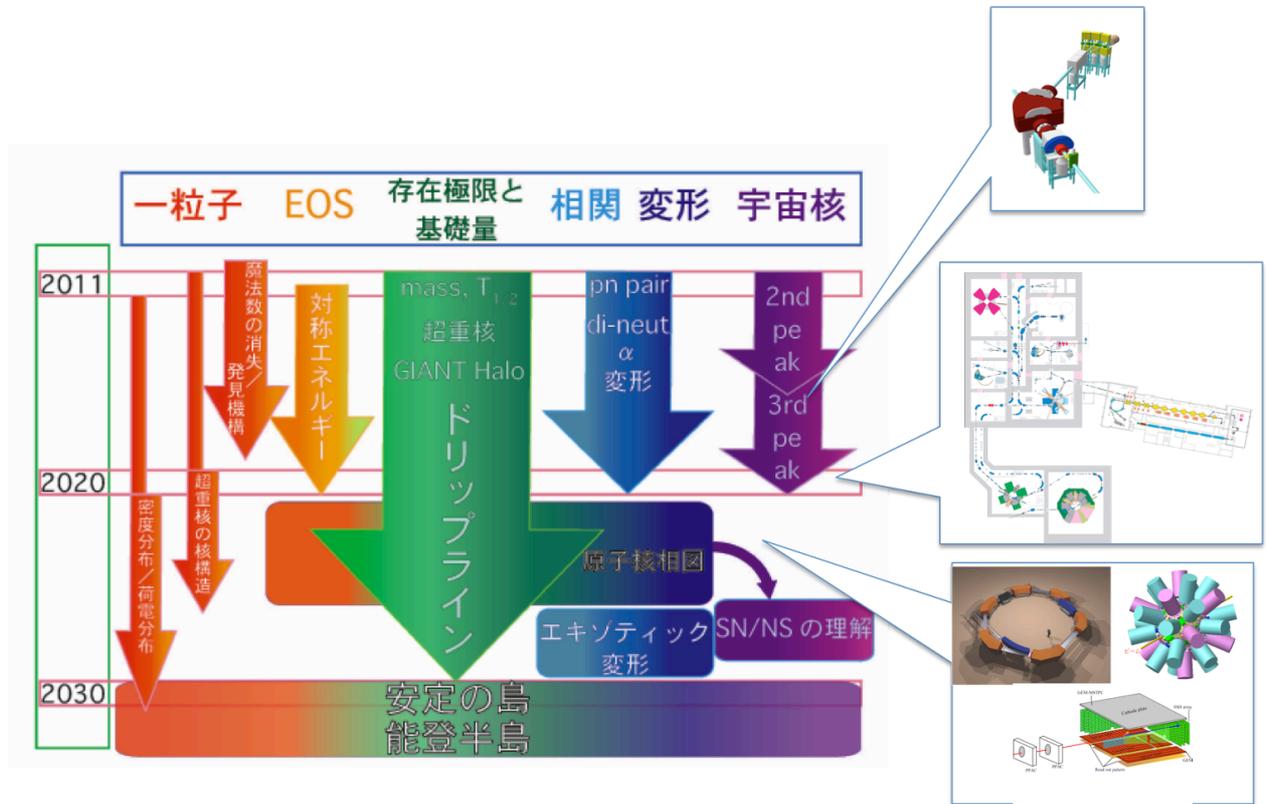


図 17:不安定核研究タイムライン

## 5. リソース

### 関係する研究者概数

RIBF 500 人(国内 400+国外 100)

RCNP EN コース 30 人

HIMAC

原研タンデム 30 人

NewSUBARU 6 人

J-PARC 7 人

停止低速 RI の会 120 人(他とオーバラップあり)

### 予算規模 (RIBF に限る)

RI ビーム発生系建設費 440 億円

基幹実験設備 37 億円(18 億円程度をさらに要求中)

運営費 年間 30 億円

## 7. ワーキンググループメンバー

### 実験

青井考	AOI Nori	阪大 RCNP (代表)
上坂友洋	UESAKA Tomohiro	理研 (副代表)
今井伸明	IMAI Nobuaki	KEK (副代表)
浅井雅人	ASAI Masato	JAEA
古川 武	FURUKAWA Takeshi	東北大
井手口栄治	IDEGUCHI Eiji	東大 CNS
磯部忠昭	ISOBE Tadaaki	理研
岩佐直仁	IWASA Naohito	東北大
加治大哉	KAJI Daiya	理研
光岡真一	MITSUOKA Shinichi	JAEA
宮下裕次	MIYASHITA Yuji	理研
森本幸司	MORIMOTO Kouji	理研
王惠仁	ONG Hooi Jin	阪大 RCNP
大津秀暁	OTSU Hideaki	理研
大田晋輔	OTA Shinsuke	東大 CNS
嶋達志	SHIMA Tatsushi	阪大 RCNP
寺西高	TERANISHI Takashi	九大
炭竈聡之	SUMIKAMA Toshiyuki	理科大
上野秀樹	UENO Hideki	理研

### 理論

延與佳子	KANADA-EN'YO Yoshiko	京大 (副代表)
山上雅之	YAMAGAMI Masayuki	会津大

### 世話人

中村隆司	NAKAMURA Takashi	東工大
------	------------------	-----

### 連絡先:

この報告書に関するコメントは以下のワーキンググループメンバーのメーリングリストまでお願いします。( \_at\_ を@に置き換えてください。)

[mailto: np-lrp-usn\\_at\\_ribf.riken.jp](mailto:np-lrp-usn_at_ribf.riken.jp)

## 参考文献

- [Dem10] P.B. Demorest et al., *Nature* 467 (2010) 1081.
- [FR06] C. Frohlich et al., *Astrophys. J.* 637, 415 (2006).
- [KOU05] 小浦寛之、橘孝博、*日本物理学会誌*60、No. 9, (2005), p.717-724.
- [Nak06] T. Nakamura et al. *PRL*96, 252502(2006).
- [NIS11] S. Nishimura et al., *Phys. Rev. Lett.* 106, 052502 (2011).
- [Pie09] J. Piekarewicz et al., *PRC* 79 (2009) 05431.
- [PRU06] J. Pruet et al., *Astrophys. J.* 644, 1028 (2006).
- [WAN06] S. Wanajo, *Astrophys. J.* 647, 1323 (2006).
- [WAN11] S. Wanajo, H.-T. Janka and S. Kubono, *Astrophys. J.* 729, 46 (2011).