RIBF の物理

RIBF 理論研究推進会議

目次

はじめに 3
陽子・中性子数の人工的制御によって、原子核の新しい形態を明らかにする 6
様々な陽子・中性子密度における核物質の新しい相とダイナミクスを探索する 14
元素の起源と宇宙の核現象を理解する 19
超重核に挑戦する 27
微視的核子多体論を体系化し、未知領域を予言する 32

前書き

新世代の RI ビーム実験施設である理研 RI ビームファクトリー (RIBF) が 2007 年に稼働を開始した。これにより、全質量数領域で数百種を越える不安定核が新たに生成可能となると期待される。世界をリードするこのような新展開が進む中、RIBF で期待される物理に対して、実験研究と密接な連携のもとに発展する原子核理論の目標を明らかにし、近隣分野の研究者や、この分野で今後研究を行う大学院生などへの情報発信を目的に、このレポートを作成することにした。

本レポートは 2008 年にはほぼ現在の形になっていたが、諸事情により公開が遅れたことをここに申し添える。

RIBF 理論研究推進会議メンバー

板垣 (基研)、宇都野 (JAEA)、延与 (京大)、緒方 (阪大 RCNP)、小野 (東北大)、小濱 (理研)、櫻井 (東大/理研)、中務 (理研)、萩野 (東北大)、本間 (会津大)、松尾 (新潟大)、望月 (理研)、矢花 (筑波大)

1　はじめに

原子核物理学は、強い相互作用が働く量子多体系であるハドロンや原子核を対象とする学問分野である。19 世紀末に放射能が発見されて以来、原子核物理学は、核図表のハイゼンベルグの谷に沿う自然界に安定に存在する核種を主な対象として発展してきた。1980 年代に核破砕反応を利用した不安定核２次ビームによる実験的研究が始まり、研究のフロンティアは、中性子数と陽子数が大きく異なる不安定核に拡大した。RIBF では、核図表の極めて広範な領域で、陽子数と中性子数を自由に選択して原子核の研究を行うことが可能となる。このような不安定原子核に関する研究の発展のもとで、原子核の理論研究は以下の２つの方向に大きな発展が期待できる段階を迎えている。

- **核子多体系としての原子核の多様な存在様式を、より基本的なレベルから理解すること**
  陽子数と中性子数を様々に組み合わせた広範な核図表領域にある原子核を探究し、その多様な存在形態を明らかにする。そして、これまで安定な核種に対する精緻な研究の蓄積により構築されてきた原子核の理解を再検討し、安定核を特別な場合として包含し全核図表領域に対する原子核の統一的な描像を構築する。

- **元素の起源と創成を解明すること**
  中性子過剰核の探求により、超新星爆発が舞台となる r 過程をはじめとする元素合成過程を解明し、自然界に存在する元素の起源を明らかにする。また、新元素を実験室で創る超重核への挑戦に呼応し、次の安定な魔法数を予言し超重核の生成と崩壊のメカニズムを探る。

1.1　原子核物理と不安定核

以下ではまず、不安定核研究を中心に原子核物理学の現状を述べる。強い相互作用の基本法則は、クォークとグルオンを基本自由度とする量子色力学 (QCD) である。しかしクォークの閉じ込めに代表されるように、強い相互作用は低エネルギーで非常に強い相関を示すことから、原子核を QCD から直接記述することは未だ成功していない。また、それは困難であるだけでなく、核子多体系の理解において適切なアプローチであるとは限らない。QCD が発見されるはるか以前から、原子核は、核子（陽子と中性子）を基本粒子とし、核力により相互作用をする量子多体系として記述されてきた。原子核の結合エネルギーは核子や中間子の質量よりもはるかに小さいことから、核子を自由度とする原子核は主に非相対論的な量子論を用いて記述される。さらに原子核は、結合エネルギーよりもはるかに小さいエネルギースケールで、超流動性やクラスター相関、平均場が対称性を破ることに伴う集団運動など、多様で興味深い多体相関を示す。

核子自由度から原子核を記述する出発点となるのは核力に関する知識である。クォークの複合粒子である核力の遠距離部分は、湯川により提唱された中間子交換により説明される。核力の最も長距離な部分はπ中間子の交換に起因するが、π中間子の擬スカラー性のため、強い非中心力（テンソル力）をもたらしている。一方、核力の短距離部分には強い斥力芯がある。また核力は、核子のスピン・アイソスピン、核子間の相対角運動量など、２核子間の量子状態にも強く依存している。原子核の定量的記述には、更に 3 核子に作用する力 (3 体力) も必要である。このような複雑な相互作用の性質は、原子核に他の物質系にはない豊かでユニークな性質をもたらしている。核子多体系として原子核を記述する微視的多体理論は長い歴史を持ち、様々なレベルでの模型空間や有効相互作用を用いて、高度な (精緻で高精度な) 理論体系として著しい発展を遂げて来た。しかし、現実的な核力から出発して定量的に原子核を記述することは、現代でもなお挑戦的な課題であり、ごく軽い原子核を除けば第一原理から原子核を包括的に記述できる水準に達していない。

初期の原子核研究は、自然界に見いだされる 250 種ほどの安定な原子核を対象に、その基底状態と素励起モードに対して行われてきた。図 1 の中心を走る黒い線はハイゼンベルグの谷と呼ばれる安定

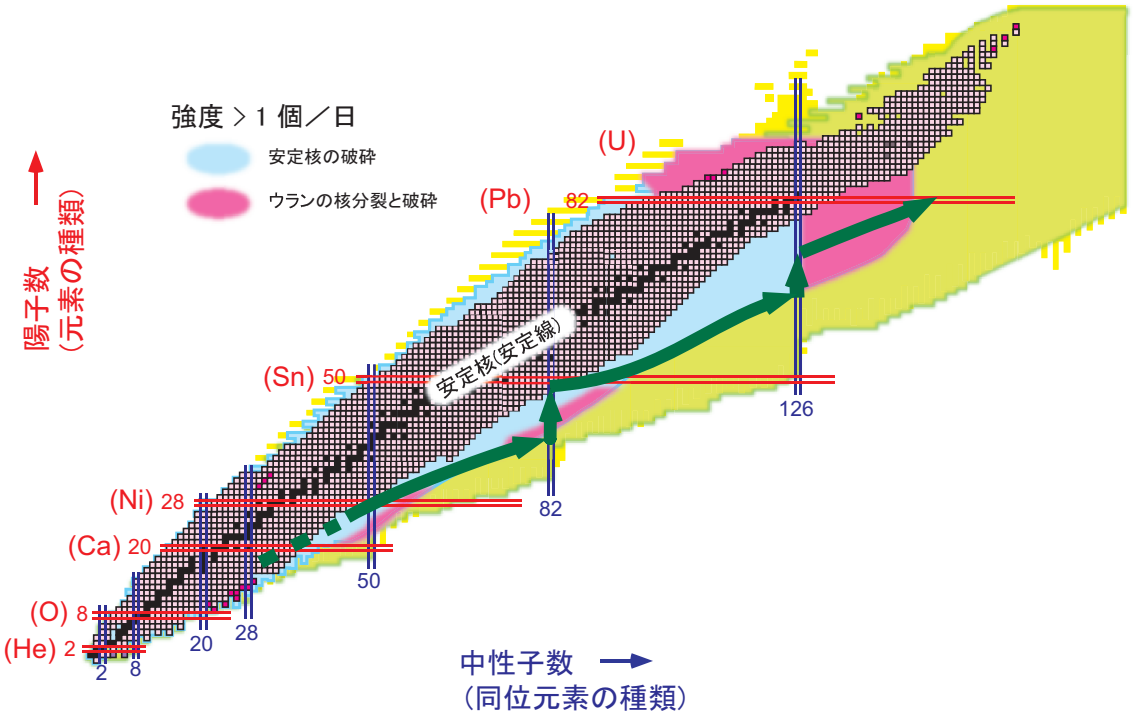

図 1: RI ビームファクトリー計画での破砕反応によって 1 個/1 日以上の強度で生成できる原子核 (水色および桃色の領域)。緑の線が元素生成過程の 1 つである r 過程の予想経路を示している。理化学研究所仁科加速器研究センター HP [http://www.nishina.riken.go.jp/research/nucleus.html] より。

核である。1960 年代以降の重イオン加速器実験の進展により、原子核の実験的な探求は、安定核の基底状態近傍から、様々な極限状態—高温・高密度な原子核、高速回転する原子核—へと拡大した。1980 年代半ばからは、重イオン破砕反応を用い、陽子数と中性子数がアンバランスでベータ崩壊に対して不安定な原子核の研究が発展している。これにより、従来陽子数と中性子数が一定の比率になるハイゼンベルグの谷に限られていた原子核研究から、陽子数と中性子数を自由にコントロールした研究へと展開している。

強い相互作用のもとで安定な核種は、自発性核分裂核種も入れると約 1 万と推定されている。これらのうち、約 3 千は既に実験室で人工的に生成されている。現在までに多数の RI ビーム実験施設が稼働し、核子数が数十程度までの不安定原子核に関する研究が行われてきた。軽い原子核領域に限られているものの、ドリップ線に到る (N, Z) 面内のあらゆる核種を研究の対象とすることで、多くの新現象が見いだされている。中性子ドリップラインに近づいた原子核に共通して見出された、原子核表面を覆う低密度の中性子物質（中性子ハローや中性子スキン）の出現は、その一例である。その結果、原子核の基本的な性質と考えられていた結合エネルギーや密度の飽和性は、ハイゼンベルグの谷の近傍の安定核に限り成り立つものであることがわかった。質量数が 20 ～ 40 程度の軽—中程度の質量数領域では、従来安定核で確立していた魔法数が中性子数とともに変化することが見いだされている。核子の閉殻構造を反映する魔法数は、原子核構造を理解する上で最も基本的なものであり、元素の起源に関する理解にも影響が大きい。

このように、これまでになされてきた不安定核への展開によって、核子多体系の存在形態は以前考えられていたよりもはるかに多様で豊かであることが明らかになっており、さらに今後新たに実験的で生成される不安定核の探求によって、今までに知られていない新たな現象を発見することができると強く期待されるのである。理論的には、安定核を特別な場合として包含し全核図表領域に対する原子核

の統一的描像を構築することが今後の大きな課題となる。

原子核の存在極限の１つが超重核であり、長寿命の新元素生成は我々にとっての大きな挑戦である。我が国でなされた $Z = 113$ 新元素の発見は記憶に新しい。超重核の生成や構造を理解する上で、超重核領域の魔法数を明らかにすることが重要である。これまで $Z = 114$, $N = 184$ が提案されているが、未だ確定していない。現在見いだされている $Z = 100$ を超える超重核はそのほとんどが短寿命であるが、閉殻構造を持つ長寿命の超重核が見いだされれば、超重核化学が飛躍的に発展する期待もある。

上述の物質科学としての原子核物理学の発展に加え、宇宙の進化を探る研究においても、原子核物理の果たす役割は重要であり、新たな核反応断面積のデータが、そのシナリオを書き換えることもありえる。現在地球上に存在する全ての原子核が、現在に至る様々な宇宙の歴史の中で、どこでどのように生成されたのかという問いが、元素起源の問題である。宇宙初期のビッグバンでは、リチウムやベリリウムまでの軽元素だけが生成され、炭素以上の重元素が生成されたのは、主に恒星の中心で進む核融合反応と大質量星の終末に起こる超新星爆発であると考えられている。後者は「速い (rapid) 過程」の舞台と考えられており、そこでは中性子過剰な不安定原子核が重要な役割を果たしている。さらに超新星爆発の後に残る中性子星は、自然界に唯一存在する巨視的な核物質である。このような宇宙で起こる原子核現象を理解し元素の起源を明らかにすることは、現代の原子核物理の重要な課題となっている。

1.2 概要

実験研究と密接な連携のもとに発展する原子核理論の目標を明らかにするため、我々は RIBF における挑戦的な課題を以下の 5 つに分類した。その詳細は、以下の各章に述べられている。

1. 陽子・中性子数の人工的制御によって、原子核の新しい形態を明らかにすること

   陽子数と中性子数に励起エネルギーを加えた３次元空間の中で、原子核構造の多様な存在様式を探る。そして、安定核に関する理解から得られていた従来の原子核像を包含する、原子核の基本的な描像を確立する。

2. 様々な陽子・中性子密度における核物質の新しい相とダイナミクスを探索すること

   密度、温度、陽子中性子比などを制御すると、核物質には様々な相が現れると期待される。特に中性子過剰核の表面には強い２中性子相関の現われが予想されている。また、非対称核物質の状態方程式は、超新星爆発のメカニズムや中性子星の構造などにも密接に関係する。

3. 元素の起源と宇宙の核現象を理解すること

   中性子過剰核の質量、寿命、核反応断面積などの測定により、宇宙における元素生成過程を定量的に理解する。さらに、中性子過剰核の核構造や原子核衝突から得られる核物質の情報や、精密な核反応理論により、宇宙進化の理解に貢献する。

4. 超重核に挑戦すること

   不安定原子核の極限に位置する超重核の生成に向けた理論的な取り組みを行う。質量公式や平均場計算の精緻化により新たな魔法数を確定し、核子の自由度からミクロに融合と反応を記述する理論を発展させる。

5. 微視的核子多体論を体系化し、未知領域を予言すること

   未知の核種の構造と反応を予測し、宇宙における核現象を記述するために、高精度な予言力を持つ理論の発展が不可欠である。発展の続く計算機能力を背景として、第一原理計算を始めとする、構造・応答・反応の理論を発展させる。

2　陽子・中性子数の人工的制御によって、原子核の新しい形態を明らかにする

原子核は、核子を構成要素とする有限量子多体系である。核子はアイソスピン量子数により区別される 2 成分—陽子と中性子—からなり、核子の間に働く核力は、スピン・アイソスピン依存性と強い斥力芯を持つ。このような特徴を持つ核力で束縛した原子核には、他のフェルミ粒子多体系に見られないユニークで豊かな構造が生み出されている。

核図表のハイゼンベルグの谷に沿って分布し自然界に安定に存在する原子核は、密度とエネルギーの飽和性を示す。($\rho \approx 0.17$ fm^{-3}、$E/A \approx S_{n,p} \approx 8$ MeV) 飽和性は、強い斥力芯と中間子交換に伴う短距離の引力を合わせ持つ核力の特徴に起因するものであり、原子核構造を特徴づける最も基本的な性質である。結合エネルギーの飽和性の帰結として、原子核の全結合エネルギーに比べごくわずかなエネルギーを原子核に加えることにより、原子核の形を球形から歪ませたり、1 つの原子核を複数の小さな原子核に分解することが可能になる。この性質のために、原子核の基底状態や低励起状態には、核表面の変形や多粒子相関の働きによる多様な構造が現れることが明らかにされてきた。このような核構造の理解は、主に安定核を対象とする長年の研究の蓄積から得られたものである。では、ハイゼンベルグの谷（安定線）から大きく離れた原子核では、どのような相関が働き、どのような構造が現れるのだろうか？安定核の基本的な性質である飽和性は、不安定核を理解する上でも同じ役割を果たすのだろうか？核力の特徴である強いスピン・アイソスピン依存性や非中心力の効果などは、ハイゼンベルグの谷を離れた不安定核で、安定核とは異なる相関や運動をもたらすのではないだろうか？

図 1 に示したように、RIBF における実験では広範な (N, Z) 平面の原子核が研究の対象になる。陽子数と中性子数が大きく異なる不安定核では、これまでも軽い核種を中心に様々な新しい構造や現象が既に見出されており、RIBF ではこのフロンティアが中重核領域に向けて大きく拡大する。また、原子核の基本的な性質を理解する上で、2 次元の核図表にエネルギー $[E]$ を加えた (N, Z, E) の 3 次元空間で現象を捉えることが大切である (図 2)。図 3 は、陽子数 Z と中性子数 N の平面図において、また、図 4 は陽子数 Z と中性子数 N の差 $N - Z$ と励起エネルギー E の 2 次元面内で、原子核に現れる構造とダイナミクスを示している。RIBF の稼動により得られるデータから新しい構造を現象を解明し、また上に述べた原子核の基本的な性質に関する疑問に答えることが、理論研究者に託された重要な課題となっている。以下に、その内容を要約しよう。

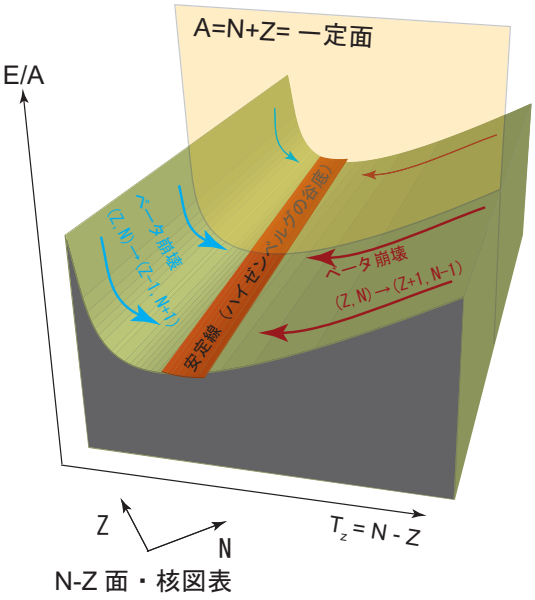

図 2: 陽子数 (Z)、中性子数 (N)、励起エネルギー (E) の 3 次元空間で見た原子核の世界。(N, Z) 面、$A = N + Z =$ 一定の面をそれぞれ図 3、4 に示す。

まず、原子核中の最も基本的な運動である核子の一粒子運動が (N, Z) 面内でどのように変容するのか、特に一粒子運動を直接反映する魔法数が (N, Z) 面内でどのように現れるのかは、最も基本となる課題である。これまでの軽い質量数領域での研究から、中性子過剰核では従来知られていたものとは異なる魔法数が現れ、また安定線から離れた領域に「反転の島」(Island of inversion) と呼ばれる魔法数の破れた領域の存在が明らかにされてきた。次に、安定線から離れ陽子数と中性子数の差が増すにつれ、陽子と中性子のフェルミエネルギーの差が拡大し、中性子過剰核では中性子の弱束縛系としての性質が顕著になる。軽い核で系統的に見出されたハロー構造が中重核の領域でどのように現れるのかは、興味深い問題である。1 粒子運動のエネルギー準位の構造は、原子核の形状に密接に関わる。中重質量数領域の陽子過剰核では、原子核に大きな角運動量を与えることで「超変形」(superdeformation)

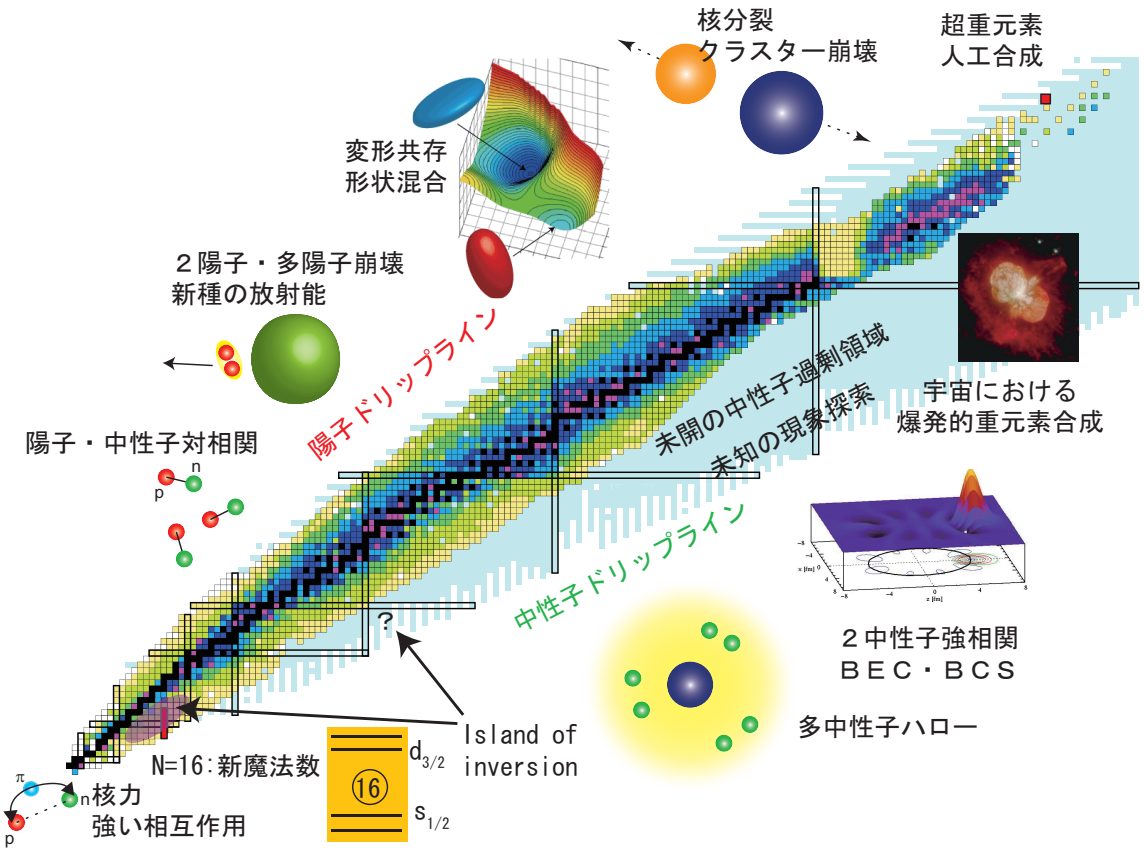

図 3: 陽子数 (Z)、中性子数 (N) の 2 次元空間における原子核の世界。核図表は、LBNL Isotopes Project Nuclear Structure Systematics HP [`http://ie.lbl.gov/systematics.html`] より。

状態が系統的に現れることが明らかにされてきた。超変形状態や、変形度のより大きな形状を持つ原子核、軸対称性を破るエキゾチックな変形などが、(N, Z, E) の 3 次元空間で捉えたときにどのように現れるのか興味が持たれる。(N, Z) 面内の一粒子運動の変容は、原子核の素励起モードに影響をもたらす。安定核では陽子と中性子の分布は強く結びついていたが、不安定核では陽子または中性だけの集団運動が可能になるか？低エネルギーの双極モードに現れるピグミー共鳴の正体は何か？既知の素励起モードを (N, Z) 面内で系統的に理解するとともに、未知の励起ダイナミクスを探索し解明することが重要な課題となる。

強く相関した多体系である原子核では、独立粒子運動では理解できない様々な多粒子相関が現れる。この多核子相関を、(N, Z, E) の 3 次元空間で捉えることにより原子核構造の理解を深め、また陽子数と中性子数が大きく異なる領域で現れる新たな多核子相関を探ることが重要な課題である。陽子・中性子の数がアンバランスになることで出現する隠されていた相関はないだろうか？安定核では閉殻構造を持たない原子核の多くは対相関による超流動性を示すが、不安定核でこの対相関はどのように変化するか？軽い安定核の励起状態には、多様なクラスター構造が現れる。弱く束縛した中性子群が存在する環境下では、クラスター相関はどのように現れるのだろうか？これらは次章で述べる、非対称核物質の性質とも関係する課題である。

最後に、原子核が (N, Z) 平面内で一体どこまで存在するのか？この問いに答えるためには結合エネルギーの正確な評価とともに、不安定核の様々な崩壊様式と分岐比、そして崩壊確率を正確に見積もることが必要とされる。また陽子過剰核では、従来知られていたアルファ崩壊、自発核分裂に加え、陽子を放出する過程が見出されている。さらに、複数の陽子が相関を持って崩壊する可能性が示唆されるなど、安定核では見られない崩壊様式と、そのメカニズムに興味が持たれている。

このように、陽子数 Z、中性子数 N、そして励起エネルギー E からなる 3 次元の空間 (N, Z, E) に

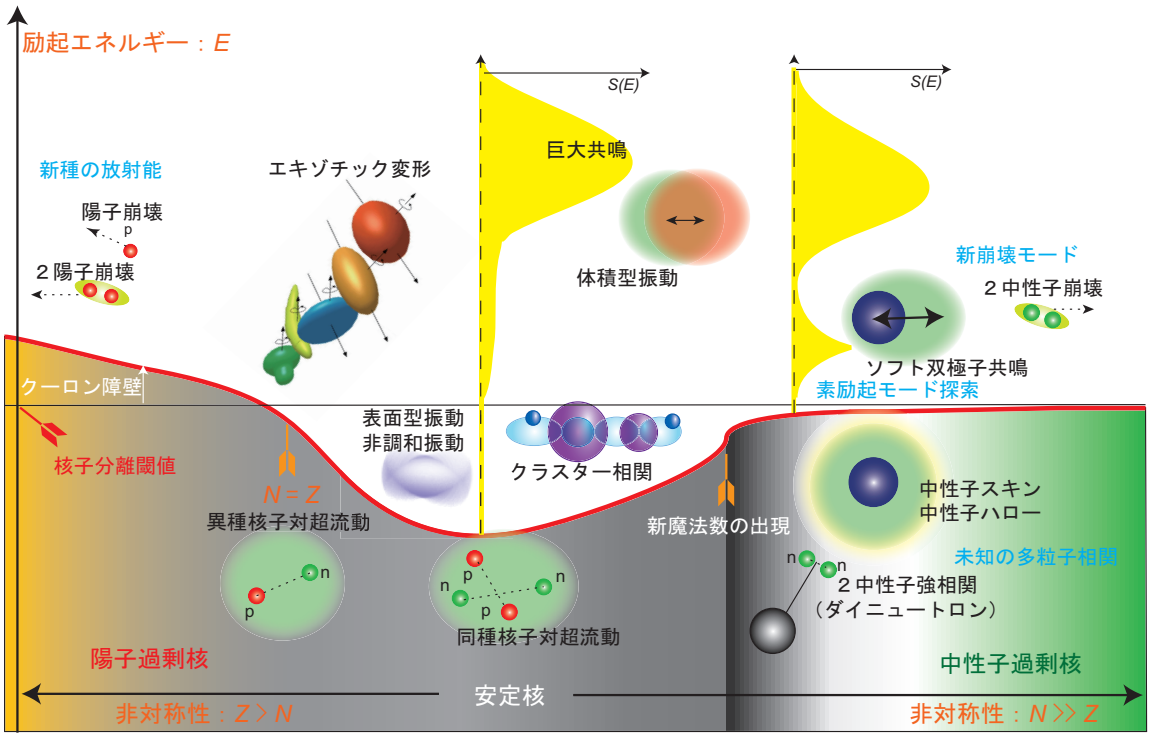

図 4: アイソスピン ($T_z = N - Z$)、励起エネルギー (E_x) の 2 次元空間 (質量数一定) における原子核の世界。

わたり原子核の構造と励起を俯瞰的に調べることにより、従来の安定核に対する研究がもたらした原子核に関する基本的な認識を深化させ、さらに不安定核に現れる新たな現象を明らかにする[1]。

2.1 殻構造の進化と新魔法数を明らかにする

原子核内の 1 粒子運動は核構造を理解する上で最も基本的な運動であり、原子核の様々な性質を理解する基礎となる。陽子数と中性子数が大きく異なる領域で、1 粒子運動が安定核の場合からどのように変化するのか、その変化のメカニズムは何か、そして安定核とは異なる新魔法数は何か？理論の立場から核力が核構造に及ぼす影響を微視的に解明し、(N, Z) 面内での 1 粒子運動の変容を明らかにすることが極めて重要である。

1 粒子運動を記述する平均ポテンシャルは、陽子と中性子が自ら作り出し自己無撞着に決まるものである。平均ポテンシャルの中を陽子と中性子が自由に運動するフェルミ気体描像は、原子核構造を理解する基礎になる。安定核の場合は、はっきりした表面を持つ平均ポテンシャルに強いスピン・軌道力を加えることにより得られる魔法数 $N, Z = 2$、8、20、28、50、82、126 が現れる。この魔法数に一致する原子核は、基底状態で極めて安定になる。例えば Z が魔法数である酸素や鉛などには多くの同位体が存在し、球形の形をしており、最初の励起状態と基底

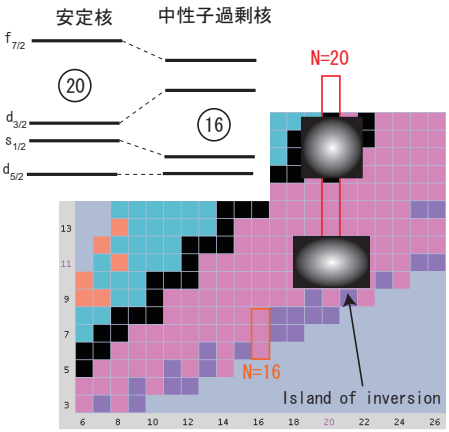

図 5: 「Island of inversion」と呼ばれる領域 (Ne,Na,Mg)。$N = 20$ の魔法数がこの領域では失われ、これらの原子核は変形していると考えられている。魔法数が $N = 16$ に変化している可能性が示唆されている。

[1] ハイパー核の研究では、ストレンジネスという “不純物” を核内に混入させることで生まれる新たな核現象が中心テーマである。陽子・中性子の 2 成分フェルミ粒子系において作り出される現象を正確に理解しておくことは、ハイパー核物理の基礎としても重要である。

状態の間に大きなエネルギー差が現れる。

安定核を理解する上で出発点となる魔法数が、陽子数と中性子数の割合の変化とともに変容することが明らかになりつつある。中性子過剰な Mg アイソトープでは、中性子の魔法数である $N = 20$ に対応する ^{32}Mg が、魔法数の核で予想される球形ではなく大きく変形していると考えられている。これは、実験的に測定された最初の励起状態である 2_1^+,4_1^+ が、異常に低い励起エネルギーと大きな $E2$ 遷移確率を示すことから確認されている。これらのことから、^{32}Mg においては $N = 20$ が安定性を保証する魔法数ではないことを示しており、反転の島 (Island of inversion) と呼ばれている。sd 殻領域では、中性子分離エネルギーの系統的な分析などから $N = 20$ に替わり $N = 16$ が新しい魔法数となっていることが明らかにされている。

このように、ハイゼンベルグの谷から外れるに従い、安定核で既知の魔法数が消失し新たな魔法数が発生するという、進化する殻構造という描像が生まれてきた。このような殻構造の進化は、他の質量数領域でも起こる普遍的な現象なのか?殻構造の消失と発生をもたらす微視的なメカニズムは何なのか？その原因は、中性子数の増大に伴う陽子分布と中性子分布の解離なのか、あるいは核力に特徴的な強いテンソル力などのアイソスピンに依存する非中心力により理解できるものなのか？我々は、RIBF による実験研究と密接に連携し、進化する魔法数の探求とそのメカニズムの解明に取り組む。

2.2 ドリップライン近傍における一粒子運動の変容を解明する

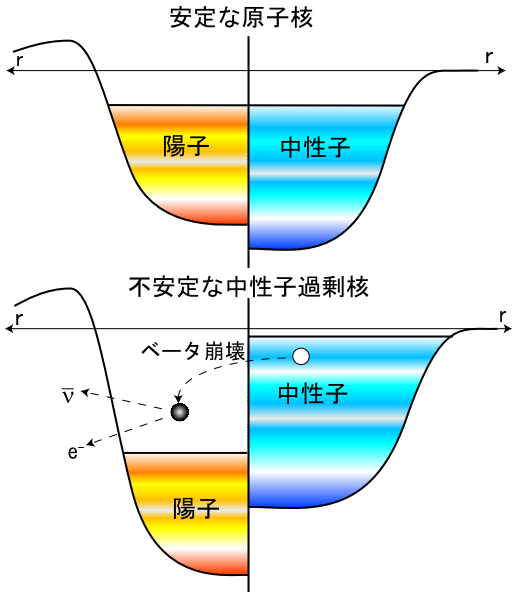

図 6: 安定核 (上) と不安定核 (下) の一粒子フェルミ準位の模式図。

核力は、同種粒子間よりも陽子・中性子間に強い引力が働くというアイソスピン依存性を持つ。このため、中性子過剰な原子核では、中性子（陽子）の平均ポテンシャルは浅く（深く）なる。中性子過剰核での平均ポテンシャルは、おおよそ図 6 のような形状を持ち、陽子と中性子のフェルミ準位には極めて大きなアンバランスが生じる。このため、フェルミ面近傍にある陽子と中性子の一粒子運動に大きな差が現れ、原子核の性質に強く影響することが予想される。

実際、初期の不安定核研究で高い注目を集めた中性子ハローは、中性子のフェルミ準位が分離閾値エネルギーに近付いたときに閾値ぎりぎりで束縛された軌道角運動量の小さい中性子がトンネル効果で核外に大きく滲みだすことを示したものであった。より重い質量数領域で、ハロー構造がどのように現れるか興味が持たれる。一方で、中性子の超流動性が弱束縛粒子の性質に影響を与え、中性子の占有波動関数が逆に核内に閉じ込められる“ 反ハロー効果 ” (anti-halo effect) も予言されている。

一粒子運動の変容がもたらす効果は、束縛エネルギーに対するものだけではない。そもそも原子核は相関の強い量子系であり、一粒子運動が表すものは、裸の核子の運動ではなく多体効果を繰り込んだ準粒子の運動である。この繰り込みを表す多体効果に対して、陽子・中性子の非対称性は強い影響を与える。安定核の一粒子運動を測定値と比較する場合には、注目する核子の運動に対する周囲の核子群の効果を繰り込んだ有効電荷やスペクトロスコピック因子を用いることが必要になるのだが、中性子過剰核では陽子と中性子の相関が弱まり、安定核に比べると裸の値からのずれが大幅に縮小すると推定されている。このような多体相関の変化は、様々な電気・磁気モーメントに及ぶと考えられている。

最近 10 数年の間に発展した $A \sim 30$ の反転の島 (Island of inversion) までの軽い不安定核の研究は、RIBF の稼動によって (N, Z) の広範な領域へと拡大する。より重い不安定核を舞台に、弱束縛 ($\epsilon_F \approx 0$)

であり、かつ陽子と中性子の間でアンバランスなフェルミ準位を持つ状況での一粒子（準粒子）運動を理解することは、原子核構造が (N, Z) 平面の中でどのように変容を遂げるかを明らかにする上で重要な鍵となる。

2.3　一粒子運動と分子的構造の融合と競合を探る

多くの原子核の基底状態は、核子が平均ポテンシャルの中を一粒子運動する独立粒子模型により説明される。しかし軽い原子核の励起状態では、α 粒子など複数の核子が強く束縛したクラスターを作り、それらが弱く束縛する分子的状態が数多く見出されている。特にクラスター分解の閾エネルギーに近い励起状態では、こうした分子的状態が豊富に存在し、軽い原子核構造の主要な存在形態の一つであると考えられている。分子的構造が豊富に現れる理由は、結合エネルギーの飽和性にある。わずかなエネルギーを原子核に付加することにより、複数のクラスターに分解することが可能なため、クラスター相関が重要になる。

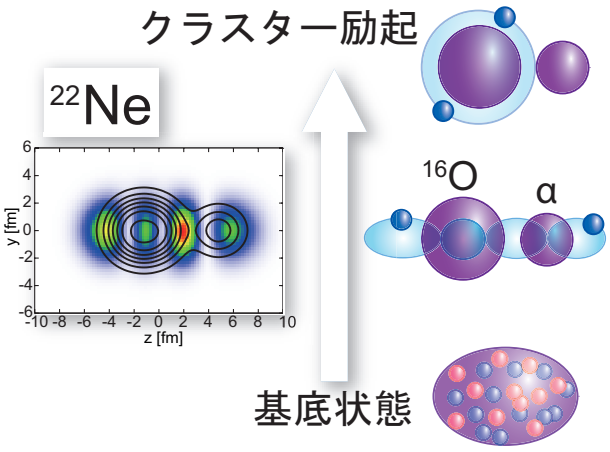

図 7: ^{22}Ne の共有結合分子的励起構造。^{16}O+α クラスターが形成され、二つの余剰中性子が分子軌道に入った状態と ^{16}O の原子軌道に入った状態。

安定核に現れるクラスター状態は、α 粒子などの強く束縛したクラスターが相互に弱く結合して分子的構造（クラスター状態）を形成するという、強弱の相関が混在する構造として理解がなされてきた。この分子的な構造が、中性子過剰核でどのような形で現れるかに関心が持たれてきた。例えば α 粒子に 2 個の中性子が付加した ^{6}He は、ハロー構造を持つ壊れやすい原子核であるが、このような原子核をユニットとするクラスター状態が現れるのか？あるいは弱く束縛する余剰中性子の中で、α 粒子などの強く束縛したクラスターが運動するという描像で理解できる状態はあるのだろうか?

これまでの研究により、中性子過剰な Be アイソトープでは、「クラスター芯＋分子軌道」で記述される分子的構造が見いだされている。これは、2 つの α 粒子からなるクラスター構造が発達し、余剰中性子が分子軌道 (2 α の周りに形成された平均一体場の一粒子軌道) に入った状態である。同様な構造は、中性子過剰な Ne 核などでも予言されている。また、^{12}C に現れる 3 α 状態が余剰中性子により結晶化する現象が ^{14}C などで予言されている。これらは、クラスター芯と一体場的運動をする余剰中性子との共存が重要な役割を果たしている新しいタイプの存在様式である。さらに 3 α の直鎖構造や、^{12,14}C、^{16,18}O などの、より大きなクラスターユニットを持つ分子的構造の探求も重要な課題である。

クラスター構造に見られる空間的な多核子相関は、(N, Z, E) の環境に応じてさまざまに変化する。我々は、一粒子運動と強弱相関を合わせ持つ分子構造の両方を包含する理論を発展させ、原子核構造に対する統一した理解を発展させる。そして、陽子数と中性子数がアンバランスとなる領域で、クラスター構造が安定核からどのように変容していくかを明らかにし、未知のクラスター構造や多粒子相関を発見し、その性質を解明していく。

2.4　新しい核変形とそのダイナミクスを探る

球形が安定となる古典液滴と異なり、量子液滴である原子核は魔法数を持つ核種を除くと、ほとんどが球形から外れた形状をしていることが知られている。回転対称性を持ち孤立した多体系であるにもかかわらず原子核に様々な形が現れる原因は、1 粒子運動による殻効果にある。球対称ポテンシャルの一粒子準位は角運動量による縮退を示し、閉殻構造が魔法数を生む。一方、魔法数以外の核子数を持

つ原子核では、変形したポテンシャルに生じる一粒子準位密度の濃淡により、原子核の全エネルギーが球形の場合より変形した方が低くなる。このような変形したポテンシャル中の 1 粒子軌道はニルソン模型と呼ばれる。回転状態にある原子核では、長軸・短軸の比がほぼ 2：1 となる超変形状態が、いくつかの質量数領域で見出されている。これは、原子核が大きな変形を持つときに 1 粒子軌道に大きなギャップが生じ、変形したポテンシャルの魔法数が現れることにより変形が安定化したものである。さらに軸比が大きく 3:1 となる“ 極超変形 ”(hyperdeformation) とよばれる状態の探索も続いている。変形した原子核では、原子核の形を規定する平均一体場のポテンシャルが元の多体ハミルトニアンの持つ球対称性を破っている。これは自発的な対称性の破れの一例とみなすことができる。

変形ポテンシャルの殻効果は陽子と中性子のそれぞれに対して働くので、陽子と中性子の数を広い範囲で自在に組み合わせることにより、様々な殻効果の組み合わせを持つ原子核を創り出すことが可能になる。2.1 と 2.2 で述べたように、陽子数と中性子数がアンバランスな領域で安定核とは異なる魔法数や殻構造が現れると考えられている。したがって、安定核で見出されていたものとは異なる新たな変形の自由度を持つ構造や、新しい変形領域の出現が予測される。反転の島は、その一例である。さらに、広範な (N, Z) 平面では、例えばバナナ型や正四面体型などの 8 重極変形、さらに重い核種では核中心に穴が空いたような中空型（泡原子核）といった新しいタイプのエキゾチック変形が議論されている。また、超変形状態が安定に出現する核図表上の新領域を発見する可能性も期待されている。

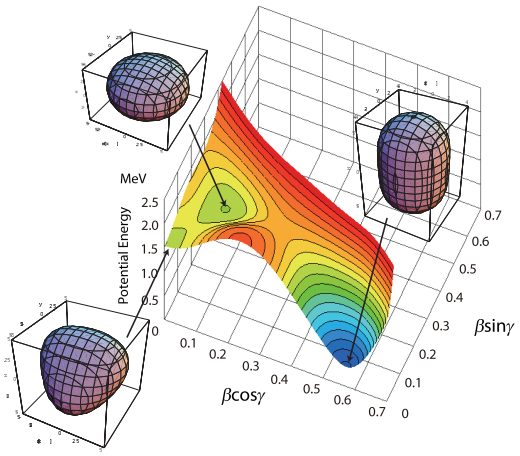

図 8: ^{80}Zr の (β, γ) の 2 次元変形パラメータ空間におけるエネルギー。プロレート、オブレート変形 ($\gamma = 0$ と $60°$) に加えて、正四面体型の変形に対応するエネルギー極小の状態がある。

陽子と中性子を様々に組み合わせることにより、いくつかの形を持った状態がひとつの原子核に発現する、変形共存現象を示す核種も数多く見出されるだろう（図）。また、1．2 で述べた陽子数と中性子数のアンバランスにより、陽子と中性子の密度が分離し、それぞれが異なる変形を持つ可能性も議論されている。これらの変形は、時間とともに変化しない静的なものとは限らない。原子核の形が時間とともに大きく変化する大振幅のゆらぎを伴うものであったり、あるいは異なる形（準粒子の真空状態）の間を量子トンネル現象で行き来する場合もある。このような時間とともに変化する原子核の形を理論的に記述するためには、量子多体系ダイナミクスの理論が必要とされる。量子多体系の形の変化を記述できるこのような理論の構築に向けて、現在、様々な試みが展開している。

原子核の形とそのダイナミクスを、広範な中性子数と陽子数にわたる (N, Z, E) の空間で捉えるときに、どのような領域にどのような形が現れるのか？この問いに答えるため、我々は RIBF における実験と密接な連携を持ち、新たな展開を目指す。

2.5　低エネルギーの素励起モードを理解する

原子核には様々な素励起モードが存在する。全核子が関与する種々の巨大共鳴は、高振動数領域に現れ、一様な核物質の集団励起モードと関連がある。この他に、フェルミ面近傍の核子が関与し、有限系に特徴的な表面振動や変形に伴う回転運動、対相関によって生じる波動関数の位相回転や相対関場の振動運動など様々な低振動数素励起モードが現れることが知られている。安定核における集団運動は、陽子と中性子のフェルミ準位が揃っているため（図 6 上）、励起モードは陽子・中性子の位相がそろったアイソスカラー型と、逆位相のアイソベクトル型のいずれかに分類される。これに対して、中性子過

剰核や陽子過剰核ではフェルミ準位が大きくずれるため（図 6 下）、陽子・中性子流体が分離して運動する新しいタイプの集団運動の存在が示唆されている。

その典型例として、強度の大部分が高振動数領域に集中する巨大共鳴状態で、不安定核では一部の強度が低エネルギー領域に異なるモードとして現れる現象（ピグミー共鳴、ソフト双極子共鳴など）が理論的に予想されている。最近その候補となる状態が観測され注目が集まっている。ピグミー共鳴が中性子分離エネルギー近傍に現れる場合には、宇宙における元素合成の素過程である中性子捕獲断面積にも大きな影響を与えるとの指摘もある。このモードが、中性子スキンの振動であるという予測やスキンの厚さとの強い相関を指摘する説がある一方で、連続状態への崩壊チャネルが開くことによる閾値効果の影響や多核子相関の影響が指摘されるなど、現状ではピグミー共鳴の候補とされる遷移強度の持つ性質に関しては、一致した理解は得られていない。

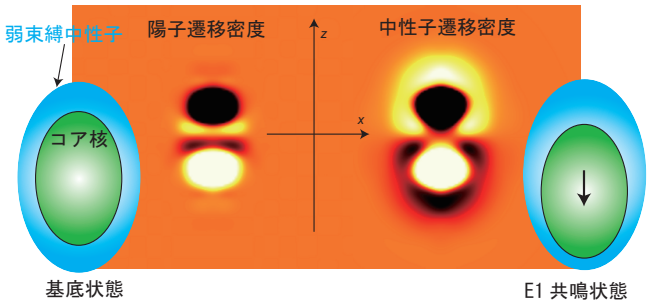

図 9: ^{14}Be の低エネルギー $E1$ 共鳴状態の遷移密度分布 $\delta\rho_{p(n)}(\vec{r})$。$\delta\rho > 0$ の部分は白く、$\delta\rho < 0$ の部分は黒く示されている。T. Nakatsukasa and K. Yabana, Nucl. Phys. A 788, 349c (2007) より。

安定核で最も典型的な表面振動型の低振動数アイソスカラー四重極モードでさえも、不安定核では陽子と中性子の運動に大きなずれが起きる可能性があり、例えば ^{16}C においてその片鱗が見出されている。また、これらのバラエティに富んだ原子核素励起モードの研究から核子相関を研究し、核内外における（有効）核力に関する情報を得ることができる。

2.6 原子核の新しい崩壊様式を探る

核図表での原子核の存在領域を決めている崩壊現象には様々なものがあるが、アルファ崩壊や核分裂は、量子多体系のトンネル現象として、理論研究の中で独特な地位を占めている。始状態では一つの平均場に閉じ込められた系が、終状態では 2 つの平均場に別れる過程であり、その過程自身が核力により自発的に起こるという点で、他の例のないユニークな現象である。不安定核ではさらに、安定核にはない新しい崩壊様式が存在する。陽子過剰不安定核は、たとえ陽子ドリップラインを超えていてもクーロン障壁の影響で直ちには崩壊せず有限の寿命を持つ。このような原子核は陽子放出核 (proton emitter) と呼ばれる。最近、2 陽子や 3 陽子を同時に放出する新しい崩壊モードが観測され興味を惹いている。^{45}Fe の場合にはその寿命が数ミリ秒であり、新種の放射能と呼ぶこともできる。中性子ドリップラインを超えた不安定核においても短寿命ながら新しい崩壊様式の存在が推測されている (3.2 参照)。

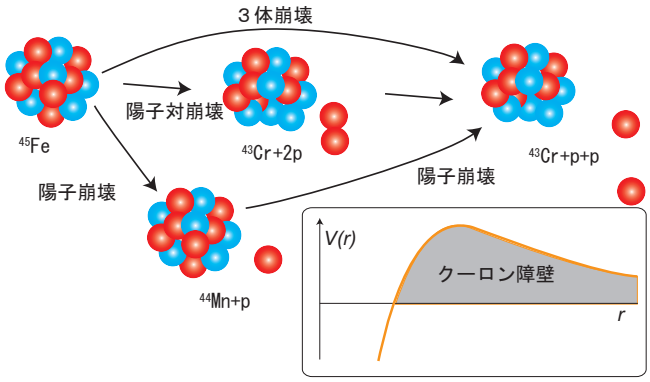

図 10: 2 陽子崩壊の模式図。クーロン障壁ポテンシャルによって崩壊が阻害され長寿命をもつ。

多重陽子放出核では、2 陽子 (3 陽子）が同時に放出されていることが実験的に示唆されており、放出時に働く陽子間の相関を解明することが重要なテーマとなっている。2 つの陽子は真空中で束縛状態を作らないことは良く知られているが、核内ではクーパー対を組んでいる可能性が高い。この放出された 2 陽子が、対相関を持ったままクーロン障壁を透過しているのか、あるいは、別の相関（クーロン力による斥力相関や原子核平均場による相関など）を持っているのかを明らかにすることが課題となっ

ている。これらの崩壊確率 (寿命）の計算は核力に加えて長距離のクーロン力が働く複数粒子の崩壊過程であり、親核 (状態）と娘核 (状態）の正確な波動関数が必要とされる。この過程の精密な数値計算は、理論的に非常に手ごわい量子多体問題となっている。

さらに理論による記述が困難な量子多体崩壊の例に核分裂がある。これは大振幅の形状変化を伴う集団ダイナミックスであり、その複雑な崩壊経路の特定も困難であることから、原子核理論において最もチャレンジングな課題のひとつである。 r 過程元素合成では中性子過剰重核の核分裂が重要な役割を果たす可能性が指摘されているが、その領域は RIBF においてさえも到達することが困難であり、理論的推測が不可欠である。我々は未知領域における新種の崩壊モードを探ると同時に、これらの崩壊モードに対する理論模型を構築する。

コラム：核力と核構造

核力の知識のみから出発して原子核構造を定量的に記述し理解することは、原子核理論の究極的な目標の一つである。この目標にむけた到達の度合と、「核力から核構造を理解する」ことが何を意味するのかは、時代とともに変遷している。

核力の理論の歴史は、湯川の中間子理論にまで遡ることができる。現在は、核子２体散乱を極めて精緻に再現する核力ポテンシャルが構築されている。現時点では、この現実的核力から原子核構造を定量的に記述することが、困難ではあるが一定の成功を収めたフロンティアとなっている。この現実的核力は、強いテンソル力やスピン・軌道力、スピン・アイソスピン依存性を示し、また近距離では強い斥力が働く。計算科学的な手法の発展により、１０核子程度までの多粒子波動関数を厳密に求めることができたことは、近年の大きな進展である。その中で、原子核の束縛に３体力の果たす役割が注目されている。

核力に関しては、従来の中間子交換に基づくポテンシャル描像に加え、量子色力学 (QCD) に基盤を持つ有効場の理論や、さらには格子 QCD 計算による核力の導出が行われ始め、より QCD に近接する立場から核構造を理解することが、次世代の挑戦として認識されつつある。

現実的核力から直接原子核の多体波動関数を得るためには大規模計算が不可欠であり、このような計算は軽い原子核の基底状態近傍の状態に対してごく最近可能となったにすぎない。原子核構造論の長い歴史の中では、広範な核図表にわたる核種、そして励起状態に現れる種々の相関を持つ構造を記述する、様々な微視的模型の発展が中心的な課題であった。それらの模型は、物理的な要請から選択した模型空間と、その模型空間に適した有効核力の組み合わせから成り立っている。これまで安定核の記述では、主に中心力からなる強い引力と、スピン・軌道力の組み合わせからなる有効核力が、核構造の記述に大きな成功を収めてきた。核力の最も長距離の成分が π 中間子交換に起因し、それが強い非中心力であるテンソル力をもたらすことを考えると、一見不思議なことのように思える。ハイゼンベルグの谷に沿った安定核の記述では、非中心力をあらわに扱うことなく中心力に繰り込んだ記述が成功を収めていたのである。しかし、陽子数と中性子数がアンバランスな不安定核の記述が進展するにつれて、殻構造の進化などに非中心力が本質的な役割を果たすことが明らかになりつつあるなど、核力の示す様々な性質をあらわに取り入れた有効模型の重要性が認識されてきている。

このように、「核力から核構造」を理解することの意味は、時代と共に、そして核図表の領域ごとに異なっており、それぞれの領域で日々発展を遂げている。クォークの内部自由度に起源を持つ核力の複雑な状態依存性は、原子核構造に他の物質にはない豊かな性質をもたらしているが、その内容をミクロな視点から議論することができるようになったのは、ごく最近のことに過ぎないのである。

3　様々な陽子・中性子密度における核物質の新しい相とダイナミクスを探索する

安定核近傍の原子核に共通する基本的な特徴の一つが密度の飽和性である。安定な原子核は、表面を除くと内部の密度は $\rho_0 = 0.17\mathrm{fm}^{-3}$ のほぼ一定の値を持つ。このために今日まで得られてきた核物質に関する情報は、この飽和密度近傍に限られていた。これに対して、不安定核では密度の飽和性がもはや成り立たない。中性子過剰核では中性子スキンが発達し、飽和密度よりも低い密度を持つ中性子物質が核表面に現れる。また原子核内部でも、陽子密度と中性子密度の比が安定核で可能な範囲から大きく離れた値を取る。このように、不安定核の研究により、我々は飽和密度よりも低く、様々な陽子と中性子の密度比を持つ核物質（非対称核物質）に関する情報を得ることができる。

様々な密度と陽子・中性子比を持つ核物質の探求は、それ自身大変興味深い。理論研究からは、低い密度を持つ核物質には核力のスピンアイソスピン依存性や強い運動量依存性を反映して多様な凝縮相が現れることが推測されている。多くの安定核で見られる同種粒子間の対相関による超流動状態は、低密度核物質で次第に強相関に移行し、ダイニュートロン型強結合相関へのクロスオーバーが予想されている。低密度の対称核物質では、重陽子凝縮相やα粒子凝縮相などのボーズ凝縮相が予想され、α粒子凝縮相は最近発見された軽い核の励起状態に現れるα凝縮状態との関連に興味が持たれている。

非対称核物質や中性子過剰核の性質は、宇宙における元素合成や、様々な原子核現象の理解のためにも極めて重要である。超新星爆発では、高温かつ高密度な核物質が巨視的なスケールで現われる。爆発のメカニズムを理解する上で、核物質の状態方程式に対する精密な情報を欠くことができない。また超新星爆発の後に残る中性子星は、その中心に低温高密度な巨視的核物質を持ち、外層には低密度中性子ガスの中に中性子過剰核が結晶状に配置した混合物質が存在すると考えられている。

RIBF では、様々な実験手段により幅広い密度領域と陽子中性子比を持つ核物質に関する情報を得ることができる。中性子スキンや中性子ハローは、低密度の中性子物質に関する情報を得る重要な機会となる。さらに束縛限界を越えた（ドリップラインを越えて存在する極短寿命な）超中性子過剰核（超中性子過剰水素 ^{7}H や、テトラニュートロン状態など）の生成と分析が可能になれば、非対称度の極めて高い核物質の探求への道が拓かれる。RIBF ではまた、非対称核物質の動的応答の探求が可能である。安定核の単極型巨大共鳴の分析からは、核物質の非圧縮率に関する情報が得られたが、不安定核ではさらに、巨大共鳴、ピグミー共鳴、スピンアイソスピン応答などの測定を通して非対称物質における対称エネルギー係数や非圧縮率が定量的に得られるだろう。さらに、中性子過剰核をビームとする中高エネルギー重イオン反応実験を行うことにより、飽和密度の 2 倍程度までの核物質を生成し、密度・温度・陽子中性子比を制御した環境のもとで、核物質の熱力学的性質を調べることが可能となる。

核物質に関するこれまでの情報は、安定核に対する測定データと量子多体論に基づく理論予測に基づいていた。RIBF における中性子スキンやハロー、超中性子過剰核に対する実験は、低密度・

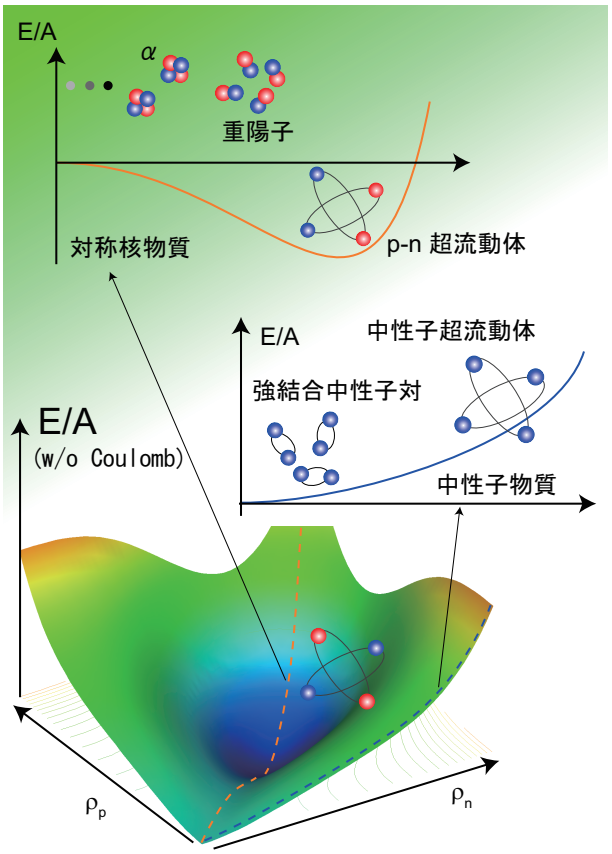

図 11: 予想される低密度核物質の状態方程式と凝縮相。中務, 化学 Vol.66 No.11, p.39 より。

非対称核物質に関する豊富な知見をもたらすことが期待できる。探究可能と考えられている核物質のパラメーター範囲は、1) 密度領域では、飽和密度比で 10^{-5} から 2 倍程度、2) 非対称度は、0 ～ 1 の全領域（対称核物質から中性子物質に対応）3) 温度は絶対 0 度から約 10MeV までである。これらの領域は、中性子星の構造と超新星爆発のダイナミクスを理解する上で不可欠である。超高密度、超高温の核物質（クォーク物質）を探求するハドロン物理の成果とあわせることにより、宇宙初期から天体の進化、そして天体の最終段階に起こる超新星爆発に至る、極めて広範な核物質の情報を得ることになる。

3.1　低密度核物質の相図を明らかにする

中性子密度 (ρ_n) と陽子密度 (ρ_p) が原子核の飽和密度 (ρ_0) よりも低い領域では、核物質にどのような変化が生じ、どのような相が現れるだろうか？これまでの理論と実験による研究から、核物質の密度と陽子・中性子の密度比に応じて、いくつかの特徴的な相関や凝縮相が出現すると予想されている。

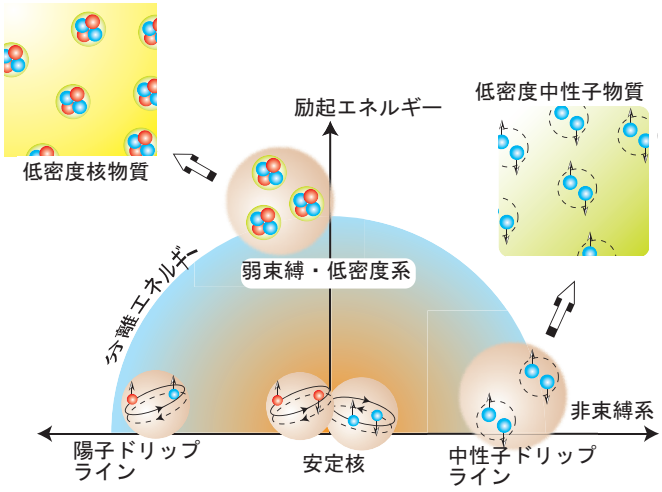

図 12: 低密度核物質と不安定核

多くの安定核で中性子と陽子それぞれの対相関による超流動状態が存在することに呼応して、核物質においても飽和密度以下の全ての密度領域にわたり、核力の S 波成分の引力が引き起こす対相関により、中性子と陽子のそれぞれにクーパー対の凝縮が起き超流動性を示す。最近この対相関の強さが、核力が運動量に強く依存することを反映して密度とともに大きく変化することに強い関心が持たれている。飽和密度近傍では、BCS 理論で記述される弱結合の対相関であるのに対して、$10^{-4} < \rho/\rho_0 < 10^{-1}$ の低密度領域では強結合型対相関に移行するという興味深い可能性が指摘されている。これは BCS 理論で記述される逆方向の運動量を持つ核子対のクーパー対凝縮から、空間的に局在化した核子対が凝縮するボーズアインシュタイン型の凝縮相への遷移である BCS-BEC クロスオーバーの前駆現象とみなすこともできる。このような相関の変化を表す指標として、中性子が実座標空間で示す相関（ダイニュートロン相関）の強度が調べられている。これまで軽い中性子過剰核では、２中性子ハロー構造におけるダイニュートロン相関が議論されてきた。RIBF では、より重い質量数領域でドリップライン近傍まで到達可能になる。そこに現れる中性子スキンやハローなどの核表面に現れる低密度中性子物質において、ダイニュートロン相関の直接的な実験的証拠を確立することが重要な課題となる。

中性子数と陽子数の比ががほぼ等しい低密度核物質では、陽子と中性子が強く相関する重陽子凝縮相やα粒子凝縮相などのボーズアインシュタイン型の凝縮相の存在が予想されている。最近安定核である ^{12}C や ^{16}O の高励起状態に、数個のα粒子が低密度で分布するα粒子のボーズ凝縮状態とみなせる励起状態が見出されている。核子の独立粒子運動により記述される基底状態からわずか 10MeV 程度の励起状態にα凝縮状態が出現することは、原子核の示す強い相関構造の好例となっている。より重い質量数領域や中性子過剰核で、このα凝縮状態がどのように現れるかは、大変興味深い課題である。

3.2　多核子ハローの探索：ドリップライン近傍核に特異な現象を発見する

^{11}Li 核で発見された中性子ハロー構造は、弱く結合した中性子過剰核の特徴を明瞭に示すものであった。これまで軽いドリップライン近傍核の研究により、１つまたは２つの弱く束縛した中性子が形成す

る中性子ハロー構造に関する理解が進んできた。^{11}Li のような 2 中性子が束縛したハロー構造は、芯核と 2 中性子から成る 3 体系のどの部分 2 体系をとっても束縛状態が存在しないことからボロミアン系と呼ばれる。この性質のため、2 中性子間の相関（ダイニュートロン相関）が 3 体系としての束縛に本質的な役割を果たしており、その解明が試みられてきた。

RIBF では、軽い核から中質量領域でのドリップライン近傍核までが研究対象となる。そこでは、2 中性子ハローに加えて多中性子ハロー構造の可能性が指摘されている。そのような構造が見つかれば、低密度核物質の性質を探求する格好の場となるだろう。中重核では、極めて小さい束縛エネルギーを持つ多数の中性子群がハロー構造を作る可能性や、原子核の変形に伴い新たに出現するハロー構造も予測されており、弱束縛核子が発現する多様な多体現象を研究する魅力的な舞台となることが期待される。また、ハロー核子が関わる反応のダイナミクスの解明も課題である。ハロー核のクーロン分解反応や低エネルギーの励起構造の分析はダイニュートロン相関の解明につながり、融合反応や移行反応では反応の分析がハロー構造の理解につながるとともに、弱束縛核子群のダイナミクスの解明に関心が持たれる。

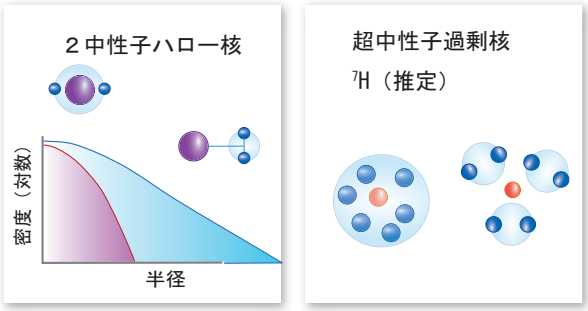

図 13: 中性子ハロー核と超中性子過剰核 ^{7}H。

中性子のみの多体系は安定した物質として自己束縛することはないが、共鳴状態として観測される可能性はある。中性子のみからなる、あるいは陽子数と中性子数の比が著しく大きい中性子ドリップラインを超えた原子核の共鳴状態の観測が期待されている。中性子のみからなる物質としては、テトラニュートロンが（4 中性子原子核）、中性子群に少数の陽子を加えた超中性子過剰核である $^{4-7}$H や ^{10}He が候補となる核種である。これらの原子核は、中性子物質や著しく中性子陽子比が大きい非対称核物質の理解にも直接つながる可能性を持っており、その性質を解明することは重要な意義を持つ。また、このような原子核では、ダイニュートロン相関やクラスター相関のような多体相関が、共鳴状態の性質や崩壊モードに本質的な役割を果たしている可能性がある。

これらのエキゾチックな核種に対する実験的な研究とともに、様々な多核子の崩壊モードを持つ多体共鳴状態を記述する理論を開発することが重要な課題である。

3.3　中性子スキンと素励起集団モードから非対称核物質の性質を明らかにする

核物質の性質を核力から出発して理論的に解明する試みは、未だに成功していない。飽和密度と飽和エネルギーという最も基本的な物理量に対しても、2 桁の精度で測定値を再現することができないのである。これは、核物質が複雑な状態依存性を持ち芯のある核力で束縛された強く相互作用する多体系であることに加え、核子がクォークからなる複合粒子であり、自由な核子間の散乱からだけでは得られない情報—3 体力やエネルギー殻以外での相互作用—が重要な役割を果たしていることも一因となっている。このために理論によるのではなく、有限核の構造や様々なプローブに対する応答などの実験的情報から核物質の性質を探求することが試みられている。例えば対称核物質の飽和密度における非圧縮率は、単極子巨大共鳴から得ることができる。有限核のデータから無限核物質に関する情報を得るために、原子核密度汎関数理論と、有限核の集団運動に対する微視的理論が必要になる。最近数年間のあいだに動的密度汎関数理論に基づく精密な計算が可能になり、巨大共鳴状態の励起エネルギーの系統的な分析から、非圧縮率の値を 2 桁の精度で求めることが可能になっている。

このような理論研究の発展と RIBF における実験研究の連携により、中性子スキンの厚さに関する情報から非対称核物質に関する情報を得ることが期待されている。安定核では、陽子数と中性子数が異なってもそれらの分布は重なっていることが知られており、中性子スキンは不安定核になって初めて現れる。この中性子スキンの厚さと、その発現のメカニズムは、非対称核物質の状態方程式や原子核のエネルギー密度と密接に関連すると考えられている。このため、中性子スキンの厚さを非対称率の関数として正確に測定することは、極めて重要な課題である。

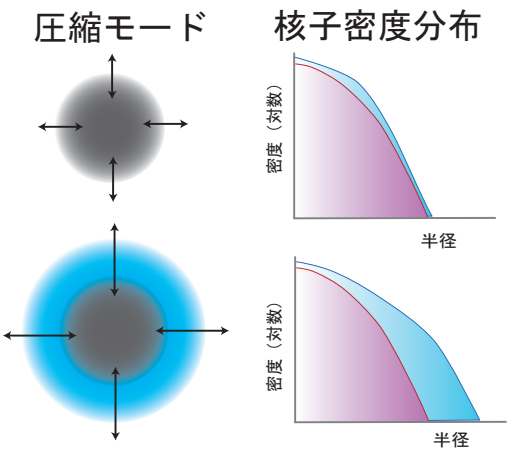

図 14: 安定核と中性子スキン核の核子密度分布 (右)。原子核の圧縮モード (左)。

さらに RIBF における実験で、中性子過剰核の密度圧縮型単極子・双極子巨大共鳴、アイソベクトル型巨大共鳴、スピン依存巨大共鳴の系統的な測定を行うことにより、核物質の非圧縮度や動的応答の振舞いが非対称度とともにどのように変化するかについて有用な情報が得られると期待できる。また中性子スキンが独立な自由度となる集団励起モードとして、ピグミー共鳴やソフト集団運動が発現する。これらの新しい集団運動モードの性質を解明することにより、非対称核物質の対称エネルギーなどのアイソスピンによる変化や、その密度依存性に関して、静的な中性子スキンから得られるものとは独立した情報を得ることが期待される。

3.4 不安定核重イオン衝突から高密度非対称核物質の性質を明らかにする

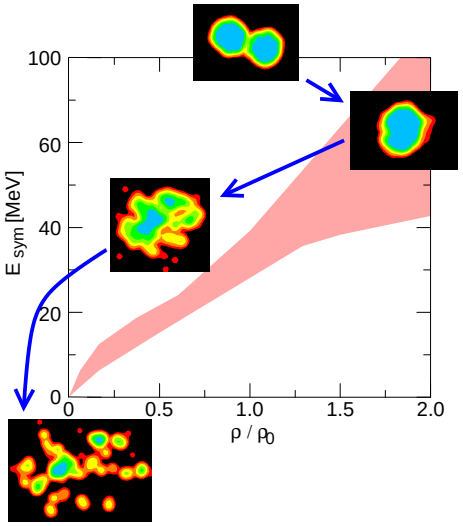

図 15: 核物質の対称エネルギーと重イオン衝突のシミュレーション。桃色の領域は理論予言の曖昧さを示している。

RI ビームによる中高エネルギー重イオン衝突実験は、核物質のさまざまな探究手法の中でも非常に広範囲の密度領域と温度領域をカバーし、他の手法では得られない領域での状態方程式や相転移などの熱力学的な性質を引き出せる。中高エネルギー重イオン衝突の最も大きな特徴は、高密度（RIBF のエネルギーでは通常密度の 2 倍程度）の核物質系にアプローチできることであり、さらに不安定核ビームを用いることで陽子中性子比を制御し、核物質の性質の非対称度への依存性を明らかにできることである。中性子物質や非対称核物質の状態方程式に対する理論予想は模型ごとにばらつきがあるのが現状であり、その度合いは特に通常核密度より高密度側で顕著である（図 15 参照）。この領域での核物質の理解を進めるには重イオン衝突が唯一の機会となる。

実際の重イオン衝突の動的過程の中では、高密度から低密度までの様々な核物質が実現する。２つの原子核がほぼ正面で衝突する中心衝突の場合、まず衝突初期の圧縮段階では、陽子・中性子で異なる集団的流れが起き、高密度部と低密度部で陽子中性子比が異なってくるなど、非対称系に特徴的な現象が起きる可能性がある。膨張にともなって多重破砕が起こる段階は核物質における液相・気相相転移とも関連すると考えられ、また，高エネルギー衝突の最終段階は核子・重陽子・アルファ粒子などからなる混合気体としても興味深い。中性子過剰な系の液相・気相相転移では二成分系の特徴が現れ、気体部分の中性子比がきわめて大きくなる現象（アイソスピン蒸留）が起きる。一方、衝突する原子核の一部だけが重なる周縁衝突では、２つの原子核の間で陽子中性子比の平衡化（アイソスピン拡散）が起きる。このよ

うな多様な現象において、熱化学平衡が実現しているかどうか、様々な密度における非対称核物質の状態方程式（対称エネルギーの密度依存性）や陽子・中性子の有効質量の違いなどがどのように関与するのか、さらに媒質中の二核子散乱および多体相関がいかに反映されるかを解明することが重要である。RIBF において行われる重イオン衝突実験を対象とした理論研究を進展させることにより、非対称核物質の諸相と状態方程式の重要な側面を明らかにできる。

コラム：凝縮の物理と BCS-BEC クロスオーバー

中性子の超流動は、^1S チャネルに働く核力の引力成分によってスピンゼロに組んだ中性子対が形成され、その対が凝縮することによって生じる量子多体相関である。有限原子核の対相関と同じ起源をもつと考えられているが、不安定核における対相関や核物質における超流動性に関する実験的（観測的）情報は乏しく、理論的な予測に頼っている。
一般に、フェルミ粒子系の超流動において粒子間の引力を変化させたとき、弱い引力では金属超伝導における弱結合 BCS 理論が記述するような対相関となるが、引力が一定以上強いときには、自由空間で形成される束縛対（複合ボーズ粒子）が凝縮して形成される Bose-Einstein Condensation (BEC) 型の相関が系を支配する。

弱結合 BCS と BEC が同じ起源をもち、引力の強弱によって連続的に移り変わること（クロスオーバーがおきること）は、８０年代に Leggett らによって指摘された。近年、超低温でトラップされた原子気体でこの BCS-BEC クロスオーバーが観測された。核力の特徴として、引力強度は２核子の相対運動量が小さくなればなるほど（つまり核子密度が低下すればするほど）、実効的な引力強度は単調増加する。BCS-BEC クロスオーバーが低密度核物質でのみ予想されるのはこのためである。ちなみに、中性子間の ^1S チャネルの散乱長は $a = -18$ fm と非常に大きく、ユニタリー極限とよぶ BCS-BEC クロスオーバーの中間地点が大散乱長極限 $a = \infty$ に対応する。大散乱長で特徴付けられる量子多体系が様々な特徴的振る舞いを示すことは、３粒子系では Efimov 効果として知られている。中質量の中性子過剰核における BCS-BEC クロスオーバーと　^{11}Li などの２中性子ハロー系で議論されている Efimov 効果とは非常に密接な関係がある。

4　元素の起源と宇宙の核現象を理解する

原子核の合成は極めて高いエネルギーを必要とし、地球上の自然環境下で自発的には起こらない。現在の太陽系に含まれる全ての重元素は、過去の宇宙における様々な環境の下で起きた原子核反応により生成されたものである。この原子核反応は、星の輝きをもたらすエネルギー源であり、星の進化の原動力でもある。現在の太陽系に含まれる元素の組成を手掛かりに、原子核が生成された場所とその環境を探る課題は元素の起源の問題と呼ばれ、原子核物理と宇宙物理の 2 分野にまたがるテーマとなっている。

宇宙における元素の進化には、様々な宇宙現象で起こる多様な原子核反応が関与していると考えられている（図）。宇宙の始めに起きたビッグバンでは、陽子と中性子からヘリウムや重水素、そしてわずかなリチウムとベリリウムが生成されたのみである。やがて始原ガスや星間ガスが凝縮して形成された恒星の中心部で、段階を追って様々な核融合反応が進み、十分大きな星では結合エネルギーが最大となる鉄までの原子核が生成される。恒星内部の温度では原子核反応はベータ崩壊に比べてゆっくりと進むため、関与する原子核は安定線とその近傍の原子核に限られる。鉄より重い原子核は中性子捕獲により進むが、その過程には、「遅い (s) 過程」と「速い (r) 過程」の 2 種類がある。s 過程は巨星の内部でゆっくりと進み、安定線近傍にそって鉛やビスマスまでの元素が生成される。一方 r 過程は、質量の大きな星が超新星爆発による終末を迎えたときに極めて短時間に進むと考えられている。爆発に伴い非常に高温で強い中性子流が生じ、ベータ崩壊をする間もなく原子核が次々と中性子を捕獲するため、関与する原子核は安定線から遠く離れた中性子過剰核となる。これらの他に、超新星爆発後に残った中性子星や、軽い星が姿を変えた白色矮星で起こる爆発的現象（X 線バースト、新星など）に伴う元素合成に、rp 過程がある。これは速い陽子捕獲反応であり、陽子過剰核が関与する。

これらの様々な環境下で進む元素合成過程を記述するためには、元素合成が起きた環境の情報（温度や周囲にある物質の組成など）とともに、原子核の質量や寿命、そして核反応断面積が基本的な入力情

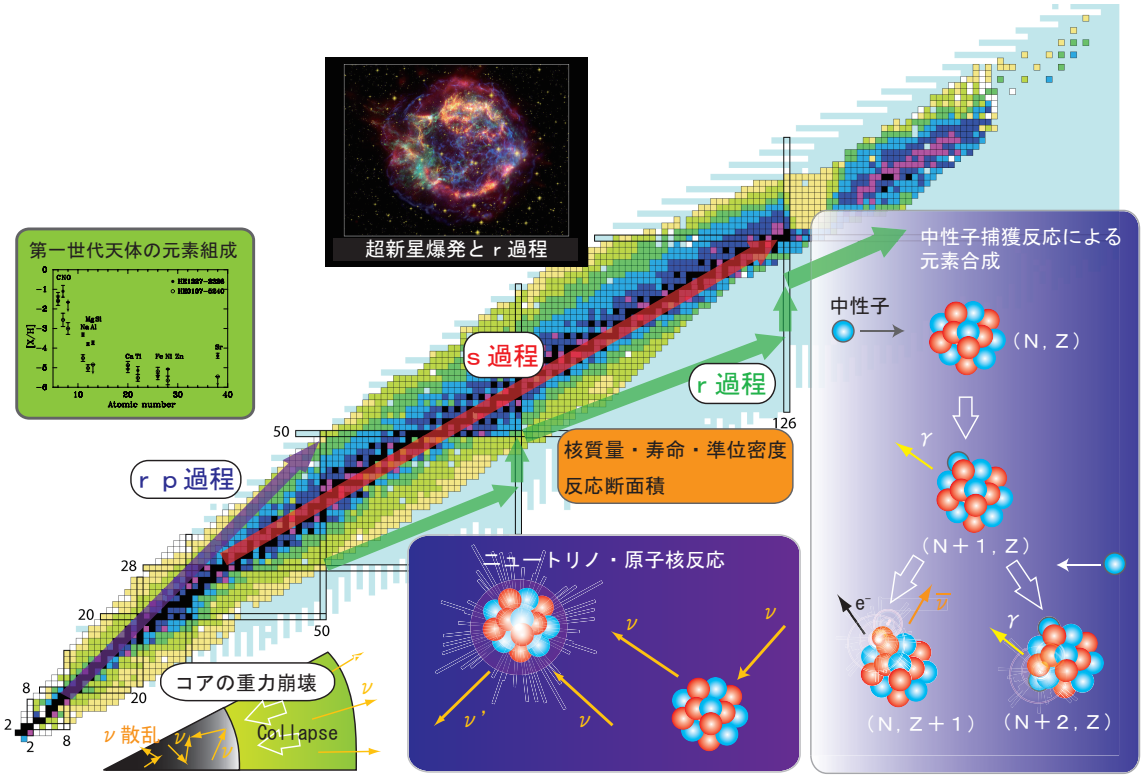

図 16: 原子核物理と天体核反応。

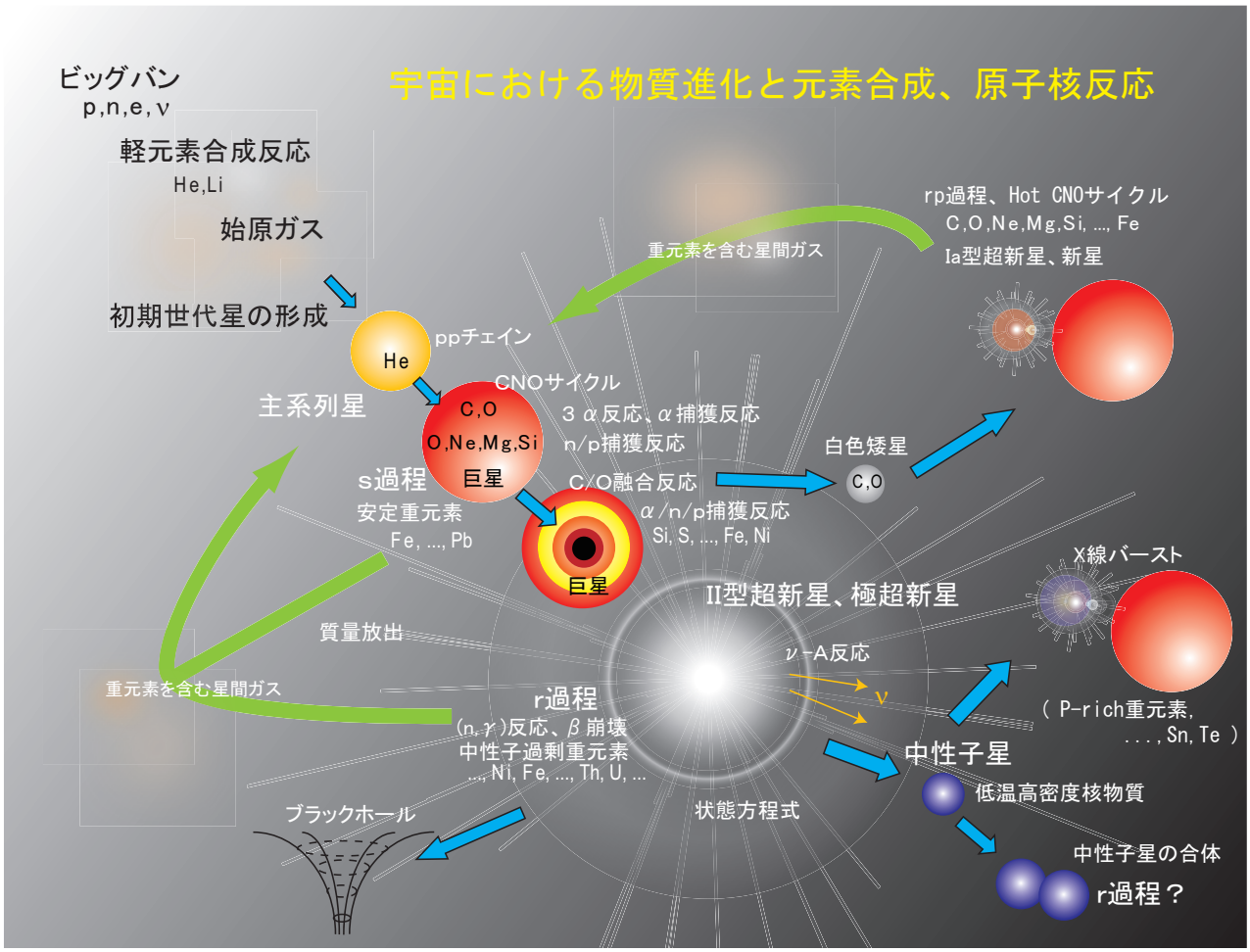

図 17: 宇宙における物質進化と元素合成。

報となる。r 過程に関しては、安定核から遠く離れた中性子過剰核を経由して進むことから、これらの実験データはいまだ得られていない。このため、従来は安定核の情報に基づいた外挿や理論の予言を利用してきた。しかし、例えば安定核では陽子と中性子の密度分布が一致しているのに対し中性子過剰核は中性子スキンを持つ、あるいは過剰中性子数の増加とともに殻構造が進化するなど、安定核と不安定核の構造は質的に異なることが明らかになってきており、原子核データを中性子過剰核へ単純に外挿することはできない。これに対して、 RIBF では、r 過程経路上の中性子過剰核の生成が可能となる。r 過程に関わる原子核のデータを直接得ることができるため、元素合成過程の定量的な理解へ大きく貢献することが期待できる。また、rp 過程に関わる核反応の研究についても大きな進展が期待される。理論的には、中性子過剰核の構造と反応の特徴を記述することができ高精度の予測能力がある理論・模型を開発していくことが重要な課題となる。

超新星爆発を理論的に記述するために、爆発のシミュレーションが行われてきた。ところが、現時点で最も信頼のおける物理情報のもとでシミュレーションを行うと、爆発が起きるという事実を再現することすら出来ないのが現状となっている。コアの重力崩壊時には、超高密度核物質が形成され、その後の爆発のシナリオは核物質の状態方程式に強く依存する。このため、超新星爆発の理解には、中性子過剰核のデータとともに、高密度核物質に関する正確な情報が必要とされている。超新星爆発後に形成される中性子星は、宇宙で実現される唯一の巨視的な核物質であり、中性子星の最大質量は、核物質の情報に強く依存することが知られている。このように、様々な密度と温度、そして中性子陽子比率における核物質の熱力学的な情報が、超新星爆発のメカニズムと中性子星の構造を理解する上で重要であ

る。これらの情報は、RIBF で行われる様々な実験から得られるだろう。中性子過剰核の中性子スキンに関わる測定からは、中性子過剰な核物質に関する情報が得られる。また中性子過剰な原子核の衝突実験は、高密度な中性子過剰核物質に関する情報を得る他にない機会である。さらに中性子ドリップライン上にある原子核の構造は、中性子超流動体から構成される中性子星の内殻の構造や動的性質と関連づけることが期待できる。

最近の宇宙観測により、宇宙初期に生まれたと考えられる重元素の著しく少ない天体の元素組成に関するデータが数多く蓄積されている。また、赤方偏移の大きい深宇宙の観測からガンマ線バーストが見いだされ、これを宇宙の最初に形成された第一世代星に起きたと考えられる極超新星 (hypernova) 爆発に関連づけた理解も試みられている。これらの宇宙初代天体に関する新たな観測データの蓄積により、r 過程への興味は広がりを見せている。標準的な超新星爆発とは異なる多様な環境下での元素合成過程を調べることにより、現在の太陽系における元素組成や、元素の起源に関する理解がより一層進展することが期待されている。また、1987 年に現れた超新星に対する詳細な観測により、超新星爆発に関する情報は近年飛躍的に増大している。これにより特に、ニュートリノが爆発で果たす役割に注目が集まっており、爆発のシミュレーションにおいて必要となる、ニュートリノと原子核の反応を解明していくことが重要な課題となっている。

このように、RIBF による原子核研究は、中性子過剰核のデータ取得による r 過程の定量的な解明にとどまらず、超新星爆発や中性子星、高エネルギー宇宙現象など、宇宙で見出される様々な原子核現象を理解する上で必要とされる原子核の知見を飛躍的に拡大することが期待されている。

4.1 中性子過剰核の研究から r 過程元素生成を解き明す

超新星爆発で進む r 過程では、爆発前に星の中心部に存在した重い核種は、高温環境下でいったんα、n、p にまで分解する。ついで高密度下で生じる高い中性子密度のもとで中性子吸収による融合反応がベータ崩壊とが競合しながら急速に進行し、最終的に鉄からウランまでの元素が合成されると考えられている。しかし、この高い中性子密度のもとで進む r 過程が、具体的に爆発中のどの時点で、どの場所で進行するのかについては、いくつかのシナリオが存在するものの確実なことは分かっていない。このような状況の下で、RIBF における中性子過剰核の生成とその性質の探求により、元素合成に関わる最も基本的な物理量である原子核の質量と中性子分離エネルギー、ベータ崩壊の寿命、中性子吸収 (n,γ) 反応と光分解 (γ,n) 反応などの精密なデータが、広範な核種について得られると期待されている。r 過程での元素合成に関わる物理量を確定することで、その理解に大きく貢献する。1 章で述べたように魔法数は中性子数とともに進化することが明らかにされつつある。元素合成のシミュレーションにこのような魔法数の変化を取り入れると、原子核の質量とベータ崩壊確率を通じて r 過程元素の存在量に強く影響すると予想されており (図 18)、中性子過剰核の殻構造を解明していく課題と不可分である。また、r 過程では中性子誘起核分裂が元素存在量の分布に影響する可能性が指摘されており、この問題では $N = 82$ の魔法数に伴う結合エネルギーのギャップの大きさを解明することが求められる。

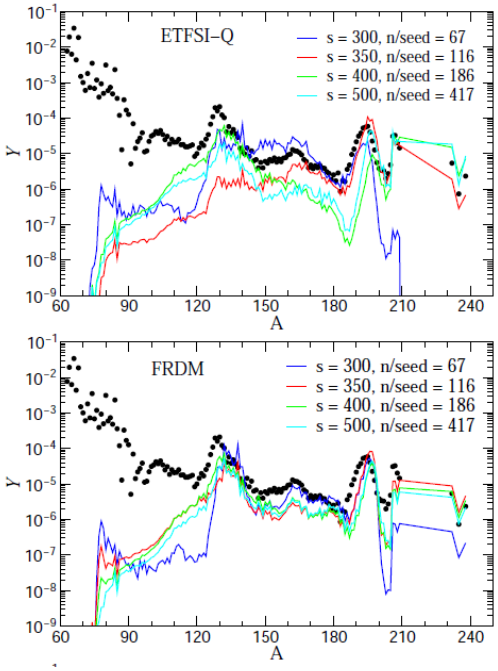

図 18: r 過程ネットワーク計算で予言される元素組成。2 つの図は、データの存在しない中性子過剰領域において異なる質量表を用いた計算結果。G. Martinez-Pinedo et al., Prog. of Sci., PoS(NIC-IX) 064 (2006) より。

重い質量数領域で r 過程が経由する核種は、RIBF で到達可能な領域よりもさらに中性子過剰側にある。これらの原子核データは、直接実験から得ることが困難であり、予言力のある理論を用いたデータの推測が重要になる。1－2 章で述べたように、RIBF における実験により、N と Z を自由に変化させた 2 次元面内で核構造を包括的に調べることが可能になる。これは高い予言力を持つ原子核の構造と反応の理論を構築するのにも貢献する。巨視的・微視的模型などの半微視的な質量公式に加え、殻模型や密度汎関数理論の発展により、経験的な要素が少なく安定線からはるかに離れた領域でも不定性の少ない予測が可能となる。

中性子捕獲 (n,γ) 断面積を正確に予測するためには、中性子過剰核における中性子反応プロセスを理解することが必要になる。r 過程核では中性子分離エネルギーは 2 MeV 程度と小さく、中性子ドリップライン近傍核ではさらに小さい。このような原子核では、中性子捕獲に相当する励起エネルギーでの準位密度が著しく小さくなり、安定核で成り立つ複合核の描像が成り立たない。このため、超新星爆発のシミュレーションでしばしば用いられる Hauser-Feshbach の統計模型を用いることは適切ではなく、複合核反応と直接捕獲とが競合する反応プロセスを記述できる反応理論を用いることが必要になる。さらに、中性子過剰核の中性子吸収では、$(n,\gamma),(\gamma,n)$ 過程でのガンマ線の放出・吸収に、ピグミー共鳴やソフト双極子励起　など、エキゾチックな励起モードが関与すると考えられている。このような動的過程は、$(n,\gamma) \leftrightarrow (\gamma,n)$ 反応が、熱平衡の条件が満たされない局面で進む場合に重要となる。

以上のように、我々は RIBF において得られる r 過程に関与する原子核データの取得、中性子過剰な原子核の構造や反応の理論の発展を、天体物理学による元素合成のメカニズムと連携させることにより、r 過程を中心とする重元素合成の解明を進める。

4.2　核物質の状態方程式と超新星爆発メカニズムを理解する

巨星の終末期に起こるコア崩壊型の超新星爆発は r 過程による元素合成の主要な舞台であるが、超高密度な核物質の形成を経て進む爆発のメカニズムを理解する上で、核物質に関する定量的な情報が不可欠である。爆発を支配する重要な要素の一つは、重力崩壊によって生じる核物質の反発過程であり、超新星爆発で重力エネルギーがどの程度解放されるかは核物質の状態方程式の ”かたさ ”に依っている。状態方程式が柔らかければ、崩壊に際して生じた核物質はよりコンパクトに圧縮され、解放されるエネルギーが増す。そして爆発を特徴付ける重要な物理量である原始中性子星から放出されるニュートリノのエネルギーの期待値も増加する。この反発の衝撃波領域では、核物質は 10MeV 近くの高温状態にあると考えられている。一方、爆発後に残る中性子星は自然界に存在する唯一の巨視的な核物質であり、その中心部は低温高密度な核物質となっている。そして超新星爆発後に残る中性子星の最大質量は、核物質の状態方程式に強く依存することが知られている。このように超新星の爆発のメカニズムと中性子星の構造を理解する上で、様々な密度と温度、そして中性子陽子比を持つ核物質に関する熱力学的情報が必要とされる。

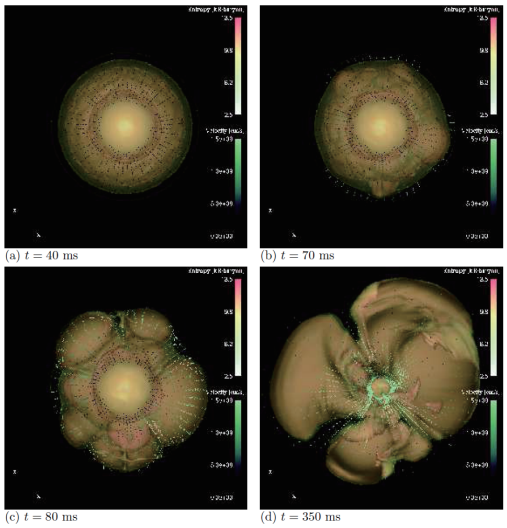
(a) $t = 40$ ms　(b) $t = 70$ ms　(c) $t = 80$ ms　(d) $t = 350$ ms

図 19: 超新星爆発の 3 次元シミュレーションの計算例。W. Iwakami et al., ApJ, 678, 1207 (2008) より。

現時点で爆発を再現することができない超新星爆発の数値シミュレーションに関しては、その原因の一端は核物質と核反応に関する我々の知見が未だ不足していることにあるのかもしれない。また、爆発の数値シミュレーションの精度を改善することも重要であろう。球対称モデルを超えて、実際に観測される事象に近い多次元（2 次元、3 次元）シミュレーションが不可欠である。さらに、爆発のエネル

ギーのほぼ全てを担うニュートリノの果たす役割を、ニュートリノの輻射輸送として取り入れることも必要である。

RIBF を用いた実験では、様々な条件下での核物質に関する情報が得られる。中性子スキンの測定からは中性子過剰な核物質の情報が得られ、中性子ドリップ線上の原子核構造からは中性子星の内殻で実現されていると考えられる中性子超流体に関する有用な知見が得られると期待される。さらに、中性子過剰核を入射核とする重イオン反応は、中性子過剰な高温高密度核物質の性質を探る唯一の機会であろう。我々は、様々な中性子陽子比を持つ核物質に関する理解を進め、超新星爆発のメカニズムや中性子星の構造に関する研究と連携することにより宇宙で起こる多様な原子核現象に関する理解を進展させる。そして、極超新星爆発やガンマ線バーストなどの極限天体現象における核物質の探求にも取り組む。

4.3　核・ニュートリノ反応の爆発への関与を解明する

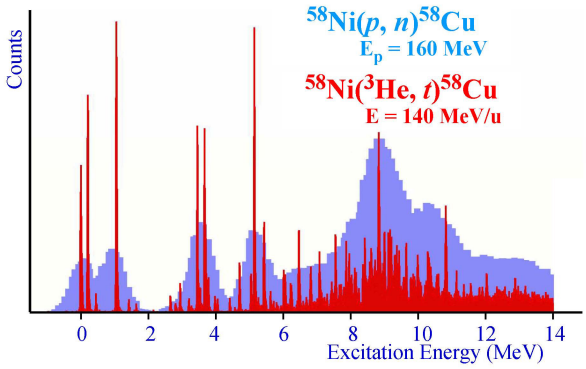

図 20:　ニュートリノが関わる弱い相互作用で重要な Gamow-Teller 強度分布の精密測定。藤田佳孝氏 (阪大) より。

超新星爆発では、放出される全エネルギーの 99% がニュートリノにより持ち去られる。超新星 1987a により生じたニュートリノの観測データにより超新星に関する知識は飛躍的に増しており、爆発においてニュートリノの果たす役割に大きな関心が持たれている。例えば超新星爆発の初期にあたる重力崩壊の段階で大量に生成されたニュートリノが原子核との反応により中心部に閉じ込められ、爆発を駆動する可能性が指摘されている。

このようなニュートリノの役割を明らかにするためには、弱い相互作用を通じて起こる原子核・ニュートリノ衝突の散乱・吸収断面積に関する正確な評価が必要になる。また爆発の後半で進む r 過程は、強いニュートリノ流束のもとで進行することから、ニュートリノと核子・安定核・不安定核の相互作用が影響している可能性も考える必要があろう。

このようなニュートリノと原子核の相互作用に関して、我々は安定核から不安定核に至る弱い相互作用の遷移行列要素を高精度に予測する殻模型計算や密度汎関数理論を発展させる。さらに遷移後の原子核の崩壊過程を解明し、ニュートリノ・原子核分解反応断面積を理論的に明らかにする。また RIBF では、不安定核を入射核とした荷電交換反応実験による不安定核に対するガモフ・テラー強度分布の情報が得られる。これらによりニュートリノと原子核の相互作用を定量的に理解し、超新星爆発におけるニュートリノの役割の解明を進める。

4.4　宇宙核現象に関わる核反応断面積を精密に求める

宇宙における元素合成を規定しているのは、元素合成が進む場の環境を指定する温度、粒子密度と、反応確率を表す原子核反応断面積である。元素分布を定量的に説明するのに十分な精度で反応断面積の値を提供することは、原子核物理学の重要な役割である。元素合成に関わる核反応は、クーロン障壁よりもはるかに低いエネルギーで量子トンネル過程のもとで進む。このようなトンネル過程の反応断面積は、エネルギーとともに指数関数的に減少するため、実験から直接断面積を測定することは容易ではない。この理由から、反応断面積の直接測定に加えて、様々な間接測定法が考案されてきた。

間接測定の一般的な原理は、低エネルギーで起こる２体反応の断面積を得るために、高エネルギーで起こる３体反応を利用する点にある。例えばガンマ線放出を伴う２つの原子核の融合反応 $b(c,\gamma)a$ を考えよう。この反応の逆過程は光分解反応 $a(\gamma,c)b$ であり、もとの融合反応の断面積とは時間反転の関係で結ばれる。この逆反応の断面積を、原子核 a の高エネルギー反応から得ようというわけである。原子核 a を重い原子核に高速で衝突させると、標的核のクーロン場は擬似ガンマ線とみなすことができるので、クーロン分解断面積から光分解の S 因子を得ることができる。このクーロン分解法に加え、最近では放射光を利用した精密な光核反応実験も行われている。また、核 a を入射核とする分解反応を利用するトロイの木馬法、移行反応を利用する漸近規格化因子の方法などが開発され用いられている。

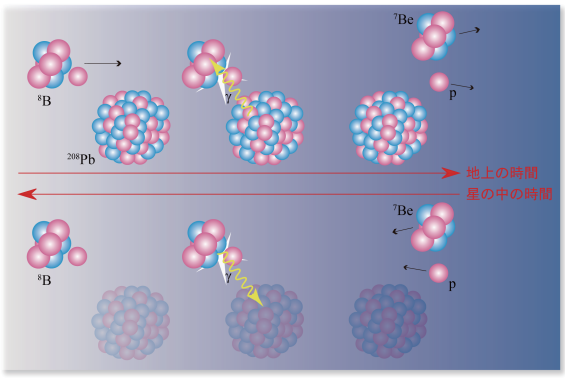

図 21: 逆反応を利用して ^{7}Be+p の融合断面積の測定。

一例は、太陽ニュートリノの定量的な分析に必要な、^{7}Be と陽子の核融合反応断面積である。この断面積を得るために、^{8}B の ^{208}Pb による分解反応を利用する。これは ^{208}Pb のクーロン場を近似的に双極場とみなせることから、^{7}Be$(p,\gamma)^{8}$B の逆過程と考えることができる。しかし、^{8}B 分解には、より高次の電磁場や、核力による分解が含まれている。精密な核反応計算の結果、この断面積に占める双極場以外の効果は 20% に及ぶことが明らかにされている。また、漸近的規格化因子の方法を用い、陽子移行反応を利用して間接的に ^{7}Be(p,γ) の断面積の情報を得る試みも行われている。これに関しても、多段階過程の寄与が 20% 程度あることが精密計算から指摘されている。このように、間接測定法の原理を踏まえつつも、逆反応過程から正確に反応断面積の情報を得るために、３体核反応理論などの精密反応理論を開発し、それを用いた高精度解析を進めていくことが極めて重要になる。

4.5 非対称核物質の探求により中性星の構造を理解する

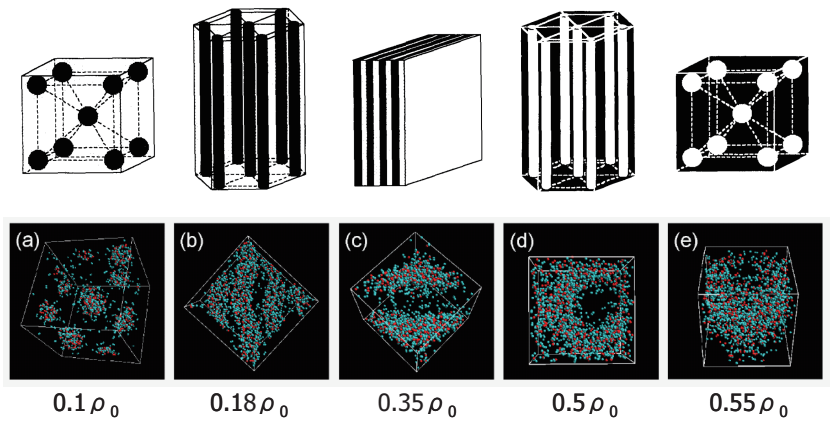

図 22: 中性子星の内殻において予言されるパスタ構造 (上図) と陽子比率 $x = 0.3$ における量子分子動力学 (QMD) 計算の結果。K. Oyamatsu, Nucl. Phys. A561, 431 (1993) および G. Watanabe et al., Phys. Rev. C 68, 035806 (2003) より。

中性子星は宇宙で実現している唯一の巨視的な核物質である。原子核の飽和密度のおよそ 3 倍ある中心部の高密度核物質から内殻、そして外殻に向けて核物質の密度が低下し、各々の密度領域で核物質の多様な構造の現われが予想されている。中心部の高密度核物質に関しては、核子以外の自由度やさらにはクォークの自由度まで考慮した核物質の状態方程式が必要とされ、ハドロン物理学との接点となっている。実験的に高密度核物質を調べる唯一の機会である重イオン衝突では、生成される高密度核物質は同時に高温状態となるが、状態方程式を理解する手がかりを与えてくれる。

中性子コアから内殻に移る原子核の飽和密度からわずかに低い密度領域では、原子核パスタと呼ばれる多様な次元を持った核物質の複雑な配位が現れることが予測されている。どのようなパスタ相が実際に現れるかには、核物質の対称エネルギーの示す密度依存性に強く依存することが指摘されている。このような核物質の性質は、中性子過剰核の半径や質量の系統性、そして中性子スキンに関する情報から定量化することが可能である。さらに低密度の内殻では、中性子物質（中性子ガス）の中に原子核クラスターが漂い、あるいは結晶配置をとる物質が実現すると考えられている。この原子核クラスターは、ドリップライン近傍のハローやスキン構造を持つ原子核に類似したものと捉えることができる。この低密度な中性子物質は、超流動状態にあると考えられている。回転する中性子星では、このような超流動中性子物質の中に、多数の渦糸が生じる。この渦糸は、中性子物質の超流動性とその起源となる対相関に敏感であり、中性子星の自転速度が突然変化するグリッチと呼ばれる現象や、中性子星の冷却速度にも関連すると考えられている。

RIBF を用いた実験により、低密度から高密度に至る非対称核物質の探求が可能になる。その理解をもとに、我々は巨視的核物質である中性子星の構造に関する理解を深めていく。

4.6　第一世代星の元素組成を理解する

最近の宇宙観測の進展により、重元素の著しく少ない天体（金属欠乏星）の元素組成に関するデータが数多く蓄積されている。これらの天体では鉄と比較した炭素や酸素の比 (C/Fe, O/Fe) が太陽系の組成比よりもはるかに大きく、また鉄よりも重い原子核であるストロンチウム (Sr/Fe) やバリウム (Ba/Fe) も多量に存在することが報告されている。これらの金属欠乏星は、宇宙で最初の星が形成されそれが超新星爆発を起こす前後に生まれたと考えられる、

宇宙の晴れ上がり直後に形成された第一世代星は太陽質量の 100 倍を超えるような大質量星であったとする理論予測があり、それらの一部は重力崩壊型の極超新星あるいはガンマ線バーストにより莫大なエネルギーを放出して爆発したと考えられている。観測された金属欠乏星が、これらの第一世代星の超新星爆発によって重元素汚染されたガスから生まれた第二世代星なのか、あるいは、第一世代星として生まれた小質量星に後から重元素が付着したものなのか、精密な理論予測と観測データとの比較が求められている。測定されている組成率から星誕生のシナリオを導くためには、r 過程に関わる核反応率を不定性無く求めることが必要不可欠である。

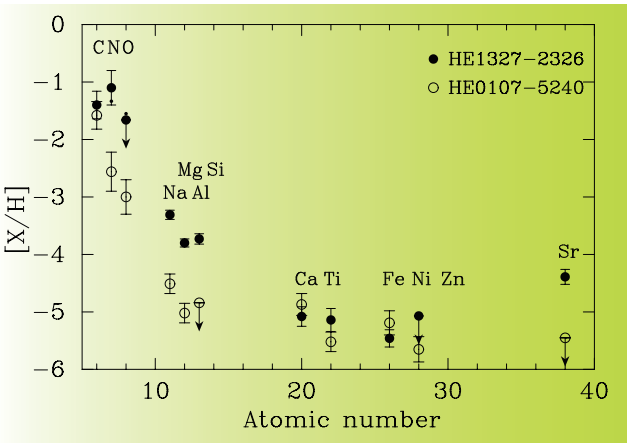

図 23: 重元素の少い星 HE1327-2326 および HE0107-5240 の水素に対する組成比。A.Frebel et al., Nature 434, 871 (2005) より。

宇宙進化の初期において重元素の存在しない特別な環境の下で誕生した星の組成データは、重元素生成や星の形成・進化・爆発のシナリオに大きなインパクトを与えるものである。我々は、陽子・中性子・アルファ粒子と不安定核の核反応率を明らかにし、超新星の爆発メカニズムや r 過程に深く関与する初期天体のシミュレーションを通して、初期宇宙の真の姿の解明に貢献する。

コラム：質量公式と微視的質量表

原子核を液滴とみなし、原子核の質量あるいは全結合エネルギーを体積や表面などの巨視的な量で表現する公式は質量公式と呼ばれ、1932 年に提案された Bethe-Weizsäcker 質量公式に始まる。この古典液滴模型は原子核の大局的な性質を良く説明するが、これに加えて平均場中の一粒子軌道の準位密度に起因する量子効果である殻エネルギーを取り入れた「巨視的・微視的模型アプローチ」が過去 30 年の間に大きく発展し、今日では数多くのパラメータを含む精密な質量公式が用いられている。この公式は、質量が既知の 2000 を越える原子核に対して平均誤差が数 100keV 程度で質量を再現する。このような経験的なアプローチは、既知の原子核の近傍の核種に対しては信頼できる外挿を与えるだろう。一方で、安定核で成り立っていた核密度の飽和性が破れ、また魔法数が変化すると考えられている、陽子数と中性子数が著しく異なる領域での予言力に関しては、疑問が持たれる。

このため最近は、不安定原子核で起こる殻構造の変容を考慮し、安定核から遠く離れた核種に対しても一定の予言力のある枠組みとして、自己無撞着な平均場理論に基づく原子核質量理論が発展している。全核種に対して共通の有効相互作用を用いた自己無撞着ハートレーフォック理論や、それと密接に関連する密度汎関数理論、及びそれらを拡張したものが実際に構築されており、これらの理論の予測値は半現象論的な質量公式と区別して、しばしば「微視的質量表」と呼ばれる。中でも注目されるのは、外場中の系の「厳密な」全結合エネルギーを再現する密度汎関数の存在を保障する Hohenberg-Kohn 定理をよりどころとし、強い相互作用多体系に対する高精度の密度汎関数模型を構築しようという試みである。半現象論模型と同程度の精度とより広い適用範囲を持つ密度汎関数の開発を目標に、研究が進んでいる。

5　超重核に挑戦する

自然界に存在する最大の原子番号を持つ原子核はウランであり、これより大きい原子核はアルファ崩壊と自発核分裂に対する不安定性から長い寿命を持たない。この不安定性は、原子核を束縛する核力が短距離力であるのに対し、原子核の崩壊を促すクーロン力の効果が長距離力であるために原子番号の 2 乗に比例して増大することによる。ウランより大きい原子番号を持つ原子核—超重核—を人工的に生成する試みには長い歴史があるが、これまでに確実に生成が確認された最も重い原子核は、理化学研究所で 2004 年 7 月に生成された $Z = 113$、$N = 165$ を持つ原子核である。さらに $Z = 118$ までの超重核生成の報告がなされている。最大の原子核を実験室で創り出すためには、ピコバーン (10^{-12}b) 程度の極めて小さい生成断面積に打ち勝つことが必要になる。このような安定核よりもはるかに大きな原子番号を持つ原子核はどのような性質を持つのか？特定の核種で長い寿命を持つ超重核はないのか？どのような手段を用いれば、さらに原子番号の大きい超重核を人工的に作ることが可能なのか？これらの問いに答えるためには、理論による研究が重要な役割を果たす。

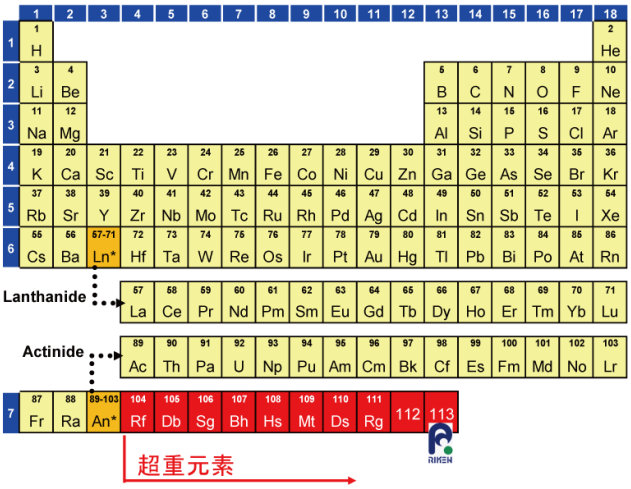

図 24: メンデレーエフの元素周期表。2004 年 9 月 28 日・理化学研究所プレスリリースより。

超重核の寿命は陽子数や中性子数が魔法数に一致するときに極めて長くなるなど、その性質は殻構造に強く依存することが知られている。これまでに知られている最大の魔法数は、陽子数 $Z = 82$、中性子数 $Z = 126$ であり、陽子数と中性子数がともに魔法数に一致する二重閉殻核 ^{208}Pb($Z = 82, N = 126$) は極めて強い安定性を示す。この $Z = 82, N = 126$ の次の魔法数は何か？この問いに対して、多くの理論は中性子数に関しては $N = 184$ を共通して予言するものの、陽子数については $Z = 114$〜126 などばらつきのある予測を与えているのが現状である。実験的に生成された最大の超重核の陽子数はこの新たな魔法数に近い領域に達しているが、中性子数はまだ 20 程足りない。しかし、現在急速に進展しつつある超重核の実験は、この領域での魔法数に関する多くの手がかりを提供し始めている。これらの情報を基に、理論を精緻化し陽子の魔法数を確定することが可能になってきている。

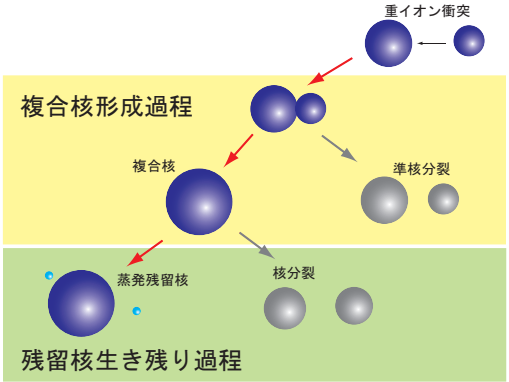

図 25: 原子核融合反応による超重核生成の概念図。

理論の立場からの超重核創生への挑戦は、複合核の生成と崩壊のダイナミクスを微視的に理解し、極微な生成断面積を持つ超希少事象 (rare event) に対して予言能力のある理論を構築することである。反応の動的過程を理解し生成率を定量的に予言するためには、多数の核子で構成された 2 つの原子核が接触・融合して 1 つの原子核になる過程を微視的に記述する必要がある。その過程において、衝突する原子核は「摩擦」により熱せられ、生成される超重核は「熱い」励起状態 (複合核) になる。この相対運動のエネルギーが内部運動のエネルギーに転化する散逸のメカニズムを解明する必要がある。生成された複合核がすぐに分裂・崩壊してしまうと超重核は生成されない。超重核の崩壊モードは、α 崩壊、β 崩壊に加え、大きな陽子数 Z による強いクーロン力のために起こる自発核分裂が競合する。また β 崩壊後の生成核が核分裂する β 崩壊遅延核分裂も起こりうる。これらの様々な競合する崩壊過程を統一的に取り扱う理論の構築が重要となる。また核子

自由度から微視的に捉えると、これらの生成と崩壊の過程は原子核の形状が時間とともに大きく変化する大振幅集団運動の典型的な例である。その微視的理論の構築は、大変チャレンジングな課題であり、多数の核子自由度の中から原子核融合・分裂に関わる「集団的な自由度」を引き出して運動を記述できる理論の開発が必要とされる。我々は超重核の生成と崩壊の過程を「巨大複合核の動力学」という新しい包括的な視点のもとに捉え、その微視的記述に挑戦する。

RIBF では、ウラン原子核の核分裂により重い中性子過剰核を生成する実験が計画されている。その中性子過剰核—例えば ^{132}Sn—を 2 次ビームに用いることにより、安定核どうしの反応では到達不可能な超重核を生成することが可能になると期待されている。特に、中性子の次の魔法数とされる $N = 184$ を持つ超重核を生成するには、この中性子過剰核を 2 次ビームに用いることが唯一の可能性であろう。超重核の生成を目指す上で、どのような核種の組合せとどのエネルギーで衝突させるべきか？中性子過剰核をビームとして用いる場合に、弱いビーム強度を補うだけの大きな反応断面積が得られる可能性があるか？これらに対して、理論が信頼性できる指針を与えることが強く求められている。我々は、理論と実験の研究者の密接な協力により、超重核物理の発展を目指す。

5.1 次の魔法数は何か？

原子核構造を理解する上で最も基本的な概念の一つである魔法数は、超重核の構造と崩壊を理解する上でも本質的な役割を果たす。アルファ崩壊や自発核分裂に対して不安定な原子核は、陽子数や中性子数が魔法数に一致すると高い分裂障壁を持ち、長い寿命を持つことが知られている。これまでに知られている最大の魔法数は、陽子数 $Z = 82$、中性子数 $N = 126$ であるが、これらの次の魔法数を理論的に予言し実験的に確認することは、超重元素を合成し理解する上で非常に重要である。魔法数の予測は古くから行われ 1960 年代後半には、陽子数 $Z = 114$、中性子数 $N = 184$ をもつ原子核が ^{208}Pb の次の二重閉殻核と予測された。

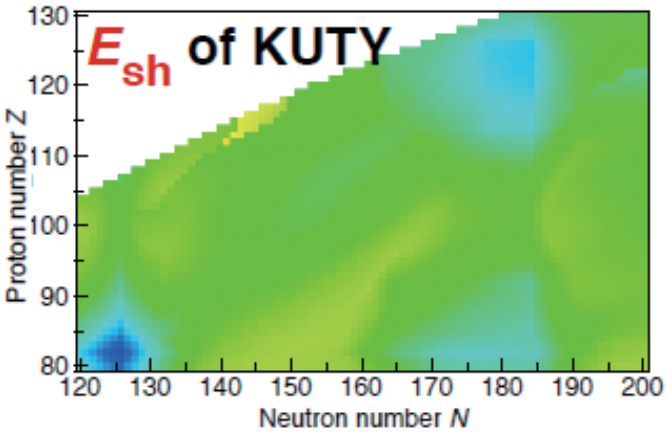

図 26: 超重核の領域における殻エネルギー (KUTY 質量公式)。小浦寛之氏（JAEA）より。

新しい魔法数の予言には、原子核の質量を高い精度で系統的に予測する理論が必要とされる。そのような理論は、1970 年代以後も発展をつづけ、現在大きく分けて 2 通り存在するようになった。一つは、液滴模型から出発して殻構造の補正を考慮するいわゆる巨視的・微視的模型であり、もう一つは近年進展が著しい、有効核子間相互作用から出発した微視的平均場模型である密度汎関数理論である (「コラム：質量公式と微視的質量表」参照)。現時点で中性子に対しては、これらの模型はいずれも魔法数 $N = 184$ を予測しているが、殻効果の強さは模型に依存している。一方で、陽子に対する魔法数の予言は模型による違いが大きく、最新の模型においても $Z = 114, 120, 126$ などのばらつきがある。

より信頼性の高い質量理論を構築するためには、まず模型による予言の違いがどのような起源で起きているのかを整理・理解する必要がある。更に、既知核種において模型の再現精度を再検討し、それを超重核領域に外挿することが必要になる。密度汎関数理論に基づくアプローチでは、5 章で述べるように、最近大規模計算による全核種の系統的計算が発展している。そこでは高い精度で質量を求める上で平均場近似を越えた相関を取り入れる必要性が強く意識されている。我々は、これらの半経験的・微視的模型を発展させ、より精度の高い質量公式の構築に挑戦する。

5.2　超ウラン元素のスペクトロスコピーから超重核の特質を理解する

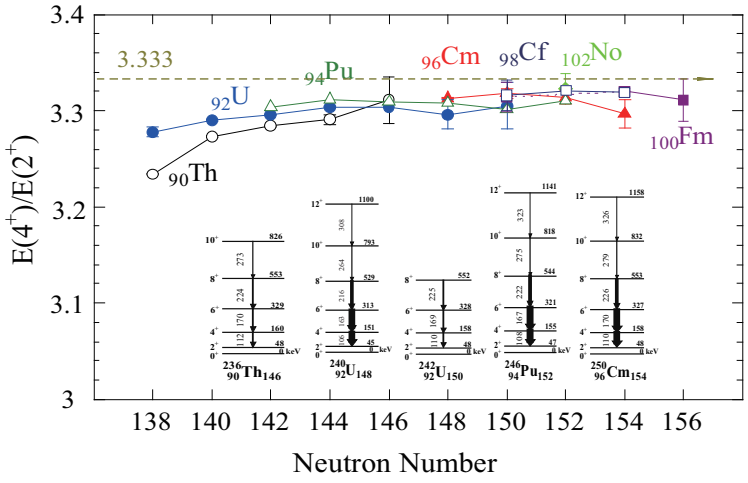

図 27: 超ウラン領域における $J^\pi = 2^+$ と 4^+ 状態の励起エネルギー比とガンマ線で測定された励起スペクトル。これらの原子核が変形していることを示している。石井哲朗氏 (JAEA) より。

超重核では、上述のように殻構造の理解がターゲットの一つになる。超重核構造の特徴の一つは、高い角運動量をもつ一粒子軌道が存在することであるが、その性質を理解することが殻構造と魔法数の決定に不可欠である。高角運動量軌道を調べるには、原子核の回転運動によって生じるコリオリ力でこの軌道運動の角運動量ベクトルの方向を回転軸方向に整列させる回転整列現象を利用することが考えられている。例えば、中性子魔法数 N=184 に相当するエネルギー・ギャップ（シェル・ギャップ）の上側に存在が予想されている、角運動量 $l = 8$ を持つ軌道（$k_{17/2}$ 軌道）の同定が可能になるかもしれない。 また超重核の変形に伴う回転スペクトルや振動励起スペクトルなども、この領域での殻効果に密接に関わっている。このような超重核領域の核構造に関する情報源の一つとなるのはガンマ線分光学実験である。最近、超ウラン領域において励起状態の系統的分析がなされ核変形に関する情報が得られ初めている。実験データから一粒子軌道の情報を引き出すのは理論の役割である。巨視的・微視的模型、密度汎関数模型を用いることで、励起状態のスペクトロスコピーと魔法数や質量予測を連動させた包括的な研究を進展させていくことができる。

5.3　核力とクーロン力の競合を探る

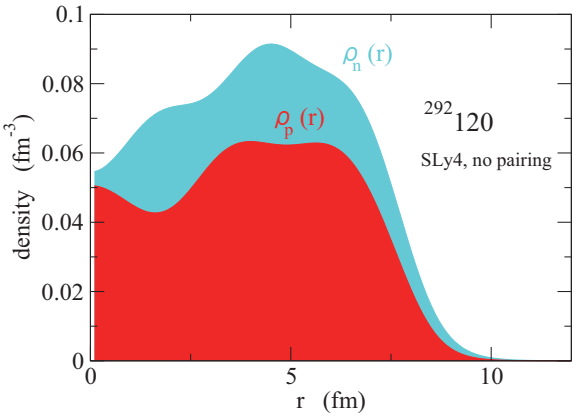

図 28: Z の大きな超重核において予想される泡原子核の陽子・中性子密度分布。

帯電した液滴の安定性を初めて理論的に議論したのはレイリー卿である（1882 年）。レイリー卿は、現在 分裂度 (fissility) パラメータと呼ばれる $x = E_c/2E_s$(E_c、E_s はそれぞれ液滴が球形であった場合のクーロン・エネルギー及び表面エネルギー）で定義されるパラメータが 1 になると、液滴は分裂に対して不安定となり（これはレイリー極限とよばれる）、さらに電荷を増やすとジェットを放出しながら液滴が崩壊することを予言した。このアイデアは、Bohr と Wheeler による核分裂に対する古典的論文 (1937) に引き継がれた。またごく最近になって古典的クーロン液体の実験も行われている。原子核は量子流体であり、このレイリー極限にトンネル効果などの量子性を考慮した扱いが必要になる。実際、通常の安定な原子核では、自発核分裂の見出されている ^{235}U でも分裂度パラメータは 0.72 程度であり、レイリー極限に到達するはるか手前である。現在生成されている超重核はレイリー極限の近傍に存在する系であり、核力とクーロン力が競合するユニークな系である (例えば、理化学研究所で生成された 113 番元素では $x = 0.92$ 程度である)。レイリー極限に近い量子クーロン流体である超重核の核分裂には、核力とクーロン力の拮抗により従来

の核分裂で知られていない新しい現象が見られる可能性もある。

強い相互作用のもとで安定な核種の数はおよそ一万と言われているが、超重核の核分裂の確率を定量的に評価するとこの見積りは大きく修正されることが指摘されている。これは、超ウラン元素の化学的性質を探求する核化学の分野にも大きな影響を与える事項である。また、超重核は強いクーロン力のために、原子核の中心付近に「空洞」ができる可能性が指摘されている（泡原子核、図 28)。「空洞」表面の核内における振動・回転のようなこれまでの原子核に存在しない集団運動が現れるかもしれない。我々は、核力とクーロン力が拮抗する安定核にはない状況での原子核構造を明らかにし、そこで起こる新しい運動様式の探求に挑戦する。

5.4 生成と崩壊のダイナミクスを記述し予測する

複合核の生成と、その核分裂による崩壊は、ともに原子核の形状が大きく変化する大振幅集団運動の典型例である。大振幅集団運動を微視的に記述することは、原子核物理学における最も困難な問題の一つであり、長年にわたる研究の蓄積にも関わらず、未解決な課題が数多く残されている。これまでに、大振幅集団運動がある集団自由度に対するポテンシャル、質量パラメータ、摩擦パラメータなどの巨視的な物理量で記述されるという仮定の下に、現象論的模型が数多く提案されてきた。これらは、現象の説明に定性的にはある程度成功を収めているものの、定量的な予言能力をもつためには更なる改良が必要とされる。また、集団自由度の運動が内部における核子の運動に比べて比較的遅いとする断熱近似の仮定が、現実のプロセスにおいてどの程度妥当かという問題も未解決である。

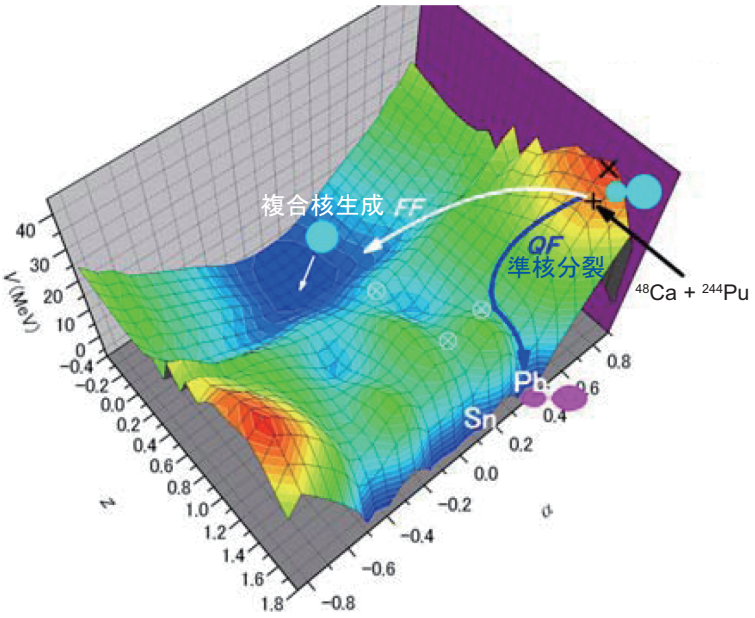

図 29: ^{48}Ca+^{244}Pu の融合反応経路。有友嘉浩氏 (JAEA/Dubna) より。

巨大複合核の動力学に関して、解決すべき課題は以下の 3 点に大別することができる。(1) 運動を記述する集団座標をどう選ぶか。非常に多くの核子自由度から融合・分裂の動力学に関与する少数自由度をいかに抜き出すかということは、原子核集団運動論の古くからの課題である。現在行われている計算は、全て少数の変形パラメータなどをあらかじめ選定し、この集団自由度を抜き出すステップを省略している。これを今後微視的な (自己無撞着な) アプローチに改良することが必要である。(2) 選ばれた少次元の集団空間でハミルトニアンをどう設定するか。ポテンシャル・エネルギー面に関しては、巨視的・微視的模型や密度汎関数理論によるある程度信頼できる計算が存在する。それらと同じ程度の精度で、質量パラメータや摩擦パラメータを求めることは未だできておらず、今後の課題である。(3) 少次元の集団運動空間で設定されたハミルトニアンに基づく運動をどのように解くか。超重核の生成過程・熱的核分裂過程の双方に、揺動散逸理論に基づく Langevin 方程式を用いた熱拡散アプローチが発展してきた。これらに加え、量子効果、原子核の変形・回転の効果、エネルギー散逸に伴う大振幅集団運動ハミルトニアンの時間依存性など、困難な課題が山積しているが、我々は巨大複合核の動力学の理論的記述に向けて、努力を続けて行く。

5.5　長寿命超重核生成に中性子過剰核ビームは有効か？

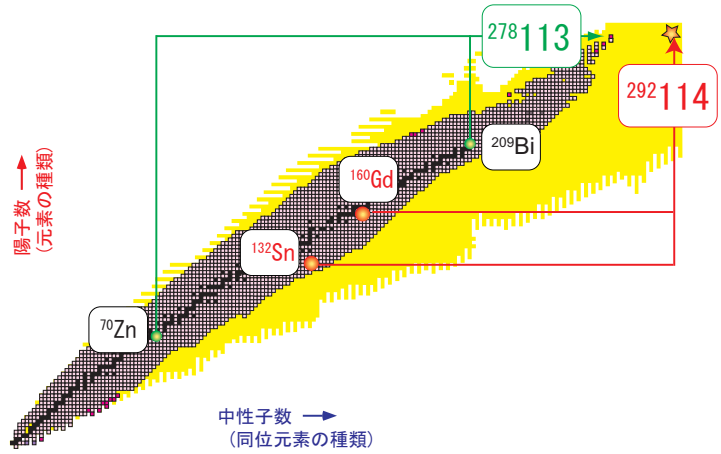

図 30: 113 番元素を合成した融合反応と、中性子過剰核 ^{132}Sn を入射核として用いた融合反応。

中性子に対する次の魔法数 184 を持つ超重核は非常に長寿命であると予想され、その生成は大いに期待されるが、安定核を用いた重イオン衝突では $N = 184$ に到達することができない。大幅に多くの中性子を含む超重核を生成するためには、中性子過剰核ビームを用いることが不可欠である。しかし中性子過剰核ビームは安定核ビームに比べて強度が弱いため、中性子過剰核を用いた場合の生成断面積がどうなるかを定量的に見積もることが必要である。そのためには、反応ダイナミクスを理解することが重要になる。弱く束縛された中性子過剰核を用いた核融合反応においては、弱束縛性による重イオン間ポテンシャルの変化、核子移行過程の核融合への影響、中性子放出効果など様々なダイナミクスが絡み合う。特に、RIBF で数多く作られることが予想される中性子過剰二重閉殻核 ^{132}Sn を用いた重イオン核融合反応のメカニズムの解明は今後重要となるであろう。

中性子過剰核ビームを用いた超重核生成反応を考える際、生成された高励起複合核の中性子蒸発過程を理解することも重要である。中性子分離エネルギーが小さいために、生成された複合核は比較的短い時間で多くの中性子を放出し、急速に冷えていくことが予想される。それに伴い、核分裂障壁が急速に高くなり、超重核の生成断面積が増大することが期待できる。このような過程を定量的に記述するために、融合途中での中性子放出をも考慮した新しい動的模型の開発が必要である。

コラム：超重元素の化学

超ウラン元素がどのような化学的な性質を持つのか、これは核化学分野の課題である。この探求は、実験的に生成される超重核を同定するために、さらに自然界には存在しない物質を利用する可能性を含めて興味が持たれる。理研で生成された原子番号 113 の元素はどのような化学的性質を示すであろうか？　図 24 の周期表では、順番に当てはめれば 13 族に入るが、その化学的性質は軽い同族元素から予想される周期性に従うのか？未知の $6d$ 電子軌道にはどのような特性があるのか？Z の大きな原子の内殻電子の質量は相対論効果により増大しており、その効果は、価電子が主役となる化学結合にも影響を及ぼしていることが最近分かってきた。超ウラン元素科学の発展のためには、その実験的な生成とともに、超重元素の単体や化合物の電子状態の計算、酸化還元電位や錯形成定数の予測など、理論化学との連携が重要である。

6　微視的核子多体論を体系化し、未知領域を予言する

前章までは、RIBF がもたらす不安定核を中心とした原子核物理学の発展を、物理概念や現象に軸を置いて述べてきた。この章では視点を変えて、理論や方法論の発展を中心に据えた視点から、不安定核研究がもたらす原子核理論分野の課題と挑戦を紹介する。

1 章と 2 章で述べたように、RIBF を始めとする不安定核 2 次ビームを用いた実験研究の進展は、これまで安定核から得られた核構造に関する理解を根本から見直す契機となり、原子核理論分野に次の課題をもたらしている。まず陽子数と中性子数を自由に選び原子核の性質を探究することが可能になり、核構造を (N, Z) の 2 次元に広がる核図表の中で、さらには励起エネルギー E を加えた (N, Z, E) の 3 次元空間の中で捉えることが可能になった。このことにより、従来の安定核の知識から構築されてきた核構造の理解を深化し、より普遍的な要素を見出すことが求められている。また不安定核は、中性子ドリップ線に近づくにつれて弱く束縛した多体系の様相を強く示すようになる。弱束縛系では平均場に比して相関の役割が増し強相関系の様相を示すとともに、平均場の離散状態と連続状態をともに取り入れた量子多体理論の構築が喫緊の課題となっている。この弱く束縛した核表面には中性子スキンが発達することから、様々な密度と非対称度の核物質の性質を探求する絶好の機会となる。そしてこれらの不安定核の理解は、元素合成を始めとする宇宙での原子核現象を理解する上でも不可欠である。

こうした不安定物理の急速な進展によって提起された新しい課題への挑戦を背景として、原子核の理論研究は著しい発展を遂げている。実験が可能となる核種は、RIBF の稼動により大きく拡大するが、より中性子陽子比の大きい核種ではビーム強度が弱い。また中重核より重い領域では、r 過程に関わる核種に到達することも容易ではない。このため、(N, Z) 平面の広範な核種を記述することができ、予言力のある理論の構築が求められる。これまでの原子核理論の発展は、まず第一段階として、原子核の示す多様な特徴のいくつかを経験的に取り入れた模型的なアプローチが発展し、次にその模型を核子自由度からミクロに理解し基礎付けるという段階に進んできた。不安定核の研究においても、経験的なパラメータを含む現象論から、有効核力に基づく微視的理論、そして現実的核力から出発した第一原理に近い計算まで、様々なレベルでの理論の発展が必要とされている。特に計算機能力の進展を背景とする非経験的な計算の発展は、他の物質科学分野と共通する特色である。核力は複雑な状態依存性や強い非中心力を持ち、２体力に加えて３体力も定量的に重要となるなど、クォークの複合粒子間相互作用であることを反映して複雑な性質を示す。非経験的な原子核構造の計算や、(N, Z)2 次元面内での原子核の記述の進展に伴い、核力の性質と原子核の構造や核物質の性質を理解することの重要性が、改めて強く意識されるようになっている。

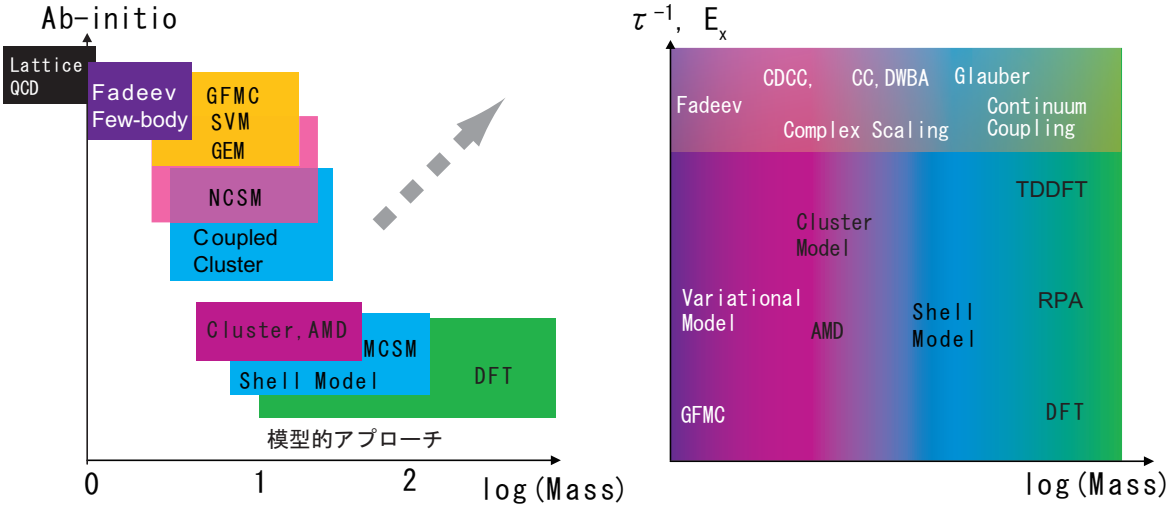

図 31: 微視的理論手法を微視的度合い (左図) と励起エネルギー (時間スケール)(右図) で分類。

さらに、不安定核２次ビームの反応実験から核構造に関する情報をあいまいさなく抽出するため、そして元素合成にかかわる低エネルギー核反応を記述するために、精密で予言力のある核反応理論を発展させることが必要である。弱束縛が特徴である不安定核反応の記述や、天体核反応に関わる断面積を逆反応過程から抽出するために、分解過程を伴う反応理論が必要とされる。また、超重核の生成や崩壊の理解に必要とされる核融合や核分裂の記述のために、量子多体ダイナミクス理論の発展が必要とされている。

計算科学的アプローチの観点からみた理論の現状を質量数領域によって分類したのが図 31 左図である。軽い核種では現実的な核力から出発した厳密な構造計算が可能となり、質量数が増すにつれて経験的な要素の多い枠組みが用いられている。ごく軽い原子核に対しては、量子少数系に対するファデーエフ (Fadeev) 理論や確率論的な手法を取り入れた非経験的変分法 (SVM=Stochastic Variational Method)、ガウス関数を基底とする変分的なアプローチ (Gaussian Expansion Method)、そしてグリーン関数モンテカルロ法 (GFMC=Green Function Monte Carlo) などにより、現実的な核力から出発して第一原理的に原子核構造を計算することが可能になっている。

より重い核種に対して、また励起状態に現れる多様な相関を持つ状態に対しては、各々の相関を取り入れる模型空間と、模型空間に適した有効核力を用いた記述が発展している。配位空間を限定し厳密対角化を行う殻模型 (Shell model)、いくつかの重要なクラスター自由度を考慮した微視的クラスター模型 (Cluster model)、密度汎関数理論 (DFT=Density Functional Theory)、さらにスレーター行列式を重ね合わせて相関を考慮する模型が代表的なものである。計算機能力の進展により、それぞれの模型はより広い模型空間を考慮し可能な限り非経験的に解を得る試みが進展している。

また右図は、構造から励起・反応といったダイナミクスに対する理論の分類を示している。弱束縛系である不安定核を記述するために、多粒子系の共鳴状態を記述する複素スケーリング法 (Complex Scaling)、散乱と束縛状態を同じ枠組みで記述できる微視的クラスター模型、散乱状態との結合を考慮した殻模型 (Continuum Shell Model)、時間依存平均場理論 (TDDFT=Time Dependent Density Functional Theory) による粒子放出や衝突ダイナミクスの記述など、構造と反応を統一的に記述する理論の構築が進んでいる。反応過程の記述では、伝統的な歪曲波ボルン近似 (DWBA) やチャネル結合法 (CC=Coupled Channels) に加え、分解過程を伴う反応に対して連続状態との結合を考慮した連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC=Continuum Discretized Coupled Channels) が威力を発揮している。

6.1 第一原理的な記述：現実的な核力から核構造を記述する

核構造の理論研究の大きな目標の一つは、現実的な核力から出発して原子核の状態を定量的に記述し、核構造の性質を理解することである。計算機能力の飛躍的な発展により、軽い原子核に対しては、短距離で芯を持ち複雑な状態依存性を示す現実的な核力から出発し、陽子数と中性子数、そして角運動量やパリティなどの量子数だけを入力として、原子核の波動関数を厳密に求めることが可能となったことは、最近の大きな進展である。３、４核子からなる原子核に対しては、ファデーエフ方程式に基づく方法や、非経験的変分法を用いた計算によって、精密な構造計算が行われている。より大きな原子核では、確率論的な手法を取り入れた計算が有効になる。グリーン関数モンテカルロ法を用いた計算では、質量数 $A \lesssim 12$ ま

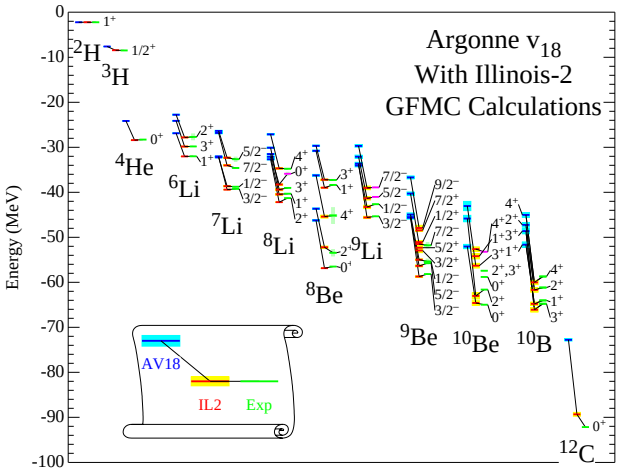

図 32: グリーン関数モンテカルロ計算による軽い核の基底状態および励起状態のエネルギー。S.Pieper, Rivista del Nuovo Cimento 31, 709 (2007) より。

での原子核に対する計算が報告されている。また、現実的な核力から有効相互作用をあいまいさなく導く方法として、ユニタリ模型演算子の方法 (UMOA=Unitary Model Operator Approach) などが発展し、それを芯のない大規模な殻模型計算 (NCSM=No Core Shell Model) や結合クラスター (CC=Coupled Cluster) の方法と組み合わせることにより、$A \sim 40$ 程度まで、第一原理の立場による核構造計算が行われるようになっている。

核力はクォークの複合粒子である核子の間に働く力であるから、２体力に加えて３体以上の核子間で働く力が存在する。実際、現実的な核力から原子核を記述する場合には、２核子散乱を正確に記述する２核子間ポテンシャルに加え、３体力を現象論的に加えることが不可欠である。現実的核力による計算で結合エネルギーに占める３体力の大きさが定量的に示されたことも、第一原理計算のもたらした成果の一つである。また、結合エネルギーの内訳を見ると、最も軽いπ中間子の交換で生じる非中心力（テンソル力）が原子核の束縛エネルギーの主要な部分を占めることが再認識され、非中心力の効果が核構造にどのような形で反映するかについての議論が盛んに行われている。

現実的核力に基づく第一原理アプローチにおいて、近未来の最も重要な課題は、記述の対象をこれまでの軽い原子核の基底状態近傍から拡大することである。まずは、より重い質量数領域に適用できる枠組みの構築が望まれる。また、軽い核の励起状態にはクラスター構造など基底状態とは全く異なる相関を持つ状態が現れることが知られており、それらを現実的核力から出発して理解することも重要な課題である。さらに、低エネルギーの核反応は、元素合成や星の進化に密接に関わる。現実的な核力から出発して、軽い原子核どうしの反応に対する第一原理的なアプローチを発展させることも重要な課題である。

現時点での原子核構造の「第一原理計算」は、核子散乱を記述する現実的かつ現象論的な核力から出発し、現象論的に３体力を加えた計算がなされている。核力を QCD レベルから理解する試みも急速に進展しており、将来はより基本的なレベルから核構造を理解することも視野に入りつつある。例えば有効場の理論の一つであるカイラル摂動論を用いると、多体力を含む核力の性質を系統的に調べることができる。さらにごく最近、格子 QCD 計算により、斥力芯や中間子交換を含む核力を導くことが可能になったことが報告されている。このような研究成果を原子核構造・反応の理解に反映していくことも重要な課題である。

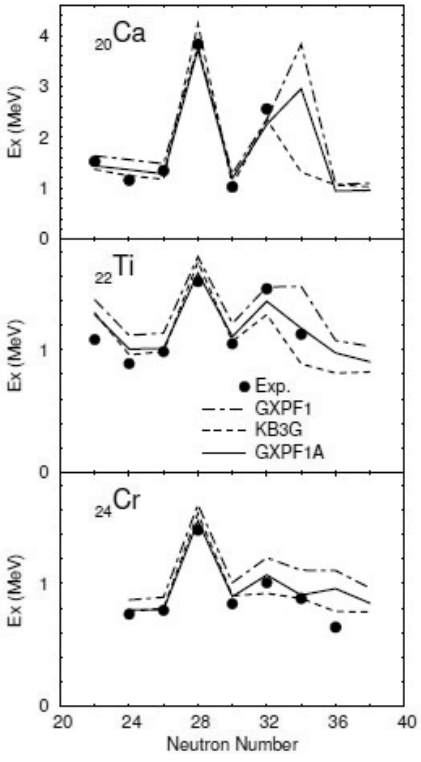

図 33: 大規模殻模型計算による $J^\pi = 2^+$ の励起エネルギー計算。M. Honma et al., Eur. Phys. J. A 25, 499 (2005) より。

6.2 様々な相関を持つ励起状態を記述する

核構造が示す面白さの一つに、異質な相関を持つ状態が近接したエネルギー領域に混在することが挙げられる。多くの原子核の基底状態では、球形か楕円体型にやや変形をした平均場ポテンシャル中を核子が独立粒子運動するという描像が成り立つ。しかし、原子核に結合エネルギーに比べてわずかなエネルギーを加えることで、様々な相関を持つ構造が励起状態に出現するのである。例えば原子核の形状はわずかなエネルギーで大きく変化し、高速回転した原子核では軸比が２：１に変形した超変形状態が最低エネルギー状態（イラスト）に現れる。また軽い原子核は、わずかなエネルギーを与えるだけで複数の原子核 (クラスター) に分解する。分解の閾エネルギー付近には、様々な分割に応じたクラスター状態が出現する。

このような多様な相関を示す核構造を記述するため、物理的な考察から多体系の模型空間を設定し、その模型空間に適切な有効核力を含むハミルトニアンを用いる様々な微視的模型が考案されてきた。バレンス核子の配位をいくつかの殻に制限し、その範囲で厳密対角化を行う殻模型は、設定した模型空間に適合する有効相互作用を構築することにより、角運動量とパリティの指定された原子核の低励起状態を高い精度で定量的に記述することができる。質量数が大きくなると扱う軌道と粒子の数が増すために大規模な計算が必要とされるが、モンテカルロ法（MCSM=Monte Carlo Shell Model）や結合クラスター展開など様々な技法の開発により、質量数の大きい領域に向けて発展している。

一方、殻模型では記述することができないクラスター状態に対しては、共鳴群の方法 (RGM=Resonating Group Method) や生成座標法 (GCM=Generator Coordinate Method) による微視的クラスター模型が発展してきた。最近は、クラスターの存在を仮定せずに、殻模型状態とクラスター状態をともに記述することができる反対称化分子動力学理論 (AMD=Antisymmetrized Molecular Dynamics) が発展している。また、次節で詳しく述べる密度汎関数理論は、核図表の全領域の核種を対象に系統的な記述が可能である。

このように、従来は物理的な考察から重要と考えられる配位を取り出し、限られた模型空間で相関構造を記述することにより発展してきた様々な微視的模型は、計算機能力の発展を追い風にして、より広い模型空間を定義し、より現実的な有効相互作用を用いることが可能になった。これにより、広範な適用範囲をもつ理論へと展開していくことが、今後の大きな発展方向となっている。

6.3 普遍的な密度汎関数を構築する

基底状態にある量子多体系の構造に対して密度を基本自由度として記述するアプローチが密度汎関数理論であり、様々な物質科学分野で用いられている。原子核物理の分野では、同等な枠組みが密度依存力を用いた平均場理論と呼ばれ、原子核の質量、密度分布、形状などを高い精度で記述し予言する方法として発展してきた。この理論の中心となる量が核物質のエネルギー密度汎関数であり、陽子・中性子数を指定して密度に関する変分を取るとことにより有限核の構造が記述される。閉殻構造を持つ核種を除けば原子核は超流動性を示すため、エネルギー汎関数は通常の密度に加え、核子対の凝縮（対密度）にも依存する。汎関数には、非相対論的な枠組みのもとで２体及び３体のゼロレンジ力ないし有限レンジ力を仮定する Skyrme 型や Gogny 型と、相対論的な枠組みのもとで中間子交換に基づく２つの流儀があり、現在までに主に安定核周辺の核構造の記述から数多くのエネルギー汎関数が提案されている。しかし、安定核領域では同程度の精度で記述する汎関数が、中性子過剰な領域の原子核や超重核に対しては大きく異なる結果をもたらすことが知られている。RIBF で生成される新しい核種の質量・半径や中性子スキンの測定などにより、エネルギー汎関数の対称エネルギーや対相関項などを精密に決定していくことが期待される。

原子核の記述では、しばしば単一の平均場に取り入れることのできない相関の効果が重要な場合がある。計算機能力の発達により、最近は複数のスレーター行列式を重ね合せる生成座標法による計算が盛んに行われている。変形した解が破る回転対称性や対相関による粒子数の破れを回復する射影法の計算や、ソフトモードに対する配位混合の計算が行われている。これらは、個別の原子核のスペクトルを記述する上で重要であるとともに、広範な核種の結合エネルギー（原子核の質量）を系統的に記述するためにも重要である。

密度汎関数理論を時間に依存するダイナミクスまで記述できるように拡張した理論が時間依存密度汎関数理論（または時間依存ハートリー・フォック理論 (TDHF=Time Dependent Hartree-Fock)）である。線形応答理論と組み合わせた時間依存密度汎関数理論は乱雑位相近似（RPA=Random Phaase Approximation）と呼ばれ、外部プローブに対する原子核の応答や巨大共鳴状態などの励起状態を記述する標準的な手段となっている。ドリップ線に近い原子核では、超流動性や変形とともに、粒子放出チャネルを表す連続状態を考慮に入れることが重要になる。これらの要素を取り入れた応答と励起の

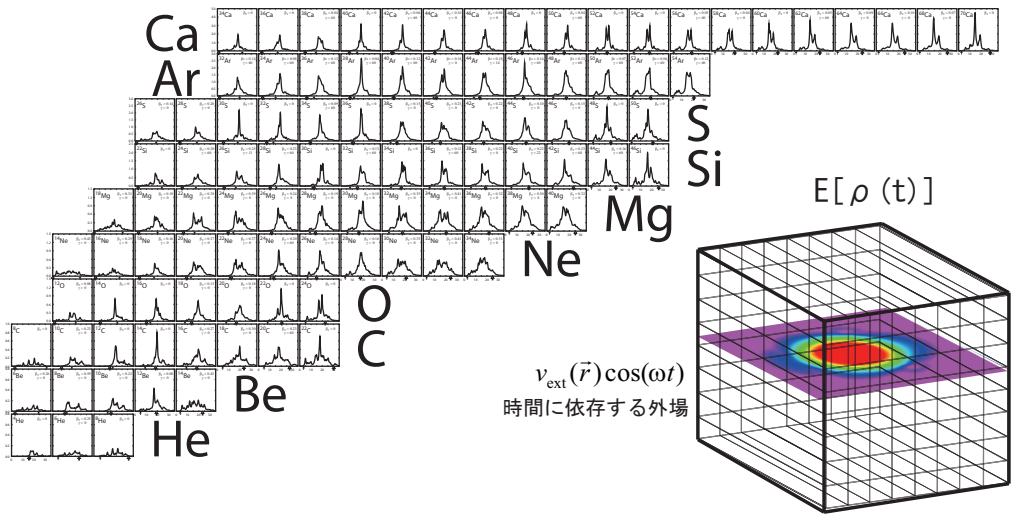

図 34: 時間依存 Skyrme 密度汎関数理論による核光吸収断面積の系統的な計算。

計算が進行しており、中性子過剰核で中性子の示す新しい素励起モードを探索する基本的な手段を与えるものと期待される。

密度汎関数理論は、核分裂や重イオン融合反応のように系の配位が時間とともに大きく変化する量子ダイナミクスの非経験的な記述も可能である。さらに、中性子星の内部における核物質の様々な構造を定量的に予測することも含め、対称性に制限を課さない３次元ダイナミクス計算を発展させ、周期境界条件を持つ非一様系の記述を開発していくことも今後の重要な課題である。

6.4 散乱状態との結合を扱う核構造理論を構築する

孤立した量子多体系である原子核は、散乱や反応の量子論の発展を担ってきた。不安定核の研究の進展に伴い、ドリップ線に近い原子核には弱く束縛した量子多体系としての特徴が現れ、ドリップ線を越えた原子核は準束縛な共鳴状態として観測される。このため、散乱や反応の理論と構造の理論を融合した、準束縛な系に対する量子多体理論の発展が、新たに必要とされている。このような散乱や反応と構造の統一的な扱いの例として、これまでにクラスター分解の閾エネルギー付近に現れるクラスター状態を記述するために発展してきた、共鳴群の方法や生成座標の方法がある。

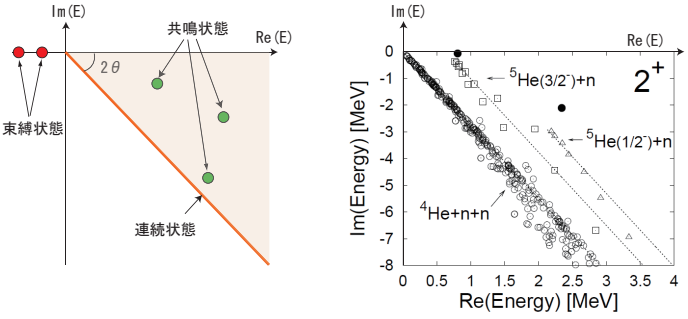

図 35: 複素スケーリング法による ^{6}He の構造の記述。加藤・池田、日本物理学会誌 Vol.61 No.11, 814 (2006) より。

束縛状態と散乱状態を統一して扱う際に問題となるのは、配位混合を記述するために有限のノルムを持つ基底関数が必要とされるのに対し、散乱状態は規格化ができないことである。このため、可積分な関数を用いて連続状態を記述する方法が整備されてきた。座標を複素数に拡張する複素スケーリング法はその一例であり、このような手法を用いて、多粒子の共鳴状態や散乱を記述することへの数多くの挑戦が展開している。

平均場描像を出発点にとる多体理論でも、構造と散乱を統一的に扱う様々な試みがなされている。弱

束縛系を記述するためには正エネルギーの連続スペクトルを持つ１粒子状態を扱う必要があり、規格化をできない連続スペクトルの状態を、多体理論の枠組みでどのように取り入れるかが課題となる。殻模型では、漸近的に外向波のみを持ち複素エネルギーの状態を用いるガモフ殻模型など、連続状態殻模型と呼ばれる新しい殻模型の定式化が展開されている。中性子ドリップ線近傍の原子核に対する対相関の記述には、束縛した１粒子状態の存在を前提にするＢＣＳ近似を超えた取扱が必要である。である。対相関と同時に非束縛および束縛状態の波動関数を同時に解くハートリー・フォック・ボゴリューボフ (HFB=Hartree-Fock-Bogoliubov) 理論の発展を基礎に、その動的な拡張である準粒子 (quasiparticle) 乱雑位相近似 (QRPA) への展開が活発に進められている。

6.5　精密な核反応理論を発展させる

反応実験は、孤立系である原子核の情報を得る主要な手段である。安定核では電子や陽子、α 粒子など高い強度とエネルギー精度のビームを用い、基底状態の密度分布や相関、励起状態の構造などの情報が得られてきた。不安定核では、強度や精度が劣る２次ビームによる逆反応実験が、主要な実験手段である。このため、不安定核の核構造に関する情報を正確に抽出するために、従来の反応理論で採用されてきた現象論的要素を、より普遍性のある微視的記述に置き換ええ、予言力とともに高い定量性をも併せ持つ新しい反応理論の構築が必要となる。

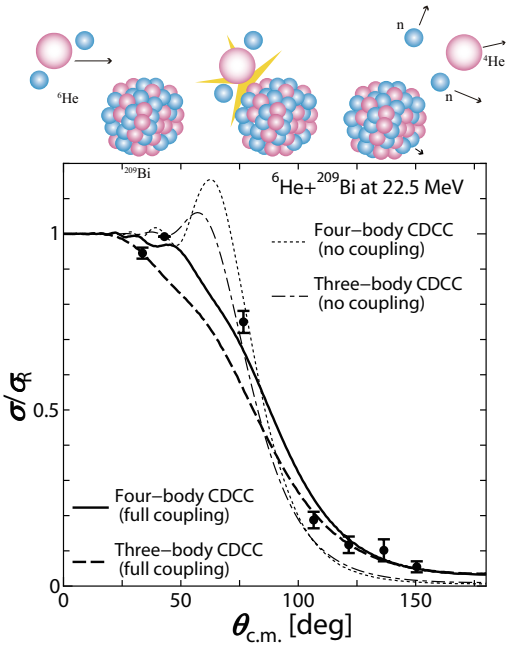

図 36: ^{6}He の分解を３体および４体 CDCC 法で取り入れた弾性散乱断面積の角度依存性。T. Matsumoto et al., Phys. Rev. C 73, 051602(R) (2006) より。

不安定核の半径、密度分布に関しては、原子核どうしの衝突による相互作用断面積や、陽子と不安定核の弾性散乱が主要な情報源となる。相互作用断面積に対しては、RIBF のエネルギー領域ではグラウバー理論が有効である。陽子弾性散乱は、密度の決定に有効であるとともに、他の反応過程を記述する上での基礎となる歪曲波の情報を得る目的がある。しかし、２次ビームによる実験では、弾性散乱を記述する光学ポテンシャルをデータから精密に決めることは容易ではない。そのため、散乱状態での有効核力を非経験的に求める取り組みが行われている。非弾性散乱や移行反応は、励起状態の情報を抽出する上で不可欠な手段であり、非経験的に求めた光学ポテンシャルや遷移密度に基づく精緻な結合チャネル理論を発展させることも重要な課題となっている。中性子スキンの厚さを決定するためには、陽子と中性子の密度分布を区別して決定することが必要になる。陽子の核半径を直接測定できる場合には、陽子と中性子を合わせた核物質半径との差から中性子スキンの厚さを得ることができるが、陽子半径の情報が得られない核種に対しては、精密な核反応計算から中性子と陽子の分布の差を求めなければならない。

弱束縛で特徴づけられる不安定核は、反応の過程で容易に分解する。これまで実験の行われた ^{6}He や ^{11}Li などの２中性子ハロー核の分解反応では、分解片の運動量分布の精密な測定から、中性子間の相関や、励起状態に現れる中性子ソフトモードに関する情報が得られてきた。このような入射核が分解し終状態が３体以上の分裂片となる反応には、連続状態との結合を考慮した記述が必要であり、CDCC 法などによる解析が発展している。さらに現実的な核力から出発した第一原理的な反応の計算が進展している。従来から３核子系の反応に対しては、ファデーエフ理論による精密な記述がなされ、現在も３体力の検証などに向けた取り組みが行われている。それに加え、４核子以上の系を対象にした原子核反応を、現実的核力から出発して記述する第一原理計算は、今後の重要な発展方向である。軽い原子

核構造の第一原理計算に成功を収めた変分法やモンテカルロ法などの大規模計算を、反応に拡張する試みはその第一ステップである。

コラム：ナノサイエンスと原子核理論

電子の多体系を扱う物質科学の理論は、相互作用や長さ・時間のスケールは全く異なるが、凝縮したフェルミ流体を扱う点で原子核の理論と共通する部分が多い。実際、核物質の理論の草分けである Brückner 理論は、グリーン関数を用いた量子多体理論を構築するきっかけでもあった。量子多体論の発展は、電子多体系と核子多体系を両輪として発展してきたのである。

物質科学分野では微細加工技術の発展に伴い、最近 20 年の間にナノ物質の研究が基礎・応用の両面で発展している。数個から数万個の原子からなる金属クラスターは、(球形) ポテンシャルに閉じ込められた電子の多体系であり、魔法数や変形構造、巨大共鳴など、原子核との類似性が著しい。さらに量子ドットや、凝縮した原子ガスなど、さまざまな有限量子多体系の研究が発展している。

それらの系を定量的に記述する理論や手法も共通したものが発達している。グリーン関数モンテカルロは少数系の厳密解を得るための共通の枠組みであり、非経験的変分法も原子分子と原子核に共通して用いられる。量子化学の主要なアプローチである配位混合計算は、原子核の殻模型と対比できる。核図表全般に有効な密度汎関数理論と、その励起状態への拡張版である時間依存密度汎関数理論は、物質科学分野の第一原理計算の主要なアプローチとなっている。