

3 不安定核物理

Physics of Unstable Nuclei

今井伸明	Imai Nobuaki	代表 東京大学・原子核科学研究センター
笹野匡紀	Sasano Masaki	副代表 理化学研究所・仁科加速器研究センター
磯部忠昭	Isobe Tadaaki	監事 理化学研究所・仁科加速器研究センター
王惠仁	Ong Hooi Jin	中国科学院近代物理研究所/大阪大学・核物理研究センター
坂口聡志	Sakaguchi Satoshi	九州大学・理学研究院
鈴木大介	Suzuki Daisuke	理化学研究所・仁科加速器研究センター
新倉潤	Niikura Megumi	東京大学・理学系研究科
山上雅之	Yamagami Masayuki	会津大学・コンピュータ理工学部
渡辺裕	Watanabe Yutaka	高エネルギー加速器研究機構・和光原子核科学センター
青井考	Aoi Nori	大阪大学・核物理研究センター
浅井雅人	Asai Masato	原子力機構・先端基礎研究センター
板橋健太	Itahashi Kenta	理化学研究所・仁科加速器研究センター
市川雄一	Ichikawa Yuichi	九州大学・理学研究院
井手口栄治	Ideguchi Eiji	大阪大学・核物理研究センター
岩佐直仁	Iwasa Naohito	東北大学・理学研究科
上野秀樹	Ueno Hideki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
大西哲哉	Oonishi Tetsuya	理化学研究所・仁科加速器研究センター
大田晋輔	Ota Shinsuke	東京大学・原子核科学研究センター
大津秀暁	Otsu Hideaki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
加治大哉	Kaji Daiya	理化学研究所・仁科加速器研究センター
佐藤哲也	Sato Tetsuya	原子力機構・先端基礎研究センター
嶋達志	Shima Tatsushi	大阪大学・核物理研究センター
炭竈聡之	Sumikama Toshiyuki	理化学研究所・仁科加速器研究センター
銭廣十三	Zenihito Juzo	理化学研究所・仁科加速器研究センター
園田哲	Sonoda Tetsu	理化学研究所・仁科加速器研究センター
武智麻耶	Takechi Maya	新潟大学・自然科学研究科
民井淳	Tamii Atsushi	大阪大学・核物理研究センター
寺西高	Teranishi Takashi	九州大学・理学研究院
中村隆司	Nakamura Takashi	東京工業大学理学院
西尾勝久	Nishio Katsuhisa	原子力機構・先端基礎研究センター
西村俊二	Nishimura Shunji	理化学研究所・仁科加速器研究センター

羽場宏充	Haba Hiromitsu	理化学研究所・仁科加速器研究センター
道正新一郎	Michimasa Shin'ichiro	東京大学・原子核科学研究センター
森本幸司	Morimoto Kouji	理化学研究所・仁科加速器研究センター
山口貴之	Yamaguchi Takayuki	埼玉大学・理工学研究科
山口英斉	Yamaguchi Hidetoshi	東京大学・原子核科学研究センター
上坂友洋	Uesaka Tomohiro	世話人 理化学研究所・仁科加速器研究センター

3.1 不安定核物理とは

原子核は核子と総称される陽子と中性子から構成される。原子核の内、無限の寿命を持ち、天然に安定に存在する原子核は安定核と呼ばれる。ある決まった陽子数に対して、安定に束縛しうる中性子数は幾つかあり、したがって一元素に対して安定同位体と呼ばれる安定核が幾つか存在する場合がある。例えば、水素の安定核には、陽子1個の軽水素と陽子1個と中性子1個からなる重水素がある。さらに中性子を1個加え、三重水素と呼ばれるが、これは安定に束縛できず、12.3年の半減期でヘリウム3原子核にβ崩壊する。三重水素のように強い力では束縛するが、有限の時間内で壊変する原子核を不安定核と呼ぶ。

原子核は約 $1 \text{ GeV}/c^2$ の質量をもつ核子が、MeV 単位の核力の様々な成分によって絶妙なバランスの上に構成された量子多体系である。不安定核物理は、このような複雑なシステムである原子核を支配する普遍的な法則を、陽子数や中性子数を任意に変化させた不安定核研究を通して明らかにする。安定核では埋もれている秩序や相関を解明し、翻って安定核を含む、陽子と中性子から成る量子多体系をより深く理解することを目指した学問である。図3-1は、不安定核を含む全ての原子核中の1核子当たりの質量エネルギーを示している。高さが低い原子核ほど安定である。谷に位置するのが安定核であり、谷から尾根にかけて不安定核が存在する。この谷の斜度を決めている機構、また尾根の向こう側の世界の秩序を明らかにすることが、不安定核物理の重要な使命である。

不安定核研究は、量子多体系の物理の興味の他に学際研究も盛んな分野でもある。例えば、我々の体を構成する元素は、宇宙のどこかで生じた爆発的な天体現象において生成されたと考えられているが、その元素合成過程に不安定核が大きく関与するため、不安定核の性質の研究を通して、マクロな天体現象の爆発時の時間スケール等が議論されている。その他、不安定核は安定化するとき放射線を発生する。特定の不安定核から放出される放射線は、核医学として現代医療に不可欠なものである。これら医療用不安定核の大量生成等も一つの研究テーマとなっている。

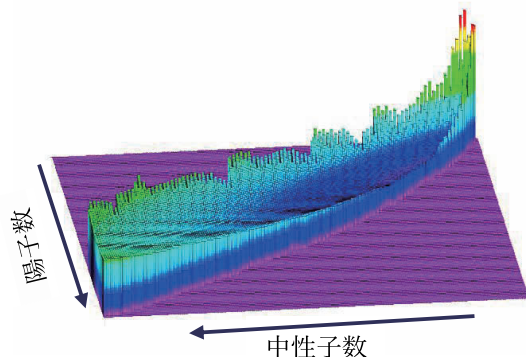


図 3-1 天然に安定に存在しない原子核を含めて予言されている原子核中の1核子当たりのエネルギー。横軸は中性子数、縦軸は陽子数。安定な原子核はエネルギーが極小になる。

3.2 不安定核物理の現状

核子を結びつけるのは核力である。この核力の性質、例えば核子が近距離では斥力になり、一

方で遠距離では引力となるとい性質は核子-核子散乱測定から求められる。では、このようにして決めた核力で核子を有限個組み合わせると、原子核の全ての性質を再現できるのであろうか。陽子と中性子は幾つまで束縛できるのか。陽子数と中性子数を自由に変えた時の核構造はどう変化するのか。多数の核子が関与することで現れる相関は無いのか。エネルギーを上げた場合や角運動量を加えた場合に、これら原子核はどのような応答を示すのか。原子核のこれらの基本的な疑問に、原子核という概念が誕生して 100 年が経った現在、ようやく答えられるようになってきた。

理化学研究所で成功した 113 番元素 Nh の合成は原子核の限界を検証する試みの結果である。図 3-2 に、魔法数の破れ、多中性子ハロー、変形共存現象、クラスター崩壊といった、今までに発見されたエキゾチックな現象を図示している。いずれも、様々な量子多体効果によって発現した現象であり、今後も核図表の拡大によって、核子間の散乱からだけでは予想もつかない新奇現象の発見があることを期待させる。このようなエキゾチックな現象は主に 1990 年以降に発見された。 β 線を出して壊変する不安定核がビームとして生成できるようになった結果（これを放射性同位体ビーム、RIB と呼ぶ）、陽子数と中性子数を自由に変えて、その性質が調べられるようになったためである。

3.2.1 不安定核研究の歴史

原子核物理学は 20 世紀中旬から現在に至るまで、日本人がその独自性を発揮し、世界を牽引してきた分野であった。特に仁科芳雄は、ノーベル賞受賞者である湯川、朝永両博士を指導するなど、今日の原子核素粒子理論物理学における日本の礎を作った。理論研究だけでなく、日本で初めてサイクロトロン加速器を作り、原子核実験を行った実験家でもあった。実際、加速した陽子を用いてウラン 238 から中性子一つ弾き出し、世界で初めてウラン 237 を作っている。

仁科の弟子にあたる湯川秀樹が、中間子論によって日本で初めてノーベル賞を受賞したことは良く知られている。この中間子論によって湯川が説明を行った核力は、今なお最先端の原子核構造研究の対象である。例えば、最も軽い中間子である π 中間子に対して、交換力の効果を数式で書き下すとテンソル成分が出てくる。昨今の陽子数と中性子数が極端に違う不安定核構造では、このテンソル成分が核構造進化を支配する原因であるとされ再注目されている。

戦後の原子核理論研究において、原子核中の中間子効果や配位混合の理論が、原子核理論の発

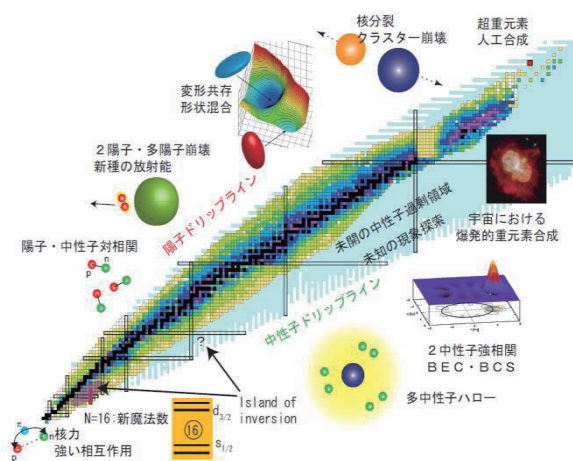


図 3-2 核図表と、原子核で現れる様々な物理現象(RIBF 理論推進会議報告より転載)。

展に寄与する重要な貢献が、各々、宮沢弘成、有馬朗人・堀江久らによってなされた。また、陽子数と中性子数が共に偶数の偶偶核における離散スペクトルを説明するために、藤田純一や丸森寿夫¹らは朝永振一郎が考えたボゾン展開の理論的基礎を推し進めた。また、有馬-Iachello の相互作用ボゾン・モデル(IBM)は Mayer-Jensen の殻模型, Bohr-Mottelson の集団運動模型とならぶ、励起スペクトルを理解する上で重要なモデルの一つとなっている。

2008 年にノーベル賞を受賞した南部陽一郎の自発的対称性の破れの概念は、ヒッグス粒子によって素粒子が質量を持つ機構を説明する理論として一般に認識されているが、対称性を持った量子系でよく起きる現象であり、核構造を説明する上でも重要な概念である。原子核が表面張力を持つ液滴と考えると、球形の場合に表面積が最も小さくなるためにエネルギー的に最低になる筈が、敢えて変形する(=対称性を破る)ことで、よりエネルギーの低い状態を作り得る。また、破れた対称性を回復するために回転運動等の集団運動が発現する。

戦後の国内の核物理実験の環境に目を向けると、1954 年に東京大学に日本初の全国共同利用研である原子核研究所ができ、加速器を用いた核物理実験研究が始まった。原子核研究所は、その後、高エネルギー加速器研究機構、東京大学宇宙線研究所、東京大学理学系研究科附属原子核科学研究センターへと発展的に繋がっている。理化学研究所では、1966 年に現在の和光キャンパスに重イオン加速器が設置され、ビームを標的に照射して主に標的原子核の性質を調べる研究が展開された。

安定核近傍の原子核実験研究からの転機が 1980 年ごろ訪れた。不安定核をビームとして生成し、原子核の励起状態の性質等の分光実験を行うことがフランスで提唱された。1980 年中頃には、谷畑勇夫²らによりアメリカのローレンス・バークレー研究所に於いて、リチウム 11 (^{11}Li) という同位体の基底状態で、核半径が ^{208}Pb に匹敵するくらいに大きいことが発見された。この現象は 2 個の中性子が、中心の原子核に対して光背の如く空間的に広がっている状態であり、中性子ハロー核と呼ばれる。安定核では見られなかったこの特異な現象は核物理研究者を熱狂させた。このハロー不安定核の発見は、世界中で RIB 施設を建設させ、研究を展開させる契機となった。

日本では理化学研究所において従来の RIB 装置よりも一桁ビーム強度が上がった、第 2 世代の RIB 分離装置である RIPS(Riken Projectile fragment Separator)が理研の久保敏幸、石原正泰を中心とするチームにより開発され、世界的にユニークな研究が展開されてきた。本林透は中間エネルギーのクーロン励起を ^{32}Mg に対して世界で初めて実現し、 ^{32}Mg 近傍で核構造異常が起こっていることを明らかにした。櫻井博儀は ^{31}F を発見した一方で、フッ素同位体に比べて陽子が 1 個少ない酸素同位体では、 ^{24}O までしか存在しないことを見出した。この酸素同位体の束縛限界は、核構造に通常の二体力だけでなく、三体力の効果が不可欠であることが近年分かった。本林と櫻井はこれらの功績により 2016 年に仁科記念賞を受賞している。

2006 年には第 3 世代の RIB 施設である RIBF(RI Beam Factory)が竣工した。世界最強の超伝

¹ 有馬と共に「原子核の集団運動現象の解明」の功績に対し 1978 年に仁科記念賞を受賞。

² 「不安定原子核ビームによる原子核の研究」の功績に対して 1989 年に仁科記念賞を受賞。

導サイクロトロンで加速したウラン等の重イオンビームと、新しい入射核破碎反応生成分離装置 BigRIPS を組み合わせることで、RIPS で得られる強度の 10 倍以上のビームを供給できるようになった。RIBF の成功を受けて、アメリカの FRIB、ドイツの FAIR の様に世界中で次世代 RIB 施設が現在建築中である。これらが完成するまでは、RIBF が世界で最強度の不安定核ビームを供給することが出来る。実際、理研の RIBF に世界中から研究者が集まり、成果を挙げ続けている。

本報告書は、不安定核物理に関する過去数年の成果を紹介すると共に、今後も引き続き、日本が世界の原子核研究の中心として立ち続けるための戦略を議論するものである。原子核は量子多体系であるがために、少数系から多体系まで、様々な切り口があり得る。個々の研究を並列に記述するのは互いの関係を理解する上で得策でないと考え、本稿では、「未知量子多体系の探索」、「核反応」、「量子多体系としての原子核」、「宇宙核物理」という 4 章で構成し、各章で個々の研究テーマを紹介する。

物理の議論に先立ち、国内で不安定核研究を展開している研究室、研究所を紹介する。また、海外での同種研究所について紹介して、国際的な競争状態を概観する。

3.2.2 国内の不安定核実験研究機関

国内の大学、国立研究所において不安定核研究を推進しているのは図 3-3 で示す様に国内で 17 機関あり、互いに協力しながら実験研究を推進している。



図 3-3 国内の不安定核研究機関一覧。

国内で不安定核ビームを供給する施設は幾つかある。上述したように、理化学研究所の仁科加速器研究センターの RIBF は国内だけでなく世界的にも主要な施設となっている。

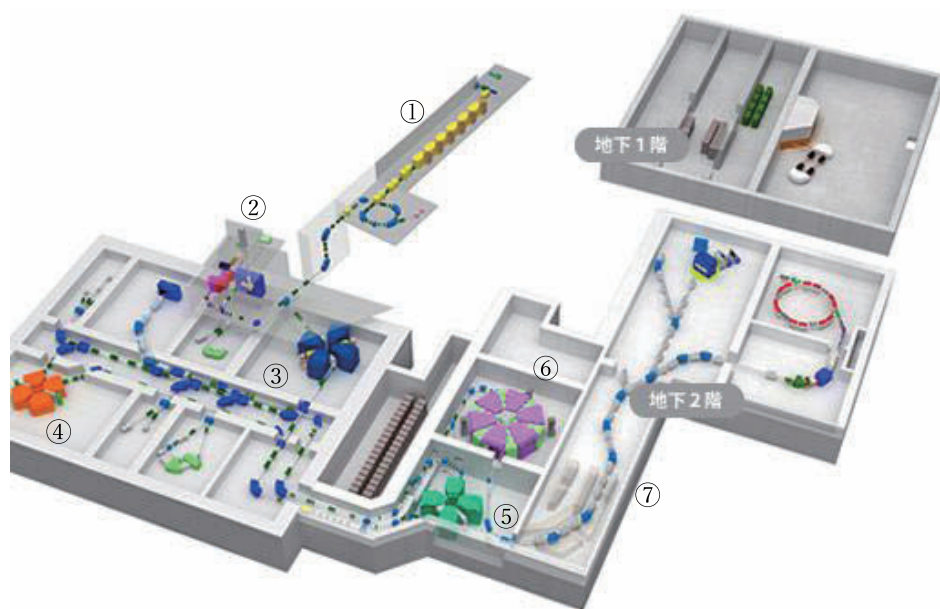


図 3-4. RIBF 施設鳥瞰図。①線形加速器、②AVF サイクロトロン、③リングサイクロトロン、④fRC サイクロトロン、⑤IRC サイクロトロン、⑥超伝導サイクロトロン、⑦BigRIPS

RIBF は 5 台のサイクロトロンと 2 台の線形加速器からなる、複合加速器施設である (図 3-4)。例えばウランから不安定核を生成する場合には、線形加速器で光速の 5% まで加速した後に、4 台のサイクロトロンで連続的に光速の 70% にまで加速する。その後、ベリリウム標的に照射し、BigRIPS と呼ばれる破碎反応生成分離装置でもって、飛行核分裂によって生成される不安定核の中から研究対象となる不安定核だけをビームとして選び出す。

RIBF の他、日本全国に中型、小型の加速器を有する加速器施設があり、不安定核に関する研究が推進されている。東北大サイクロトロンラジオアイソトープセンター(CYRIC)ではフランシウム不安定核を生成した基礎物理を展開している。日本原子力研究開発機構タンデム加速器施設では超重元素領域での核分裂機構や、超重元素の化学特性を精力的に調べている。筑波大学タンデム加速器施設は核反応を用いて安定核近傍の不安定核を生成して、核構造研究を展開している。放射線医学総合研究所では、高エネルギー重イオンを癌治療への応用研究に利用しているが、休日、夜間は基礎物理研究にもビームが供給され RIBF での実験の前駆的な実験が展開されている。九州大学タンデム加速器施設では長年、宇宙での元素合成に関与する核反応研究が行われてきた。大阪大学 RCNP では RIPS と同程度の性能を持つ分離装置が設置され軽い不安定核の研究が展開

されている。また核物質の手法を利用し、不安定核の物理を追及している。

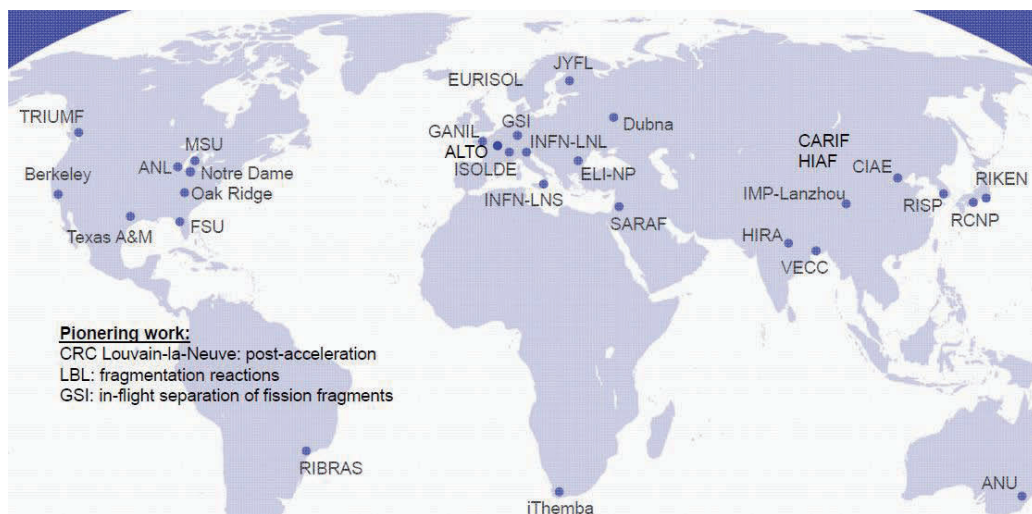


図 3-5 世界の不安定核施設 [6]。

3.2.3 海外の主な研究機関

不安定核物理の研究は、国際的にも非常に活発である。既に、RIBF と比肩する大型加速器施設が世界で幾つか稼働中である。また、更なる超大型施設が建設中、もしくは計画されている。世界の不安定核施設を図 3-5 に示す。大小合わせて世界で 30 弱の施設が稼働している。ユーザー数が 500 名を超える大型施設として、理研の RIBF (ユーザー数~600 人) の他にドイツの GSI (~1000 人)、フランスの GANIL (~500 人)、アメリカの NSCL (1300 人) がある。各々次期計画として、FAIR、SPIRAL-2、FRIB が計画されている。FAIR は 2025 年の稼働に向けて準備を進めている [1]。FRIB では 2020 年の施設運用開始に向けて急ピッチで準備が進められている [2]。またアジアに目を向けると、既に中国で HIRFL が稼働している。これらの施設は飛行分離型の不安定核生成法を採用し、安定核ビームを光速の数 10% まで加速した後、標的に照射し核反応により生成した種々の不安定核ビームから電磁石等によって目的の不安定核だけを分離する。ビームの純度、サイズなどの品質は後述の ISOL 方式に比べて落ちるものの、寿命が μs 単位の不安定核ビームを生成できるため、よりエキゾチックな原子核の分光に適している。

一方、ヨーロッパ CERN にある ISOLDE 施設、カナダの TRIUMF 研究所の ISAC 施設等では ISOL 方式と呼ばれる上記とは異なる不安定核ビーム生成法が採用されている。ISOL 方式では大強度の陽子ビーム等を厚い標的に照射し、核反応で生成した不安定核を標的に一旦止める。標的を高温で熱して、不安定核の原子を炙り出し、イオン源へ輸送して、プラズマやレーザーでイオン化して引き出した後に線形加速器で加速する。生成以外は安定核ビーム供給スキームと同じであり、安定核ビームと同様な高品質ビームが期待できる。但し、熱によって標的から不安定核原子を炙り出すために、不安定核の化学的性質に大きく依存し、またその過程で 100 ms 程度の

時間がかかるため、供給できない原子核が多い。ISOLDE と ISAC の後継機として線形加速器のエネルギーを上げた HIE-ISOLDE [3]、ARIEL 計画 [4] が各々進んでいる。フィンランドのユバスキラ大学では、ISOL 方式の変則版である、IGISOL 方式を用いている [5]。これは薄い標的を何段も並べて、反応生成物を標的から出てくるようにする。標的周囲は高速 He ガス流で満たすことで、反応生成物を 1 価イオンとして輸送する。この手法を用いることで、ISOL では生成出来ない核種やウランよりも重い不安定核の核分光研究に於いて一歩先んじている。

建設費用で区別した各施設を表 3-1 にまとめた [6]。現在は、300 億円程度の建設費で作られた RIBF(日本)、FRIB(アメリカ)、HIRFL(中国)が最先端の施設となっている。次の一歩は、1000-3000 億円級の飛行分離型と ISOL 型を融合させた大型施設になる。この大きさになると、地域研究機関としてよりは国際研究機関として位置づけられるのが適切である。欧州では EURISOL と呼ばれる大型施設建設に向けて EU 全体で協力体制を作っている。HIE-ISOLDE、SPIRAL-2、SPES 全てが EURISOL 建設に向けた R&D という立場である。韓国では RAON と呼ばれる次世代施設が現在建設中である。中国では加速器駆動核変換施設と併設する新重イオン加速器施設 HIAF と呼ばれる施設計画が立ちあがっている。

FAIR や FRIB が出来た時には、RIBF が現在持つビーム強度の点での優位性は失われると予想される [7]。これらの施設を含め、HIAF、RAON、EURISOL 等の超大型計画を勘案した、日本独自の将来計画策定が課題となっている。

2016 年の日本学術会議が募集した、「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」に理研 RIBF の加速器施設のビーム強度向上や検出器群の整備が提案された。計画の一部である入射線形加速器の向上が認められ、2017 年中に工事が開始される。

表 3-1 世界の大型施設。建設費で分けている。*は計画中を示す。

30 億円	100 億円	300 億円	1000 億円	3000 億円
個施設、国立研級		地域級		国際級
ARIEL* (カナダ)		FRIB*(アメリカ)		CARIF*(中国)
HIE-ISOLDE(CERN)		HIRFL(中国)		EURISOL*(欧州)
SPES*(イタリア)		RIBF (日本)		RAON*(韓国)
		SPIRAL-2*(フランス)		FAIR*(ドイツ)

3.3 各研究の現状、および展望

本節は「未知量子多体系の探索」、「核反応」、「量子多体系としての原子核」、「宇宙核物理」という 4 小節で構成される。各節で不安定核物理の中の個々の研究テーマを紹介すると共に、今後の研究の展望について述べていく。

3.3.1 未知量子多体系の探索

地球上の物質は、およそ 200 の安定な原子核からなる。こうした安定核の他に、6000 種あまりは放射性同位体として存在しうると理論的には予想されており、その一部は、超新星爆発や中性子星連星合体のような高エネルギー天体現象に関与していると考えられている。このうち、人類が合成に成功しているのは、約 3000 種。残りの 3000 を合成することは、将来の大きな課題である。未だ知られざる原子核を発見しようとする素朴な好奇心は、核物理を推し進める力の源泉である。19 世紀末の、キュリー夫妻によるラジウムの発見は、その一つの象徴だろう。閃ウラン鉱から分離精製された、強い放射性をもつこの新元素は、当時は正体不明だった α 線の起源が実は ${}^4\text{He}$ 原子核であることを解き明かす端緒となり、やがて「元素は不変である」という当時の常識を覆すことになった。未知の原子核は、時として、私たちが今まで知らなかった量子状態や量子現象を内包していることがあり、常に新しい知見を人類に与えてきた。

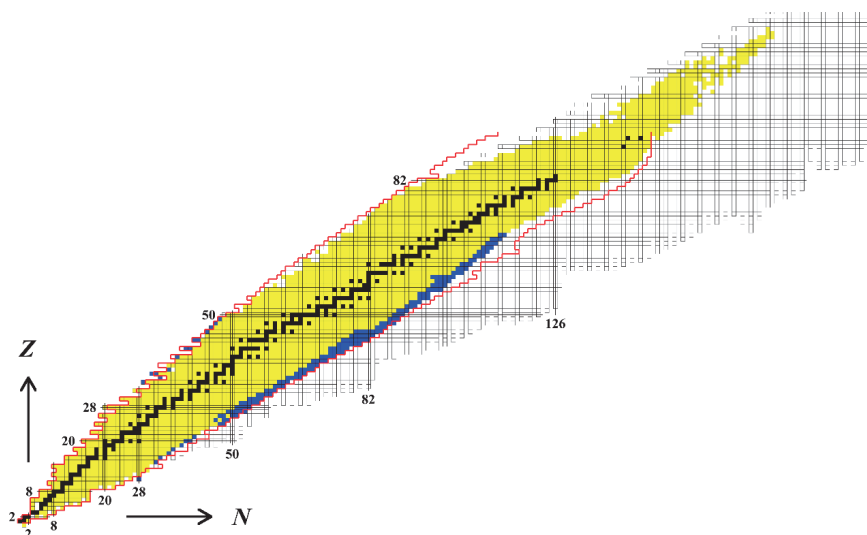


図 3-6 2017 年 12 月現在の核図表。黒は地球上に存在する原子核。黄色は、現在までに発見されている放射性同位体。青は 2007 年から 2017 年の間に、RIBF において発見された 194 個の新同位体。白は存在が予想されている原子核。赤線は、 ${}^{238}\text{U}$ の強度 $1\text{ p}\mu\text{A}$ が得られた時、RIBF で一日一個生成可能な限界ライン。数字は安定核のデータから見つかった従来の魔法数。

原子核の安定性、あるいは束縛性は、原子核を規定する様々なパラメータに依存している。最大 250 個程度の陽子と中性子が凝縮してできている原子核は、多彩な自由度をもつ。代表的な例を挙げるだけでも、フェルミ二粒子系としての陽子数と中性子数の自由度、フェルミ・エネルギー、有限な大きさをもつ系に特有な角運動量や変形度がある。例えば、陽子数と中性子数をアンバランスにしてゆくと、原子核は不安定になり、やがて束縛しなくなる。それでは、陽子数と中性子数の比という自由度をどの程度まで高めると、原子核は束縛しなくなるのだろうか？ 未知

の原子核を探すということは、こうした様々な自由度を極限まで高めた時に、原子核が存在するかどうか、という問いに置き換えることもできる。

従って、未知の原子核を探すには、核に内在する自由度を操るために必要な核反応と核構造の複合的な知識と、地上の実験室で核反応の最適な条件を実現するための機器（加速器と検出器）あるいは素材（ビームと標的）が必要になる。理研の RIBF は、水素からウランまでの様々なイオンを最大で光速の 70% まで加速する能力を武器に、過去 10 年でこのフロンティアを拡大してきた。図 3-6 は、RIBF で発見された新同位体と、RIBF が今後開拓してゆく領域を示している。陽子数が大きい極限として、陽子数 113 番のニ

ホニウム生成の成功 (図 3-7)[8] は、最近の日本の核物理研究成果の中でも特筆すべきものである。一方で、逆の極限の陽子数 0 の原子核を作る試みもなされてきた。4 中性子系共鳴の候補が発見された [9] ことは大きな驚きと共に迎えられた。また、陽子数と中性子数のバランスを極端に変化させた新同位体の生成探索も推し進められている。この章では各々の自由度を軸とした存在限界への挑戦を紹介し、今後の必要な研究の方針を述べていく。3.3.1.1 節では新元素探索として超重元素関連研究について述べる。3.3.1.2 節では新同位体元素探索について議論し、3.3.1.3 節では四中性子共鳴状態を含む、中性子星等で発現していると考えられている中性子物質を記述する状態方程式の探求について述べる。最後の 3.3.1.4 節にて角運動量、変形の極限状態について述べる。

3.3.1.1 新しい元素の探索

地球上の物質は、水素からウラン(原子番号 92)までの多種多様な元素からできている。ウランより重い元素は地球上には自然には存在せず、中性子の吸収反応や重イオン同士の融合反応によって、人工的に合成されてきた。特に超重元素として分類されるラザホージウム(原子番号 104)以降の元素を巡っては、時には国家的なプロジェクトとして、熾烈な国際競争が展開されてきた。超ウラン元素の人工合成の口火をきったのは、第二次大戦後の米国ローレンス・バークレー研究所であり、1961 年までに 93 番から 103 番までの元素を合成することに成功した。104–106 番元素は米国と旧ソビエト連邦間の国際競争を背景に 1974 年までに合成された。その後、ドイツの重イオン科学研究所 GSI が超重元素探索の中心となり、1980 年から 2000 年初頭までに 107–112 番元素を発見した。超重元素合成の分野では後発だった日本では、森田浩介³らが理研にお



図 3-7 ニホニウム命名権獲得時のプレスリリースの様子。

³ 「新超重 113 番元素の合成」の功績に対し 2005 年に仁科記念賞を受賞。

いて GSI データの追試実験を行い、歳月を費やして着実に準備を続けてきた。念願だった 113 番元素の合成に成功したのは 2004 年のことである。2015 年 12 月 31 日には、アジアの国として初めて、元素命名権が認められた。2016 年 11 月 30 日に、113 番元素は Nh（ニホニウム）と正式に命名された。これによって、118 番までの全ての元素の発見が認められ、命名されることとなった。図 3-8 は 119 番元素よりも重い新元素探索のための新しい反跳分離装置 GARIS II である。

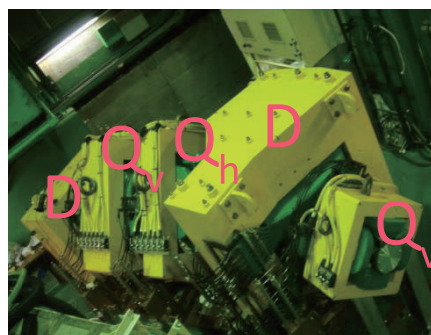


図 3-8 超重元素探索に用いられている理研 Gas-Filled Recoil Ion Separator II (GARIS II)。

118 番元素まで発見されたことで、超重元素の化学的性質と核構造の研究が、大きく進展すると期待されている。まず、超重元素は従来の周期律では説明できない新しい化学的な性質を持つのではないかと考えられている。元素の化学的性質を支配するのは原子の電子構造である。重い元素では、原子核のつくる強いクーロン場が、相対論的な効果を電子構造にもたらすようになる。これが、思いもよらない化学的特性を生じるのである。有名な例の一つは、金の色である。金は銀と同族の元素であるが、相対論的な効果によってその電子構造は、銀の電子構造から大きく変化している。そのため、金の塊は金属としては例外的な黄金色を帯びている。超重元素では、相対論的效果がさら

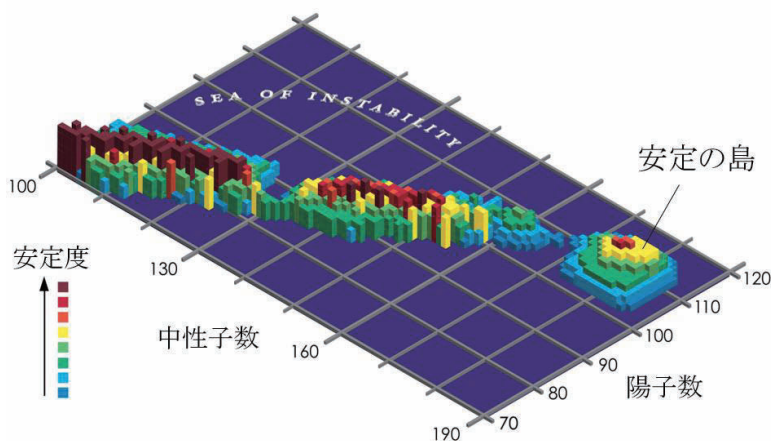


図 3-9 超重元素領域で予想されている安定の島。

に強く発現しているはずであり、新しい化学的な性質が現れるのではないかと期待されている。また、電子陽電子のヴァーチャルな対生成・対消滅まで考慮する量子電磁気学(QED)計算は、超重元素の電子系になると計算コストが膨大となり、精度をだすのが現状では非常に難しい。実験で得られる電子構造のデータは、超重元素領域での相対論的量子化学計算に指針を与えると期待されている。

超重元素の核構造の観点で注目されているのは、陽子数 112–120、中性子数 180 近傍で予想

されている二重閉殻構造である。仮に閉殻構造が存在した場合、二重閉殻近傍の超重元素は非常に長寿命をもつと考えられている（図 3-9）[10, 11]。しかしながら、「安定の島」と呼ばれる核図表上のこの領域の原子核を生成するのは、従来の超重元素生成手法を超える革新的な手法が必要となる。現在主流である安定核同士の融合反応で生成される複合核よりも、中性子過剰な超重元素を生成しなくてはならないからである。一つの有力な手法として検討されているのは、中性子過剰核ビームを用いた多核子移行反応等の核反応[12, 13]である。また、重い原子核における殻構造をより深く理解することも重要である。例えば、単位密度が高い重い原子核では、魔法数が存在するかどうか、また魔法数が核の束縛に安定性をもたらすかどうかも自明でない。安定の島に近い超重元素の分光は現状では難しいので、少し小さい原子番号の超重元素の核構造[14]を調べることでこれら魔法数の端緒を得る努力が続けられている。

118 番元素まで命名された今、119 番と 120 番元素が、新元素探索のフロンティアとなった。超重元素の合成を極めるには、核反応をいかによく知り、いかに正確にそれを制御できるかがカギとなる。従来は二つの生成手法が用いられてきた。一つは 113 番元素(^{278}Nh)生成時に用いられた質量が比較的近い安定核同士の融合反応(冷たい融合反応)と、不安定核アクチノイド標的と軽いビームを用いて生成する融合反応(熱い融合反応)である。図 3-10 は、冷たい融合反応(青点)と熱い融合反応(赤点)の断面積を比較したものである。ただし、熱い融合反応での原子番号が 114 以上の超重元素は、粒子の質量数に不定性が残る。原子番号が 112 番より

も重い場合、冷たい融合反応の断面積は急激に小さくなっている。Nh は冷たい融合反応を用いて生成されたが、より重い元素生成では断面積が小さいため現実的でなく、理研では 119、120 番新元素探索に熱い融合反応が採用されている。断面積の予想は未だ成功しておらず、間接的な実験によって融合確率を求める努力もなされている[15]。

RIBF では超重元素研究をさらに推進するために、イオン源と線形加速器のアップグレードが 2017 年後半に始まった。他方、ロシアでは 118 番元素の名前ともなったオーガネシアンが超重元素ファクトリーを建設中である [16]。中国、フランスでも同様の計画が立案されており、今後の競争が一気に厳しくなると予想される。こうした競争と同時に、いかに国際間の連携を図るかが、今後の超重元素研究を進める上では重要になってくる。例えば、119、120 番元素合成には ^{248}Cm 、 ^{249}Bk 、 ^{249}Cf などの標的が必要となる。これらの物質は ^{244}Cm などに原子炉からの中性子を大量に照射することで生成できるが、特殊な技術を要する。また ^{249}Bk は半減期が 330 日と特に短い。現在、これらの標的を製造しているのは世界中でアメリカのオークリッジ国立研究所だけである。理化学研究所はオークリッジ研究所と共同研究を締結し供給を受けている。

今後の超重元素研究において、国際競争を制するには供給できるビーム量、ビームの種類、生成された超重元素の質量分析器の精度と効率などが決め手となる。日本は、世界に先駆けてチタ

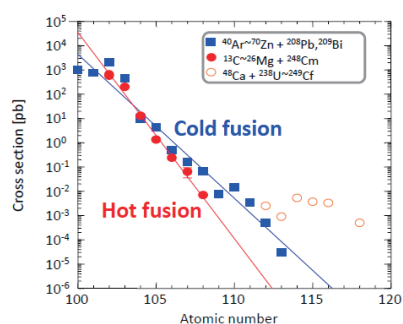


図 3-10 超重元素生成断面積。冷たい融合反応断面積(青)と熱い融合反応断面積(赤)の違い。

ンやバナジウムビームの大強度化に成功している。他方、超重元素の質量分析はまだどの施設も成功していない。熱い融合反応を用いて超重元素を生成した場合、 α 線崩壊先の原子核は過去に生成例がない場合が多い。すぐに核分裂反応が起きてしまうことも多く、超重元素の同定が難しい。国内では同定方法として、超重元素の直接質量測定装置(MR-TOF)を開発中である。今後も優位性を保って研究を進めるには、これらの開発を続けることが不可欠である。また、熱い融合反応での超重元素探索と同時に、安定の島の原子核創成に向けた研究を反応理論、実験の両面から進めていく必要がある。

3.3.1.2 新放射性同位体の探索

中性子には電荷がなくクーロン力が作用しない。クーロン力による斥力効果がない中性子は、原子核に幾つまで付けられるのであろう？新しい放射性同位体は、原子核の中性子数を変化させた時の核力の性質を調べる場となる。また、安定核から遠く離れた原子核の質量や寿命の情報は、宇宙での元素合成過程経路の解明に不可欠である。RIBF では、2007 年の施設稼働時から、新放射性同位体の発見数で世界を牽引し続けており、2017 年現在までに 194 個もの新同位元素を発見した。今後もその数を増やしていくことが期待される。図 3-11 は年代別の新同位体発見の個数を示しており、イギリス、アメリカ、ドイツ、ロシアと続いて現在は日本が最先端を走っている。

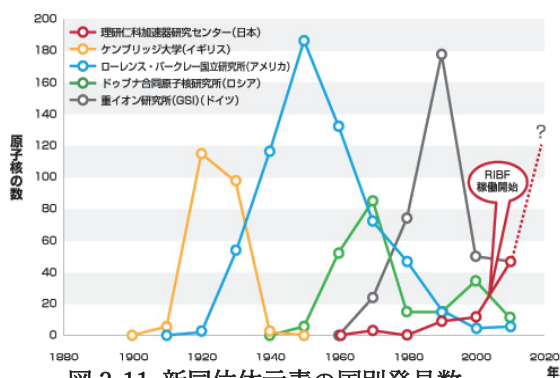


図 3-11 新同位体元素の国別発見数。

新同位体を作る方法としては ^{238}U 等の飛行核分裂反応や、入射核破碎反応がある。いずれも、安定核ビームと標的との核反応によって生成される大量に生成される原子核から、新同位体を効率良く分別する必要がある。図 3-12 は、RIBF の入射核破碎反応ビームラインの破碎片分離装置 BigRIPS による粒子同定の様子を表している。縦軸が原子番号に、横軸が質量数と電荷の比に対応する。図上にまだら状にひろがる丸い文様の一つ一つが、異なる原子核を表している。質量電荷比の分解能は 0.034%と極めて高く、BigRIPS では、スズのような比較的重い原子核でも十分に識別できる。

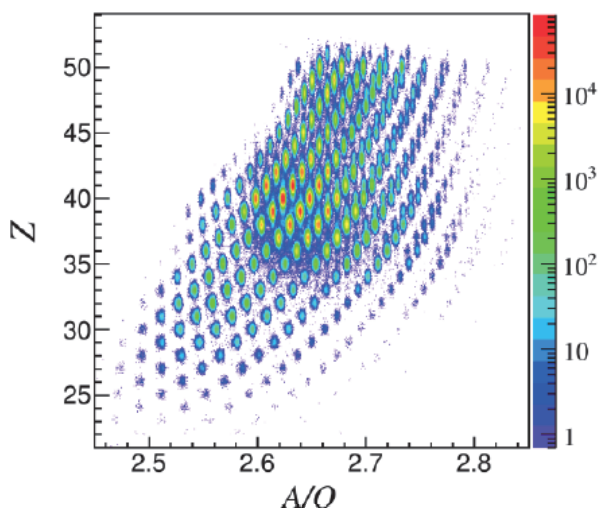


図 3-12 陽子数(Z)と、質量電荷比(A/Q)の相関。

飛行核分裂反応や入射核破碎反応によって、新しい同位体を生成するには、

いかに高い強度の一次ビームを標的に照射できるかがまず重要である。2007 年の RIBF 始動から 10 年の間で、RIBF の加速器チームは、ウランビームの強度を 0.002 pnA から約 50 pnA へと、実に 20,000 倍も向上させることに成功した。RIBF では、一次ビーム強度をさらに現在比 20 倍の 1 pμA にすることを目指している。この目標強度を達成するために、様々な技術的課題を克服すべく不断の努力が続いている。一次ビームが核反応する確率は 1%以下である。未反応のビームはビームダンプと呼ばれるストッパーに輸送され、そこで全エネルギーを落とす。その際放出される大量の熱と放射線は、周りの物質を損傷する。ダンプそのものや、近くに配置されている輸送系の電磁石の熱耐性と放射線耐性を、現状の 10 倍以上にあげる必要があると考えられている。

RIBF の供給するビームの強度化によって開かれるフロンティアは広い。今後の新同位体探索において目標となるのは、超中性子過剰領域での核構造研究のための ^{60}Ca ($Z = 20$, $N = 40$) の生成、r 過程滞留核と考えられている中性子数 126 を持つ ^{200}W 近傍核や ^{195}Tm 近傍核の生成、r 過程終端領域の中性子過剰なアクチノイド原子核があげられる。アクチノイドのような重い原子核の場合、分離装置 BigRIPS も大幅に改良する必要がある。原子核が重くなると、原子から電子が剥がれにくくなり、イオンの電荷数が陽子数からずれる。この場合、陽子数とイオン価数を両方決定しなくてはならない。もう一つの問題は、一次ビームの価数が低い成分が、二次ビームに混入してくる点である。目的の不安定核の純度をあげるには、こうした一次ビーム成分を精確に識別・分離しないとしない。質量数 200 よりも重い同位体を探索するには、BigRIPS の粒子識別と粒子分離のセクションを増やすなど工夫が必要になろう。また、RI ビームを測定する実験装置にも、大強度に対応した耐性が必要となる。現在の BigRIPS では、例えば毎秒 100 個の不安定核を実験室に供給している時に、上流の粒子識別を行うセクションで、検出器の測定上限に近い毎秒 10^6 個のビームが流れていることがある。こうした場合、例え一次ビーム強度をあげられたとしても、検出器のビーム強度への耐性が、生成標的に照射できるビーム強度を制限してしまう。放射線検出器の高強度耐性の向上も喫緊の課題となる。

中性子過剰な $N = 126$ 核や未知のアクチノイド核の探索に関しては、安定の島の原子核生成と同様、多核子移行反応がもう一つの有力な手法として注目されている [17]。RIBF では KEK のグループが中心となって、KISS (KEK Isotope Separation System, 元素選択型質量分離装置) を用いた $N = 126$ 核の生成・分離の研究を進めている [18]。中性子過剰なアクチノイド核は、 ^{238}U や ^{248}Cm の標的と ^{238}U のビームで生成できると期待されており、軽い入射核とアクチノイド標的核を用いた基礎研究が始まっている [19]。

3.3.1.3 中性子物質の探索

地球上の物質は、原子核からできている。しかし、宇宙を見渡せば、中性子星のように、膨大な数（およそ 10^{57} 個）の核子が重力によって高密度に凝集した天体も存在する。核物質と呼ばれるこうした特殊な物質は、地球上では当然ながら試料にすることができない。そこで、地上の原子核と RI 施設で生成された同位体を用いて、間接的に核物質の性質に迫ろうとする試み

が展開されている。この節では、「中性子物質の探索」というキーワードで、そうした試みを紹介したい。

中性子物質を語る上で、まず重要なのは、核物質の状態方程式 (Equation of State, EOS) である。状態方程式といえば、理想気体を思い起こす人が多いだろう。気体の体積、圧力、温度の関係を決定づけ、身近な現象を説明する有用な方程式である。相互作用をもつ実在気体の状態方程式には、圧力や温度に応じて、気体、液体、固体という物質相が現れる。さらには、温度を下げてゆき、量子効果が顕著になってくると、超電導相や超流動相などの豊かな相構造が現れる。

自然界を構成する4つの力の一つである強い力が支配する系においても様々な相が現れることが知られている。物質の質量の大部分を担っている原子核を衝突させると高温・高密度の系が作られる。原子核を構成する陽子・中性子の二種類の核子が液体のように振る舞ったり、気体のように振る舞ったりして、あたかも氷が溶け、水が沸騰し気体になるというような変化も観測されている。原子核の基底状態と、エネルギーの低い励起状態は、絶対温度がゼロに近く、超伝導に似た構造が現れることが知られている。

それでは核子多体系を支配する状態方程式とはいかなるものであろうか？核子多体系の状態方程式は、1 fm 程度の原子核から 10 km ほどの大きさの中性子星まで 19 桁も大きさの異なる系、あるいはコンパクト連星合体や超新星爆発などけた違いのエネルギー放出を伴う天体現象を支配する。しかし、安定核の情報から導かれた従来の方程式は、中性子数と陽子数の差に依存する項の不定性が大きく、超重元素の質量、不安定原子核中の陽子・中性子密度分布の半径の差や表面振動モードのエネルギー、重イオン衝突における粒子フローなどを精度よく再現できなかった。他方、状態方程式は中性子星の質量と半径の相関に制限を与える。最近観測された太陽質量の2倍の質量を持つ中性子星 [20]は、幾つかの状態方程式を棄却することになったが、唯一の状態方程式を決定するには至っていない。

こうした不定性を取り除く試みの一つは、中性子のみからなる原子核、つまり、 $Z=0$ の原子核の探索である。二つの中性子が束縛しないことは、よく知られている。しかし、二中性子状態が束縛しなくても、多体効果によって3個以上の中性子が

束縛状態あるいは共鳴状態をつくる可能性はある。例えば、重陽子は非常に束縛が弱い、重陽子が二つ集まってできた ${}^4\text{He}$ 原子核は、多体効果によって強く束縛している。中性子多体系における束縛あるいは共鳴状態の探索は長い歴史をもつ。三中性子束縛状態は ${}^3\text{H}(n,p)3n$ 反応による探索の報告 [21]に始まり、1960 年後半から 1970 年代にかけて、理論と実験の両側面から熱狂的に研究された。一連の研究により、核力の三体力等の多体効果や、オフシェル効果に

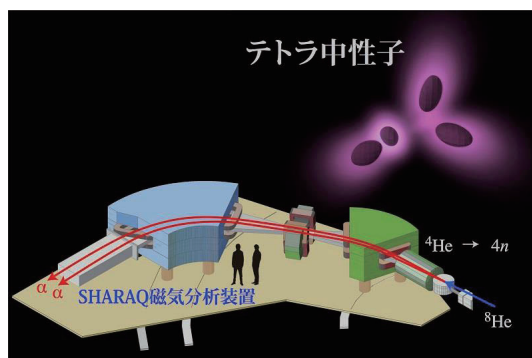


図 3-13 四中性子系の共鳴の概念図と、実験のセットアップ。

関する研究が進んだ [22]。その後、3 中性子系の研究は下火になったが、2002 年にフランスの GANIL において行われた不安定核 ^{14}Be からの 4 中性子放出崩壊の解析から、4 中性子の束縛状態の存在が示唆された [23]。2016 年に理研では、 $^8\text{He}(^4\text{He}, 4n)^8\text{Be}$ 反応(図 3-13 参照)の測定において、反応閾値よりも少し高いエネルギーに共鳴状態の候補となるピークが観測された [9]。

4 中性子系共鳴の存在は、3 つの中性子の間に作用する 3 体力が、従来の予想以上に大きいことを示唆する。この新しい力は、中性子物質の EOS にも大きな影響を与える。4 中性子の共鳴状態の詳細な情報、例えば幅や崩壊モードは、中性子星の構造の解明にもつながることが期待される。今後は、4 中性子系共鳴の詳細な分光や、6 中性子系などより大きい系における共鳴状態の探索が行われていくと考えられる。

状態方程式をめぐるもう一つの試みとして、中性子過剰核の核構造研究から状態方程式を構成するパラメータの精度をあげる研究がある。我々が取り扱っている状態方程式は系のエネルギーを核子密度、陽子・中性子の密度差（荷電非対称度）と温度の関数として表すものである。特に注目を集めているパラメータは、非対称な核物質中で陽子・中性子間の圧力差を生み出す L パラメータと、核物質の硬さを示す非圧縮率のうち荷電非対称度に依存性のある K_{sym} あるいは K_{τ} パラメータである。これらのパラメータは特に非対称度の大きな系である中性子星の構造に影響する。安定核における中性子スキン厚の測定、原子核の硬さ測定、重イオン衝突における生成粒子測定などによってパラメータの値が制限されてきたが、精度は十分ではなかった。安定核の荷電非対称度が小さかったからである。2016 年春、RIBF において、荷電非対称度が大きい中性子過剰な ^{132}Sn ビームを用いた 3 つの実験が行われた。それぞれ、反跳陽子測定装置 ESPRI [24]、アクティブ標的システム CAT [25]と多粒子同時計測装置 $S\pi$ RIT-TPC [26] という最先端の検出器を用いている。また、反応断面積、荷電変化断面積の測定によって、中性子スキン厚を様々な非対称度をもつ幅広い核に対して決定するプログラムも進行している。2016 年秋には $^{58-78}\text{Ni}$ および $^{42-51}\text{Ca}$ 同位体での測定が RIBF において行われた。

我々は状態方程式の解明にむけた新たな一步を踏み出したばかりである。パラメータの真の決定には核構造や理論モデルに由来する不定性を抑えることが重要である。今後 10 年間で測定領域を非対称度の大きな領域に広げ、測定する質量数の範囲も拡大することで、精度の向上を図る。スキン厚の測定による L パラメータの決定では中性子過剰 Ca 同位体における陽子弾性散乱や、質量数 100 以上の領域における断面積測定へと展開する。さらには大強度ビームとアクティブ標的を組み合わせた双極子遷移強度測定という新たな手法の確立にも挑む。巨大単極共鳴測定による K_{τ} パラメータの決定では、同重体に対する系統的な測定を行う。重イオン衝突による K_{sym} パラメータの決定では、より大きな非対称度とより高密度な系での測定を検討しているが、これには加速器のアップグレードが必要である。

3.3.1.4 変形、角運動量の極限

有限な大きさの系である原子核は、表面をもつ。逆に言えば、表面を何らかの理由で維持できなくなったとき、原子核は束縛の限界に達する。原子核の表面に大きく影響するのは、核の変形と回転である。この最終節では、極限の変形・回転状態の探索について少し紹介したい。

例えば、球状の液滴を回転させたとしよう。回転をどんどん早くしていくと、液滴は回転軸を対称にオブレート（パンケーキのような形）様に変形し始める。例えば地球は自転することで、赤道面が膨らんでオブレート変形している。では量子力学的な物体が回転すると、どのような変形が発達するのだろうか？ 量子力学的な物体では、対称軸まわりの回転が識別できないため、球形の物体は回転をすることができない。変形した核は、回転軸にそって、高い角運動量を持つことになる。大変形や高角運動量を原子核に導入し、どのような応答をするのかを見るのは、様々な原子核の極限状態を探る現代の核物理研究の中でも特に興味深い方向性の一つといえる。

原子核の存在限界ぎりぎりにある極限的な変形状態として、ハイパー変形状態があげられる。短軸と長軸比が 1:3 となるこの大きな変形状態は、ハイパー変形 (hyperdeformation) という名前が与えられ、これを示唆するデータはあるが [27]、まだ確定的なデータは得られていない。理論ではさらに、原子核の中心密度が非常に低い状態が、高角運動量の極限で現れると予想されている [28]。その密度分布はドーナツ型の形状をしており、従来のボール型の分布とは異なるトポロジーを持つ。これら極限的な変形、高角運動量を原子核に持ち込む方法として、低エネルギー核融合反応、高スピニアイソマービーム、高スピニアイソマー標的が今後の開発目標となっている。

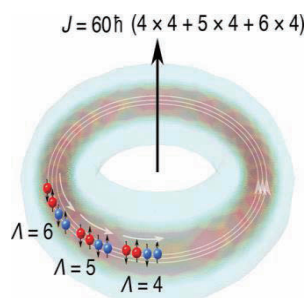


図 3-14 ^{40}Ca の高エネルギー高スピン状態に現れると予想されているドーナツ型。

3.3.2 核反応—創意あふれる“物の見方”でフェムトの世界を探る—

3.3.2.1 原子核は如何にして観測できるか

物を“見る”とはどういうことだろうか。目を窓の外に向けると、風に揺れる緑の木の葉が見える。ここで起きていることは、①太陽光が葉に降り注ぎ、②緑色の光が反射され、③人間の目で検知される、という3つの過程である。我々が物を見る時には、いつでもこの3つの過程を行なっている。ここで必要な要素は、「探針＝プローブ（例では太陽光）」「観測対象（葉っぱ）」「応答（光の反射・散乱・回折などの現象）」「観測装置（人の目）」である。大きな物を見るのは比較的簡単であるが、ミクロなものを見るには工夫が必要である。小さな物を見る時にまず頭に浮かぶのが、虫眼鏡や光学顕微鏡だろう。光学顕微鏡の倍率を無限に上げていけば、原子や原子核、陽子や中性子の姿を捉えることはできるだろうか？ 答えは否、である。物を観測するためには観測対象の大きさより短い波長の波が必要であるが、可視光の波長はおおよそ数百 nm であり、0.1 nm スケー

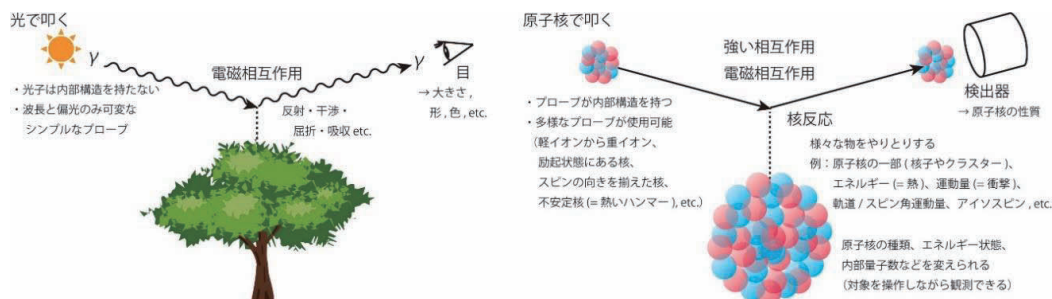


図3-15 「光で物を見る」「核反応で原子核を見る」場合の共通点と相違点。核反応においては、プローブと観測対象の間で様々なものが交換されうる。対象の状態を操りながら観測するなど、通常とは異なる“物の見方”ができる。

ルの原子の物体の姿は原理的に捉えることができない。そこで着目されたのが電子線である。ミクロな世界では、物体には粒子と波の両方の性質が現れる。この波の波長（ド・ブROI波長）は運動量に反比例するため、電子を加速すればその分波長が短くなる。典型的な電子顕微鏡では電子は数10 kV程度の電場で加速され、0.01 nm程度の波長を持つ。これにより原子の姿を捉えることまでは可能となったが、原子核のサイズは原子と比べてもずっと小さい「フェムトスケール（ 10^{-15} 乗メートル）」である。原子を野球場のサイズまで拡大しても、原子核はビー玉程度の大きさに過ぎない。この姿を捉えるためには、より短い波長の粒子が必要になる。

人類が原子核の存在を確認することに成功したのは、実は今からほんの100年と少し前のことである。1909年、ラザフォードは助手のガイガー及び学生のマースデンと共に、自然放射能ラジウムから放出される α 粒子を金の薄膜に当てる実験を行った。この α 粒子は、上記の電子顕微鏡による電子と比べて1/2000の波長（数fm $\approx$ 原子核のサイズ）を持つ。当時は、原子の中には正電荷が均一に分布しており、その中に電子が埋め込まれていると考えられていたため、 α 粒子は原子の中をほぼ直進すると予想された。しかし、いざ実験を行うと一定の割合で粒子が正反対に近い大きな角度で散乱される事象が観測された。当時の衝撃をラザフォードは、「15インチ砲弾をティッシュペーパーに撃ち込んだら、跳ね返ってきて自分に当たったようなもの」と回想している。この実験結果を受けて彼が1911年に提唱したのが、原子の中にはほぼ全ての質量と電荷の集中した「核」が存在する、という有核原子模型である。これこそが原子核の発見であり、原子核物理学の幕開けを告げるものであった。因みにこれに先立つこと数年、日本の物理学者の長岡半太郎も、有核原子模型に近い土星型原子模型を提案している。

原子の内部に存在することが判明した“核”の大きさをより正確に捉えるためには、さらに波長の短い粒子が必要である。1960年代から、加速器による電子ビームを用いた電子弾性散乱の測定が盛んに行われ（例：750 MeV 電子の波長は1.7 fm）、安定な原子核の電荷密度分布が系統的に導出された[29]。一方、1980年代の中頃、軽い中性子過剰核が陽子密度分布と比べて大きく広がった中性子密度分布を持つことを示唆する実験データが日本の研究グループによって得られた（米LBL研究所における実験）。一つは谷畑らによる相互作用断面積（核種が変化する確率であり、核半径の二乗に比例する）の測定[30]、もう一つは小林らによる破砕片運動量分布（不確定

性原理を通じて弱束縛中性子の空間分布に対応)の測定 [31]である。これらの結果から、中性子過剰核はスキンやハローといった広がった中性子分布を持つと考えられるようになった。不安定核の陽子/中性子密度分布の決定は、核の大きさとしての基本的な興味に留まらず、状態方程式を調べる観点からも重要である。不安定核の陽子(または電荷)密度分布を導出するには電子散乱が有効であるが、不安定核は短寿命なので固定標的としては使用できず、その測定は簡単ではない。1つの可能性は独 GSI などでは計画されている電子-不安定核コライダーであるが、技術的・予算的な困難が大きい。そこで理研 RIBF では、自己閉じ込め型不安定核標的 SCRIT を開発し、電子散乱により不安定核の電荷密度分布を測定する計画が進行中である[32,33]。また、不安定核の中性子密度分布の導出には強い相互作用によるプローブが有効であり、陽子弾性散乱による測定計画が進められている。

3.3.2.2 原子核の新しい状態を生成し観測する

3.3.2.1 では核反応で原子核を観測することを光で物を見ることになぞらえて説明したが、原子核で別の原子核を叩く核反応は、単に静的な対象を観測すること以上の能力を有している。原子核は光子と異なり内部構造を持つため、自らの持つ様々な量を相手に移行することで、相手を新しい状態に変えることができる。原子核の間で移行しうるものは、エネルギーや運動量、スピン・アイソ

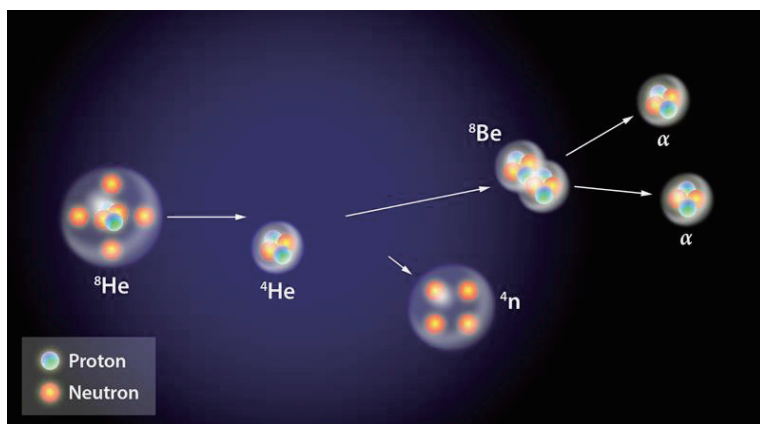


図 3-16 不安定核を用いた新しい核反応の例。不安定核 ^8He (熱いハンマー) が標的 ^4He に“そっと”触れることで、衝撃をほぼ与えずにエネルギーと電荷を移行できる。生成された4つの中性子は、共鳴状態としてのテトラ中性子を形成する[34]。

スピン・パリティといった内部量子数、または自らの一部である核子や核子対、クラスター(核内でまとまって存在・運動する、複数の核子の“塊”。3.3.3.3 節参照)など多種多様である。代表的な核反応の例としては、相手にエネルギーを与えて励起状態を生成する非弾性散乱、粒子をやりとりする組み替え反応、核内から粒子を弾き出すノックアウト反応、電荷を交換する荷電交換反応などがある。例えば非弾性散乱は、ハンマーで物を叩いて震わせた時の反響を聴くことに例えられる。硬い材質なら高い音、柔らかい材質なら低い音が聞こえるだろう。核反応の場合も同様に、原子核で相手を叩き散乱粒子を測定することで、核の励起状態の性質や振動の仕方を解明することができる。不安定核研究においては、例えば中性子スキンとコアの相対振動モードや、核が膨張収縮を繰り返すような振動モードなどの研究が進められている。さらに、スピンやアイ

ソスピンといった色のついたハンマーでうまく原子核を叩いてやることで、ある特定の状態を選択的に励起することもできる。このように、「観測対象を自由自在に操作しながら観測する手法」は、核反応に特有の“物の見方”であり、遊びがい、腕の見せがいのある観測手法と言える（図 3-15 参照）。

日本では特に、新奇な核反応を用いた原子核研究のアイディアが数多く創出され、さらに 2007 年に本格稼働を開始した理研 RIBF の大強度不安定核ビームのハードウェアとしての強みと相俟って、世界的にもユニークな研究が展開されている。核反応研究の新しい展開の一つとして、不安定核を観測対象ではなくプローブとして用いるアイディアが花開こうとしている。不安定核は大きな内部エネルギーや高いアイソスピン（陽子数と中性子数の差に比例する量）、多彩なスピン・パリティを持っており、安定核から励起した状態にあると言える。この不安定核を“励起したプローブ”として用いる核反応は、原子核の新たな状態を生成する手段となりうる。一つの例が、3.3.1 節で紹介された、 ${}^8\text{He}({}^4\text{He}, 4n){}^8\text{Be}$ 反応による 4 中性子共鳴の候補の発見である [9]。4 中性子の共鳴状態を生成する際に最も大きな課題となるのは、衝撃（運動量）を与えずに 4 中性子系を“そっと”作らなくてはならない、という点である。そこで、大きな内部エネルギーを有する不安定核 ${}^8\text{He}$ を「熱いハンマー」として用いることで、 ${}^4\text{He}$ を蹴飛ばさずにエネルギーのみを与え、4 中性子の共鳴状態を観測することに成功した（図 3-16, 3-17 参照）。他にも、不安定核である三重陽子（三重水素の核）や ${}^{12}\text{N}$ を用いた原子核の新たな振動状態の探索 [35, 36] や、重イオン反応の終状態を指定することでスピンやアイソスピン、パリティなどの内部量子数を自在に標的核に移行し、興味のある状態を選択的に励起する試みが始められている [37, 38]。

原子核は多くの相互作用が絡まり合い複雑な性質を持っているが、このように“見方”を工夫してクリアな切り口を探し、その性質を紐解いて行くことが、核反応による研究の醍醐味の一つである。RIBF に代表される第三世代加速器施設からの大強度で質の高い不安定核ビームが手に入りつつある今、これまでにないエキゾチックな核反応による原子核研究の可能性が大きく開けようとしている。また、

現在の RIBF においては核子あたり 100 MeV を超える中高エネルギーの実験が展開されているが、特別な手法で不安定核ビームを減速することで核内での核子の運動エネルギーに近い低エネ

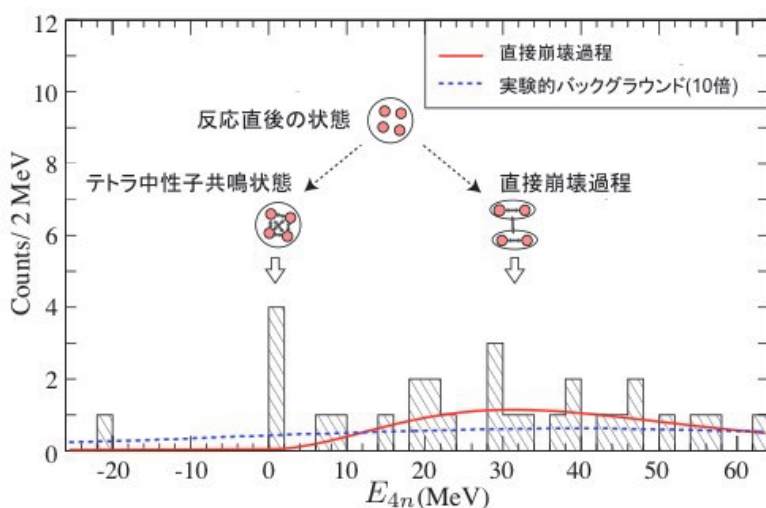


図 3-17 反応事象数を 4 中性子系のエネルギーの関数として表したスペクトル。4 中性子がちょうどバラバラになるエネルギー (0 MeV) より少し高い領域に、テトラ中性子共鳴状態の候補が 4 事象発見された [9]。

ルギーのビームを生成し、核子や核子対、クラスターや角運動量などを移行する核反応研究も計画されている（OEDO プロジェクト [39]）。これにより RIBF では、軽い核から重い核、低いエネルギーから中高エネルギーまでの広範な領域での核反応研究が可能になり、新たなアイディアを生かせるフィールドがさらに広がるものと期待される。

3.3.2.3 核反応理論と核構造理論の融合

核反応がどのようなメカニズムで起こるのか解明することは、量子多体系の動的な振る舞いとしてそれ自体興味深いことであると同時に、核反応の実験データから核構造の情報を引き出すためにも不可欠である。最も基本的な反応模型は、弾性散乱を記述する光学模型である。この模型では、光を曇りガラスの球に当てた際に散乱と吸収が起こるように、核反応においても弾性散乱とそれ以外の反応が起こると見なし、各々をポテンシャルの実部と虚部を用いて表現することで、弾性散乱を極めて精度良く記述することに成功した。それ以来、核反応の種類に応じて、それぞれに適した核反応模型が開発されてきた。近年は特に不安定核の反応の正確な記述の重要性が増しているが、その反応機構にはどのような特色があるだろうか。不安定核の最も大きな特徴は弱束縛性である。通常、安定核の場合、核子は深く束縛されている（核子がばらばらの状態と比べて、数 MeV の負のエネルギーを持ち安定化している）のに対し、弱束縛の不安定核は 1 MeV 以下のほんのわずかなエネルギーを与えることで分解し、正のエネルギーの連続状態へ遷移してしまう。また、弱束縛な不安定核の励起状態や、ドリップライン外の非束縛核は、正エネルギーの連続状態領域に埋もれた共鳴状態として観測される。したがって、不安定核の核反応を考える場合は、良く束縛された状態の間の遷移だけではなく、束縛状態と連続状態、または連続状態間の遷移まで考慮する必要がある。このような要請から、束縛状態から連続状態までを統一的に取り扱う核構造及び核反応模型の開発、さらには反応・構造理論の融合が求められている。

弱束縛核の分解過程を記述するために世界で標準となっている手法は、日本の九州大学グループを中心に開発された「連続状態離散化チャネル結合法(CDCC)」である[40]。近年では、 ${}^6\text{He}$ ($= {}^4\text{He}+n+n$) のような“ボロミオン核”（3つの構成要素が集まって初めて束縛する核。3.3.3.4 節参照）と標的核からなる 4 体系の反応の精度の良い記述まで実現されている[41]。また、北海道大学グループでは、束縛状態・共鳴状態・連続状態を統一的に記述できる「複素座標スケールリング法」が開発され[42, 43]、核反応の観測量とボロミオン核の 2 つの中性子の相関（ダイニュートロン相関）を高い確度で関連付けられるようになった[44]。また、ドリップラインを超えた非束縛核を核子移行反応で生成するような反応に関して、連続状態との結合を考慮した理論的枠組みへの取り組み等も進められている。

上記のように、不安定核の反応機構の理解の必要性を契機として、反応理論と構造理論の融合が原子核理論分野における一つの大きな潮流となっている。良く束縛された“閉じた”原子核の構造や反応を独立に論じる伝統的な思想から、弱束縛核・共鳴状態・連続状態など“開かれた量子多体系”の構造やダイナミクスまでも統一的に理解するという方向性にパラダイムをシフトさせることが、現代の核物理の重要な使命である。

3.3.3 量子多体系としての原子核

自然界の事物のほとんどは、「もの」が寄せ集まってできている。例えば、川の流れは気の遠くなるほどたくさんの水分子が一斉に動くことで生じる。こんなに多くのものが集まったら秩序なんてあったものではないと思うかも知れないが、自然は意外と簡単な規則に従っていたりする。川の例でいえば、水のような流体の速度と圧力は(理想的な条件のもと)ベルヌーイの法則に従う。

このような「もの」の寄せ集めを、物理では「多体系」と呼ぶ。多くの場合、お互いに相互作用する粒子が 3 つ以上あると、基礎方程式の解析的な解は存在しない(多体問題)。例えば、身近な 3 体系であれば、太陽系(太陽、地球、月)の航跡や、ヘリウム原子(電子二つとヘリウム原子核の正電荷)の波動関数を求めるには、力学方程式を数値計算で解く必要がある。これを第一原理計算と呼ぶ。しかし、系の構成要素の数が増えるにしたがって、また、力の形が複雑になるにともなって、第一原理計算は難しくなる。こうした複雑な多体系の中に現れる単純明快な法則性は驚くべきものであり、わたしたちの自然認識を深めてくれる。実際、例えば超伝導や量子ホール効果といった 20 世紀物理学を彩る里程標の多くは、多体系で見つかった現象である。

原子核は 最大 250 個程度の核子(陽子と中性子)が凝縮した多体系である。その凝集は、強い相互作用の一種である核力という極めて複雑な相互作用によって支配されている。終戦直後の東京大学での講義のなかで嵯峨根遼吉⁴が語ったと言われている一節がある。「 α 線や γ 線が線スペクトルをもっていることからして、核にも原子や分子のような構造 があることは期待されるが、原子や分子を結びつけているクーロン力に比べて、核の中の陽子と中性子 を結びつけている核力はずっと複雑で、しかもその精しい性質は未だわかっていないから、 α 線や γ 線 のエネルギースペクトルから得られる核の励起準位のスペクトルがわかっても、それを解釈することは困難であろう」[45]。おそらく当時は、原子核構造はあまりに複雑で混沌としているため、それを理解することは到底不可能だと思われていたのではないだろうか。

しかし 50 年代になると、原子核の構造には「形」「平均場」「クラスター」など驚くほどシンプルな秩序があることが次第にわかってきた。そして、そうした秩序を端的に表現するモデル—例えば、この節に登場する集団運動模型、殻模型、クラスター模型などが考案され、実験により検証されるようになった。混沌としていたと考えられていた原子核にも単純な構造や美しい規則性があり、人類の知恵で十分にその構造を理解することができるとがわかってきたのである。原子核構造研究は、原子核の中にある秩序を見つけだし、また、それを説明するモデルを考えることで発展してきた。

21 世紀の今、計算機の演算速度は劇的に向上し、実験技術も日々進化している。そして何より、RI ビームのおかげで、意のままに中性子数を増減し核構造を調べられるようになった。こうした技術的革新に支えられた 21 世紀の研究は、多体系としての原子核が見せる様々な秩序をめぐって、どのような潮流をもたらし、どこへ向かうとしているのだろうか? 「魔法数」「かたち」「クラスター」そして「核子相関」という 4 つのキーワードで解説したい。

⁴ 1905—1969。東京大学教授、日本原子力研究所理事、副理事長、日本原子力発電取締役、副社長を歴任。日本学術会議の創設に尽力した。

3.3.3.1 新しい「魔法」数

多体系を特徴づける最も基本的な量は、構成要素の「数」である。樹木の葉や花びらの数、貝殻の巻き数など、身近な自然の事物は様々な「数」をもっていることがわかるだろう。自然界の規則的な構造や現象は、時として、こうした「数」が織りなす普遍的な「数列」に従うことがある。例えば、一部の植物の花や実の配列、貝の殻に現れる螺旋の半径比は、フィボナッチ数列 (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21...) に従うことが知られている。フィボナッチ数は黄金比とも深く関連している。人工物の美しさの起源ともいわれる黄金比が、動植物の規則的な構造にも通底していることは驚きである。

量子の世界で私たちが古くより最も親しんできた規則性は、元素の周期律ではないだろうか。その規則性を統べているのは、希ガスの原子番号がなす数列 (2, 10, 18, 36, 54, 86) である。この数列の起源は、原子核と電子のクーロン引力が作る「殻構造」である。ポテンシャルの中にできる量子化された束縛状態 (軌道) は、離散的なエネルギーを持つ。原子は電子多体系だが、電子間のクーロン力は弱い。あたかもお互いに相互作用していない複数の電子が、原子核のクーロン・ポテンシャルの中で、エネルギー的に安定な軌道から順に占有してゆくような描像がなりたつ。このような一体のポテンシャルを多体の粒子が占有するような構造は、軌道が重なってゆく様を多層の貝殻に喩えて「殻構造」と呼ばれる。殻構造の特徴は、次の軌道との間に大きなエネルギーギャップを伴う軌道が占有されたとき、すなわち「殻」が閉じた時 (閉殻) に生じる強い安定性である。これが不活性な希ガスの起源であり、殻を閉じる電子数が上記の数列を生む。

原子核の安定性に、周期律に似た規則性があることが見いだされたのは 1930 年代のことである。同位体の存在比や質量から、中性子 (または陽子) の数 N (Z) が 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126⁵ に相当する核は、高い安定性を持つことが知られていた。しかし、核子間の核力は、電子間のクーロン力に比べてはるかに強く、原子のように単純な中心力ポテンシャルが発生するとは考えにくかった。原子核の安定性を律しているように見えるこの数列の存在は、当時の人々にとって大きな謎であり、Eugene Wigner によって「魔法」数と名付けられたという。魔法数の起源が、やはり殻構造であることを明らかにしたのは Maria Mayer と Hans Jensen である⁶。二人は、中心力ポテンシャルに加えて非中心的なスピン軌道ポテンシャルを導入すれば、魔法数列に対応する一連の閉殻軌道が発生することを発見したのである (図 3-18)。

こうした古典的な魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 は、あらゆる原子核で普遍的に成立すると考えられてきたし、実際安定な原子核ではよく成立した。このパラダイムが、近年の不安定核研究によって、大きく変わってきた。端緒となったのは、70 年代後半から 90 年代にかけて測定された魔法数 $N=20$ をもつ中性子過剰核のデータである [46, 47, 48]。例えば $N=20$ をもつ魔法核 ^{32}Mg の質量や振動・回転スペクトル、 ^{28}O の束縛エネルギーは、安定性を全く示さなかった [49]。つまり、中性子過剰な領域では魔法数 $N=20$ が消失していたのである。この発見は、不安定核

⁵ 陽子は 82 まで

⁶ 両者は「原子核の殻構造に関する発見」の功績から、1963 年にウィグナーと共にノーベル物理学賞を受賞。

において新たな魔法数のシーケンスを模索する大きな潮流を生み出した。2000年代には、魔法数 $N=8$ が ^{12}Be において消失していることが発見された [50,51]。また酸素同位体 ^{24}O の安定性から、 $N=16$ が魔法数となっていることがわかった [52, 53]。2007年に始動した RIBF は 70年代から連綿と続いていた潮流に、大きな転機もたらした。 ^{238}U の核分裂からできる重い中性子過剰核を分光することで、より大きな魔法数を検証できるようになったのだ。 ^{42}Si において古典的魔法数 $N=28$ が失われていることが確認されたのを皮切りに [54]、積年の夢であった ^{78}Ni の半減期測定から古典的魔法数 $N=50$ が消えておらず [55]、また ^{54}Ca の分光からは新しい魔法数 $N=34$ があることが確認された [56]。2015年には「中性子過剰核における魔法数の異常性の発見」の功績により本林透（理研）と櫻井博儀（東京大学）が仁科記念賞を受賞した。

以上のように、中性子過剰核の安定性を律している魔法数は、2, 6, 16, 32, 34, 50 という従来の常識に反した規則性をもつことがこれまでの研究から明らかになった（図 3-18）。今後の方向性は大きく二つある。ひとつは、この新しい魔法数のシーケンスを完成させること。そのカギとなるのは、 $N=82$ から 90 のスズ同位体と $N=128$ をもつ鉛近傍の核の分光である。 $N=82, 90$ は、対応する殻をなす軌道が $N=20, 28$ と似た形をしている。スズ同位体が $N=20, 28$ のカルシウム同位体 $^{40,48}\text{Ca}$ のような安定した構造をもつのか、それとも中性子過剰な ^{32}Mg ($N=20$) や ^{42}Si ($N=28$) のように安定性を失っているかは、新しい魔法数の規則性と普遍性を占う重要な情報になると考えられる。スズは ^{238}U の核分裂でよく生成される核であり、その分光は RIBF

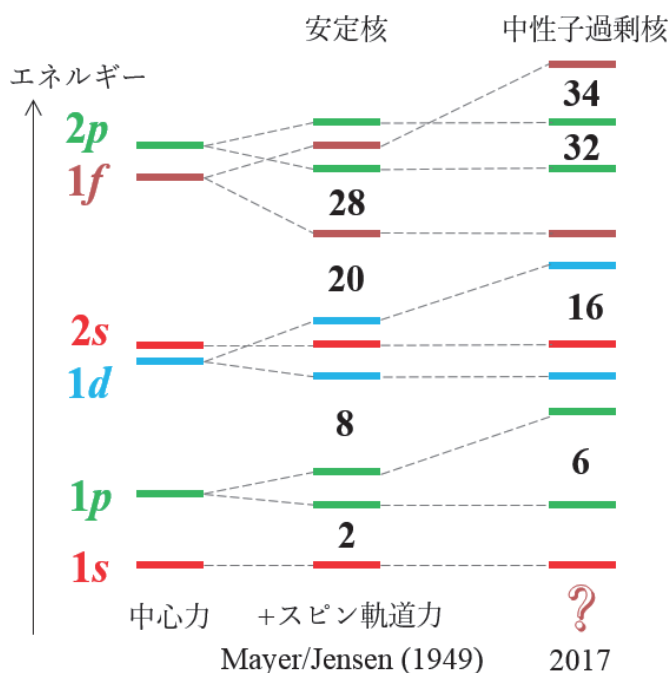


図 3-18 原子核の殻軌道と魔法数。軌道間のエネルギー差が大きいと、魔法数が生じる。左) 40年代、Mayer/Jensen はスピン軌道力を導入することで、安定核の魔法数を説明した。右) 不安定核には新しい魔法数があることがわかってきたが [57]、その起源はまだ明らかになっていない。

の重要な課題の一つである。一方、後者の鉛近傍領域は、従来の不安定核生成手法では、生成が難しく、ほとんどデータがない。この領域の核の生成に特化した KISS を高度化することで、研究が大きく進展するだろう。

もう一つの方向性は、魔法数の新しいシーケンスが、何によって支配されているかを理解することだ。Mayer-Jensen が半世紀も前に明らかにしたように、古典的な魔法数のシーケンスは、スピン軌道ポテンシャルが支配していた。現在の理論研究では、こうした古典的描像では隠れていた要素—陽子と中性子の間の相互作用、スピン軌道項以外の核力成分（例えばテンソル成分）、三体以上の系で発生する三体力、核密度の変化、などが、不安定核の殻構造を大きく変化させると考えられている。諸々の微視的起源のパワーバランスを分析することで、何が殻構造の進化を支配しているのかが明らかにしたい。こうした微視的な機構を調べるには、中性子移行反応⁷のような核反応測定が重要となる。90 年代より続けられてきた魔法数の研究は、質量、束縛エネルギー、変形の大きさ、半減期などをベースに発展してきた。これらの物理量は、強度の低い RI ビームでも測定できたからである。中性子移行反応によって得られる核内中性子の情報は、殻構造に対してより高い感度をもつが、測定には高強度の RI ビームや分解能のよい半導体・ガス検出器が必要だった。過去 10 年の間に、こうした技術要素の開発が飛躍的に進み、先駆的な実験が行われた。例えば、 ^{46}Ar の中性子移行反応の研究から、安定核 ^{48}Ca から中性子過剰核 ^{42}Si にかけて魔法数 $N = 28$ が消えてゆく現象は、陽子と中性子の間に働く力のスピン軌道成分とテンソル成分が関与していることが示唆された [58]。また ^{35}Si の殻構造を中性子移行反応で分析することにより、スピン軌道成分が通常より低くなっていることが示された [59]。中性子過剰核でスピン軌道成分が弱くなることは 90 年代から議論されてきたが、長年の仮説の是非をようやく実験的に問えるようになってきたのである。今後、 $N=28$ 以外の領域においても、こうした核反応研究が進展するものと期待される。

3.3.3.2 かたち

ものの「かたち」を見分けることは、私たちが世界を認識するうえで最も基本的な行為ではないだろうか。もし「かたち」を知覚できなかったとしたら、私たちの自然認識は全く違うものになっていたのではないか。従って物理学において「かたち」という視点はたいへん重要である。

原子核は「かたち」をもつことがわかっている自然界最小の物質である。自然界の最小粒子は素粒子（クォークやレプトン）だが、大きさは持たないと考えられている。原子核は、電子散乱や原子 X 線測定から空間的な広がりを持っていることがわかっている。そのスケールは、フェムトメートル⁸である。原子核は、極微の世界に「かたち」という視点をもたらしめている。

原子核はどのような「かたち」をしているのだろうか？ ナイブには対称性のよい球形をしている気がする。しかし実は、原子核は基本的に変形している。丸いのはわずかに魔法核（ $^4\text{He}/^{16}\text{O}/^{40,48}\text{Ca}/^{208}\text{Pb}$ など）くらいである。次のように考えると、これはとても不思議なこと

⁷ 陽子標的で RI ビームから中性子をピックアップする。

⁸ $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$

である。原子核のバルクな特性は水滴に似ている⁹。水滴は球形を好む。表面張力が表面積を小さくしようとするからだ。

原子核が変形するのは、実は極微の世界では、古典的な描像を超えた量子的構造が現れるからである。原子核内の核子は、平均的なポテンシャル（平均場）の中を動いている（殻構造。3.3.3.1節参照）。この描像は概ね妥当なのだが、完璧ではない。平均場に取り込みきれなかった力は、フェルミ面近傍の核子を異なる殻軌道に励起する。励起前後の軌道角運動量の差がゼロでないときには、運動する核子の空間的な分布は変化する。原子核の表面は、この量子構造のわずかな変化に対してたいへん敏感なのである。というのも、核子の励起エネルギーと表面エネルギーが同程度であるために、核子軌道の空間的な変化に呼吸をあわせるかのように、表面のかたちが変わってゆく。原子核のかたちは、原子核に現れる量子的な構造を映す鏡のようなものである。

最近、スイスの ISOLDE において、アルファ崩壊核 ^{220}Rn と ^{224}Ra が洋ナシのようなかたちをもつことが報告されて大きな反響を呼んだ[60]。今までに知られている変形核のほとんどはラグビー・ボールかパンケーキのような形をしている。共に四重極変形と呼ばれる変形であり、半径の異方性が二次の球面調和関数 $Y_2^m(\theta, \phi)$ に従う。一方、洋ナシ型は、三次の関数 $Y_3^m(\theta, \phi)$ で

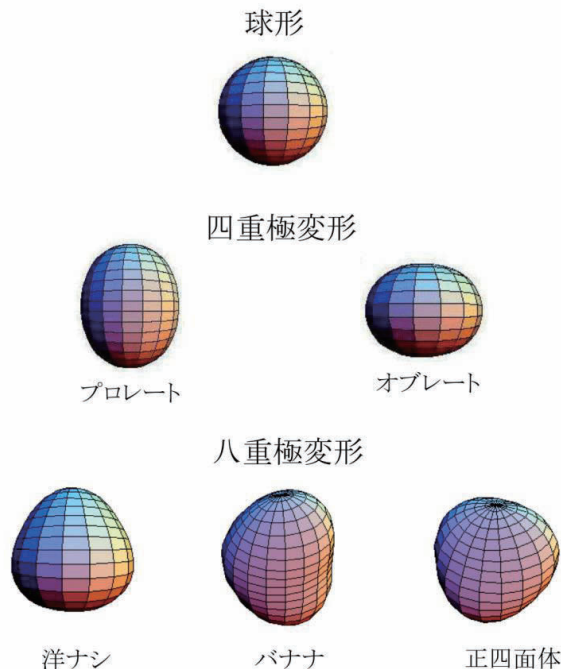


図 3-19 かたちのヒエラルキー。上に向かうほど対称性がよいのだが、原子核のほとんどはプロレート型（四重極）の変形をしている。さらに対称性の崩れた洋ナシ、バナナあるいは正四面体体型のような希少な変形状態も存在することが最近わかってきた。

⁹ 水滴の密度も飽和しているからである。密度の飽和性に関しては「核子相関」の節(3.3.3.4)を参照。

表される異方性をもち、八重極変形と呼ばれる。この変形状態は、原子核では希少な状態である。原子核が四重極変形を好むのは、角運動量の差 (ΔL) が 2 の殻軌道はエネルギー的に近い領域にあり、励起が起こり易いからである。一方、八重極変形が起こるには、フェルミ面の核子の角運動量が 3 だけ変化する必要がある。安定核では $\Delta L = 3$ をみたく殻軌道はエネルギー的に離れており、変形が抑制されてしまう。しかし、アルファ崩壊が起こる重い質量領域では、 $\Delta L = 3$ の励起も比較的楽になり、こうした希少な変形状態をつくることが可能になると考えられている。

それでは、八重極変形は重い核に限定された現象なのだろうか？最近では、この変形はもう少し普遍的に存在するのではないかと考えられている。例えば、比較的軽い核でも、不安定核になると（つまり中性子数が増減すると）、八重極変形が生じると予想されている。殻構造が変化して、 $\Delta L = 3$ をみたく励起が起こり易い質量数領域が生まれるからである。RIBF では先駆的な研究が行われている。中性子過剰な Zr 同位体 [61] や、Ba 同位体 [62] において、八重極変形の候補となる状態が見つかった。また、陽子過剰の ^{80}Zr 周辺においても、正四面体型一洋ナシとは異なるタイプの八重極変形状態が存在すると予想されている [63]。しかし八重極変形はやはり希少な状態で、とにかくデータが少ない。今後、より詳細な分光実験を行い、八重極変形の存在を確証し、その特性（例えば変形度や、回転エネルギー）を明らかにすることが重要だろう。

新しい原子核のかたちとして、もう一つ話題となっているのは「バブル」状態、つまり核子密度が原子核の中心で低くなっている状態である。普通の原子核が中心から周縁まで密度の一定な「液滴」であるのに対し、バブル状態は中空の「泡」に似ている。こうした状態は、核中心に密度を集中させる s 軌道の占有率が下がると発生しやすいと考えられている。70 年代から超重元素のような重い核に特有な現象として予言されていたが、発見には至っていなかった。ところが、2000 年代に軽い中性子過剰な ^{34}Si でもバブル構造が予言されたことをきっかけに [64]、 ^{34}Si の陽子の s 軌道占有率が測定され [65]、第一原理計算が行われた [66]。いずれも、 ^{34}Si におけるバブル構造の存在を支持する結果だった。今後、例えば電子散乱などによって、より直接的に核が「中空」となっている様子を見ることが期待されている。

以上のような八重極変形やバブル構造は、原子核に固有な量子構造（つまり殻構造）に由来する現象である。一方で、量子的なゆらぎやトンネル効果のような、より一般的な量子効果が、原子核のかたちをさらに多彩なものにする。例えば、原子核では、量子揺らぎによって異なる変形がまじりあってしまい、かたちを一意に決めることができないような状態—ソフト変形—が現れる。また、異なる変形状態が非常に近いエネルギー領域に共存するような現象が起こる。つまり、ごくわずかなエネルギーを加えただけで、形が急に変わってしまうわけであり、古典的な物質ではほとんど例がない。極端な例をあげれば、 ^{186}Pb では、球形、ラグビー・ボール型とパンケーキ型の三つの異なるかたちの状態がわずか 1 MeV のエネルギーの領域に共存している [67]。最近の大きな発見は、この変形共存現象が、魔法数をもつ中性子過剰核でかなり普遍的に起こっていることがわかったことである。例えば、魔法数 $N = 20, 28, 50$ に近い中性子過剰核 $^{34}\text{Si}/^{44}\text{S}/^{80}\text{Ge}$ では、球形状態と変形状態が比較的小さなエネルギー差で共存していることが発見された [68, 69, 70]。中性子過剰核で新しい魔法数が発生する現象 (3.3.3.1 節参照) と、異なる変形状態が共存する現象が、どのように関係しているのかはたいへん興味深い問題である。今後、共存してい

る変形の種類や回転エネルギーなどを調べることで、この研究領域が進展することが期待されている。

3.3.3.3 クラスター

鳥や魚が群れをなして飛び、泳ぐ姿は、なじみのある光景だろう。街を行き交う人々や車は、時として無秩序な流れを寄せ合い密集して規則的なパターンを作ることがある。このような運動を共にする「群れ」は、物理の言葉ではクラスターと呼ばれている。たとえば、星はいくつも集まって星団(cluster star)を作り、銀河は銀河団(cluster of galaxies)をなす。量子の世界でも、分子や原子が集まって分子クラスターや金属クラスターをつくることがある。粒子や固体がクラスター化することは、自然界に普遍的にみられる規則的な現象なのである。

原子核の中にも、こうした普遍的な構造が宿っているのだろうか？陽子と中性子がそれぞれ二つ集まってアルファ粒子（つまり ${}^4\text{He}$ ）様のクラスターをつくることは、核構造研究の創成期から想像されていた。アルファ粒子が極めて安定だからである。1930年代にはアルファ・クラスターを基礎粒子とした模型によって ${}^{12}\text{C}$ や ${}^{16}\text{O}$ の構造を説明しようとする試みもあったほどである。実際には、「新しい魔法数」節(3.3.3.1)で解説したように、原子核は殻構造をもち、核内の核子は周りから独立して比較的自由に動いている。従って、クラスター構造は、非常に稀にしか現れない。

原子核のクラスターを予言する最も基本的なルールとして知られているのが「池田ルール」で

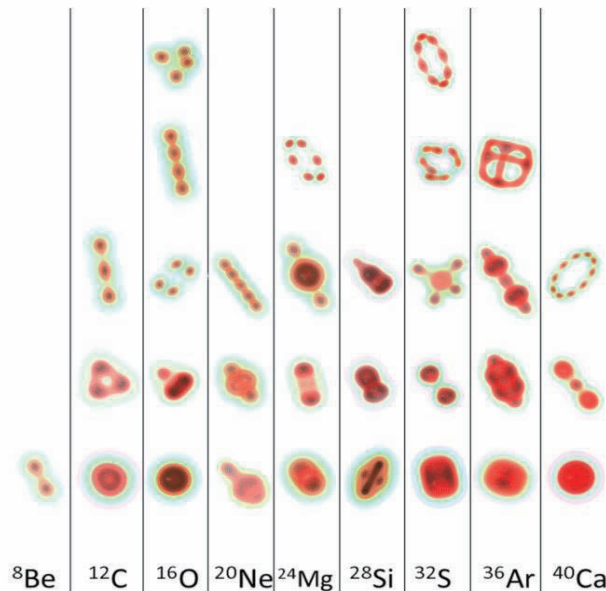


図 3-20 クラスター状態の幾何学的構造。最新の相対論的平均場計算[84]によって予言された構造であるが、そのほとんどが未発見である。

ある [71]。このルールのカギはエネルギーだ。原子核の基底状態が殻構造的だとしても、核のエネルギーがクラスターの分離閾値に近くなると、クラスター状態が生じえる、と予言する。 ^8Be や ^{12}C など、 $N=Z$ を満たす軽い安定核は「池田ルール」を満たしていることが知られている。その中でも、最も研究されてきたのは ^{12}C のホイル状態である。この状態は、 ^{12}C が三つのアルファ粒子に崩壊する閾値 7.7 MeV の近傍にある。もともと、宇宙の炭素合成を説明するために、フレッド・ホイルが予言した状態であり、1950 年代に予言通り発見された。この状態がアルファ・クラスターをもたないと、星の中で 3 つのアルファ粒子が融合し炭素となる確率が激減し、宇宙に炭素が存在しなくなってしまう。このように、生命体の運命を握るほど重要なホイル状態のクラスター構造に関しては、不明な部分は少なくなかった（例えば、クラスターの空間分布など）。私たちの理解を深化させる新発見が相次いだのがこの 10 年である。まず、この状態のアルファ・クラスターは、ガス分子のように、お互いを引き合う力が弱く、広い領域に分布していること、つまり密度が希薄な状態であることが計算によって示された。このようなガスの状態はボーズアインシュタイン凝縮(BEC)に近い量子構造（アルファ・クラスターが s 軌道に縮退している）を持つのではないかと指摘されている。また従来の計算では核物質の効果を近似してとりこんだ有効核力が用いられていたが、真空中の核力を用いた第一原理計算でもクラスター構造が現れることが確認された [72]。実験研究では、ホイル状態が回転してできたと思われる状態が発見された [73]。その回転エネルギーは、ガスのな広がりをもったクラスター分布の場合の予想と合っている。また、近傍の ^{11}B でも、ホイル状態に似たガス状の状態（二つのアルファ・クラスターと ^3H ）が見つかった [74]。

「池田ルール」は、 $N=Z$ を満たす軽い安定核において、クラスター状態の現れるエネルギーの規則をよく表している。それでは、このルールは、中性子過剰な核、つまり、 $N>Z$ となる核でも成立するのだろうか？「池田ルール」の普遍性を問う上で、最も重要と考えられているのは、Be 同位体の構造である。 $N=Z$ の ^8Be の基底状態は二つのアルファ粒子の分離閾値のやや上にあり、きれいなアルファ・クラスターをもつことが実験データから示されており、第一原理計算でも確められている [75]。つまり ^8Be は「池田ルール」を満たしている。ところが、 ^8Be に二つ中性子を加えた ^{10}Be では、これまでの常識では考えられないほど閾値に対し低いエネルギーでクラスター状態が現れることが予言されているのだ [76]。この池田ルールの「破れ」をもたらすのは、中性子だと考えられている。二つのアルファ・クラスターが中性子を共有することで、両者の結合が強くなり安定化するからである。水素分子内の電子が分子軌道を作る様子に似ているので、「中性子分子軌道」という名前がついている。予言通り、 ^{10}Be ではシグマ型の分子軌道を持つと思われる状態が確認された [77, 78]。

中性子分子軌道には、 ^{10}Be の例のように、いくつかのクラスターを束ね、安定化する力がある。この力を使って、逆にクラスターの空間的な配位、つまりクラスターの並び方を操る試みが、最近注目を集めている。そのきっかけとなったのは ^{14}C である。三つのアルファ・クラスターが一列に並んだ「一次元鎖状」構造をもつ有力な候補となる状態が発見された [79, 80]。アルファ鎖状構造は、原子核では極めて珍しい一次元系と捉えることができると指摘されている [81]。もと

もと、アルファ・クラスターの鎖状構造は、1950 年代に森永晴彦¹⁰によって、陽子数と中性子数が等しい安定核 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg の励起スペクトルを説明するために予言された [82]。しかし、半世紀以上にもわたる探索の末、いまだ存在が確証されていない。実際、もっとも単純な 3 つのアルファ粒子からなる鎖状構造状態でさえ、 ^{12}C では見つかっていない。このような希少な状態が、なぜ ^{14}C で簡単に見つかるのだろうか？ その答えのひとつが、中性子分子軌道である。 ^{14}C では、中性子分子軌道が、三つのクラスターの鎖を安定化する。その結果、鎖がその形を保ったまま、きれいに回転する。そうしてできる回転スペクトルは、実験でたいへん発見しやすいのである。 ^{14}C でみつかった回転スペクトルは、理論計算の予言値とよく一致している。

このように、過去 10 年の間に、従来の常識を変える萌芽的な研究が相次いで行われてきた。原子核の中性子数を変化させることで、クラスターの発生する条件を調べたり、クラスターの幾何学的配位を操ったりできるようになりつつあるからだ。クラスター研究は長いが、解明されるべき謎は多い。池田ルールの起源 [83]？ 池田ルールは中性子過剰核で「どのくらい」破れているのだろうか（自然界では規則性や対称性は、大きく破れる場合もあれば、小さく破れる場合もある）？ パイ型の中性子分子軌道はあるのだろうか？ ^{14}C の鎖状構造は、さらに中性子過剰な炭素同位体でも現れるのだろうか？ 酸素やネオンなど、重い原子核では、円環、立方体、などさらに複雑な幾何構造が現れると予言されている（図 3-20）。本当にあるのだろうか？ アルファ崩壊する核は、崩壊前からアルファ粒子をクラスターとして内包しているのだろうか？ こうした謎に挑戦するために、萌芽的研究がさらに深化してゆくことが期待されている。

3.3.3.4 核密度と核子相関

電子系の超伝導・超流動状態は、電子がクーパー対を形成することによって現れる。クーパー対を組むには電子間に引力があるが、電子のクーロン相互作用はそもそも斥力である。では、対形成に必要な引力はどこからくるかという点、超伝導体となる固体中に発生したフォノン、つまり量子化された格子振動である。この例に象徴されるように、多体系の中の二粒子は、真空中において既に存在する力だけではなく、まわりの物質に媒介される力によっても相互作用する。こうした物質内で発生する力は、時として超伝導状態のように系全体の性質をも支配する。

この節の核子相関とは、非真空中において二核子が感じる力のことを指す。真空中で核子間に作用する力は核力と呼ばれる。そのポテンシャルは複雑であるが、核子-核子弾性散乱の実験データから高精度でわかっている。最近では QCD の第一原理計算から直接導出することも可能になってきた [85]¹¹。一方で、周囲を核子群で囲まれた非真空中で、核子対がどのように相互作用し、系全体にどのような影響を及ぼすかは、わかっていない部分が多い。

最近の研究から、核子相関の強さや性質は、核子密度と密接に関わっていることが明らかにな

¹⁰ 「インビームスペクトロスコープの創出と原子核構造の研究」の功績により 1971 年度仁科記念賞を受賞した。

¹¹ 「格子量子色力学に基づく核力の導出」の功績により、初田哲男（理研）、青木慎也（筑波大学(受賞当時)）、石井理修（同(受賞当時)）が 2012 年度仁科記念賞を受賞した。

ってきた。まず原子核は、核密度の飽和性、つまり、平均核子密度が核の大きさによらず一定 ($\sim 6 \text{ fm}^3$ に一個) という特徴的な性質をもつ。これは核子当たりの結合エネルギーが一定 ($\sim 8 \text{ MeV}$) であることを意味する。重力や電磁気力など、身近な例を思い浮かべてほしい。一般に A 個の同種粒子からなる多体系に、さらに粒子を一つ加えると、系のエネルギーが A に比例して増えることが多い。これは、新しく加わった粒子が、系を構成している A 個の粒子と相互作用するからである。一方で、原子核の場合、エネルギーが「飽和」してしまい、系の大きさに関わらず、一定のエネルギーしか増えないのである。

核密度の飽和性はどのように生じるのだろうか？最近注目されているのが、核子相関のテンソル成分である。この成分の特徴は、2 核子のスピンの向きと空間的な配置によって強度が変わるところであり、二つの棒磁石の間に働く力に似ている。パイオン交換が担う主要な核力成分の一つはテンソル型をしており、核の結合に大きな影響をもつ。例えば二核子系では、スピン 0 の同種粒子同士 (nn, pp) は束縛しないが、スピン 1 の pn 対は束縛する。二つのスピンの同方向に整列している時、テンソル成分が強い引力をつくるからである。原子核の結合エネルギーが飽和するには、 pn 相関におけるテンソル型成分が飽和密度において低くなる (つまり結合エネルギーが下がる) 必要があると考えられる。テンソル成分が核密度によってどのように変化するかを明らかにするために、核内の核子を「摘出する」実験が行われている。具体的には、100 MeV 以上の高エネルギー領域で、核内陽子・中性子を電子や陽子ビームでたたき出すノックアウト反応が米国の JLab[86] と BNL[87] において推進されている。また陽子ビームによって核内中性子を抜き去るピックアップ反応の測定が大阪大学 RCNP、独国 GSI [88,89,90] において行われている。例えば、最近の ^{16}O のピックアップ反応からは、高運動量のテンソル成分が基底状態のエネルギーに寄与していることが明らかになった。結合エネルギーの弱い不安定核では、テンソル相関は安定核と比べて異なる強さを示すと考えられている。RIBF や GSI では、核子あたり 200~1000 MeV の不安定核ビームを用いた (p,d) 、 (p,pN) 、 (p,dN) 反応、及び SCRIT を用いた $(e,e'pN)$ 反応等によって、研究が展開されると期待されている。

以上のように、飽和性の起源には pn 相関の密度依存性が関与している。では、逆に、核密度が飽和密度からずれた場合、核子相関はどのように変化するのだろうか？こうした観点で最近注目されているのが、低い中性子物質密度で現れると予想されるダイニュートロン相関(二中性子間の強い相関)である。原子核の表面では、同じ全角運動量をもつ二つの中性子あるいは陽子は、角運動量 0 を組んで (ナイーブには互いに逆方向に運動して) 安定化する傾向にある。この現象は「対相関」と呼ばれ、原子核の最も基本的な性質である。対相関は、電子系での BCS 状態に近い構造をもっていて、二核子間の空間的距離は原子核の大きさ程度に離れている。ところが、核密度を下げてゆくと、二つの核子は次第に接近し、2 fm 程度の大きさをもつクラスターになると予想されている。核密度が希薄になるにつれて、核子相関が真空中の核力 (束縛状態は作らないが強い引力である) に漸近してゆくからである。二核子対が一つのボソンのようにふるまうこの状態は、むしろ BEC に近い構造であり、新しい核物質相の起源になりうるのではないかと考えられている。

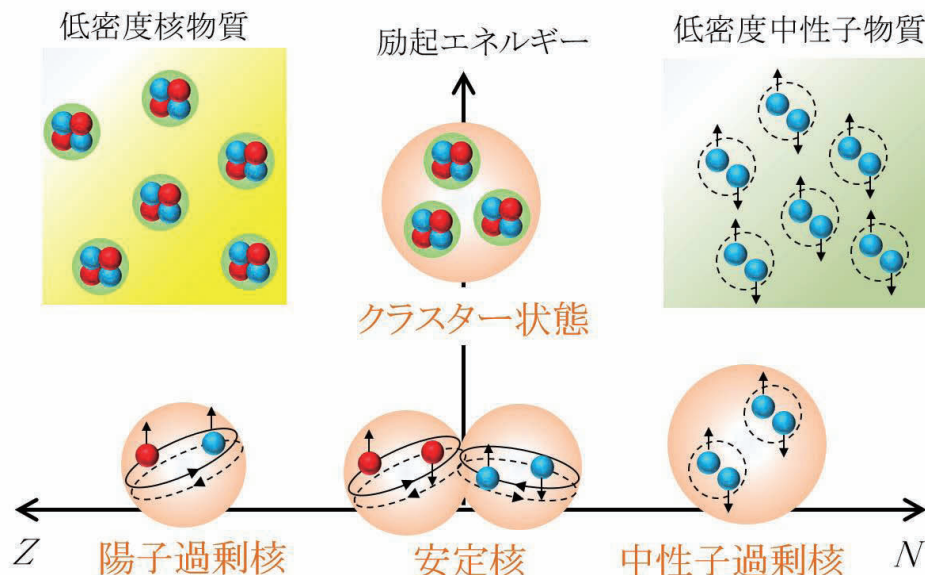


図 3-21 安定核の対相関から、中性子過剰核のダイニュートロン相関へ。原子核の飽和密度より低い領域で、核子同士がどのように相互作用するかはまだわかっていない。

ダイニュートロン相関を調べるためによく使用されるのは、束縛エネルギーの弱い中性子過剰核、特に「ボロミアン核」と呼ばれる特殊な核である。ボロミアン核は3つの部分系（ダイニュートロン相関の場合はコア核+ $n+n$ ）が束縛した核である。3体が全てそろって束縛するが、2体の部分系（コア核+ n 、 $n+n$ ）だけでは束縛しない。こうした核では、表面付近に密度の低い領域が形成され、二中性子が局在すると予想されている。最もよく研究されているボロミアン核は、 ${}^6\text{He}$ と ${}^{11}\text{Li}$ である。例えば、 ${}^{11}\text{Li}$ は外界からのわずかなクーロン力によって簡単に ${}^9\text{Li}$ と 2 中性子に分解することが明らかになった[91]。これはダイニュートロン相関の有力な証拠だと考えられている。

${}^6\text{He}$ では(p, pn)反応を用いた研究が提案されている [92]。2 中性子の相関を調べる上で悩ましいのは、終状態における相互作用である。つまり、核が分解したあとに、二中性子とコアが相互作用することで、角度やエネルギーなどに残っていた核内相関の痕跡が消えてしまう可能性がある。(p, pn)反応では、終状態の二中性子間の相対運動量が大いいために、終状態相互作用の影響を制限できる。現在実験データが待たれている。

最近では、 ${}^{11}\text{Li}$ や ${}^6\text{He}$ より一層束縛の弱い ${}^{16}\text{Be}$ や ${}^{13}\text{Li}$ での研究も進んでいる[93, 94]。これらの核は、通常の β 崩壊ではなく、中性子を二つ放出して崩壊する。最近脚光をあびているのは ${}^{26}\text{O}$ である。 ${}^{26}\text{O}$ は二中性子を放出して ${}^{24}\text{O}$ に崩壊する。新しい魔法数 $N=16$ をもつ ${}^{24}\text{O}$ は高い安定性を持つため、理論計算では比較的シンプルに崩壊過程を扱う。これまでの研究から、空間的に局在した二中性子は、崩壊時に互いにほぼ逆方向に放出されることが予言されている。放出 2 中性子の角度相関を測定した研究が 1 例あるが、分解能が不十分であり[95]、今後の測定技

術の向上が期待されている。

3.3.4 宇宙核物理学

元素は宇宙のいつ、どこで、どのように作られたのか？

—今世紀の物理学における大きな未解決問題 11 の一つに挑む—

人類のどの民族にも、世界や社会の成り立ちを説明する神話や歴史が存在する。このことから、森羅万象の起源を理解したいという欲求は、人類の持つ最も根源的な知的欲求であると思われる。現代文明における科学の究極的な役割の一つは、物質がどのように創造されたかを解き明かすことで、現代人の持つ根源的な知的欲求にこたえることである。

我々の身の周りの物質は、元素で構成される。したがって、元素の起源を明らかにすることは、物質の起源を明らかにすることであり、今世紀の物理学における最も大きな未解決課題の一つとして認識されている[96, 97]。元素の質量や原子番号は、もっぱら原子核の質量数、陽子数による。このため、原子核が「いつ」、「どこで」、「どのように」、作られたかを知ることが、元素の起源解明のための鍵となる。我々の身の回りにある原子核は地球上で作られたわけではなく、宇宙が始まってから地球誕生までのどこかの時点で作られていたものを、引き継いだものである。したがって、「いつ」、「どこで」の疑問に答えるためには、宇宙全体の進化や天体現象に対する理解が必要である。一方で「どのように」という疑問に答えるには、原子核特有の性質や現象を理解する必要がある。この宇宙、天体、原子核にわたる様々な知識を集約し、我々の身の回りにある物質の歴史を紐解く学問が、本節で述べる宇宙核物理学である。

3.3.4.1 宇宙核物理学の始まり～神話の誕生～



図 3-22 ジョージ・ガモフ

20 世紀は、上記の疑問に対する答えを、仮説として提唱する時代であった。科学空想物語「不思議の国のトムキンス」(参考文献[98])をはじめとする多くの一般向けの著作をもつジョージ・ガモフ(図 3-22)は、原子核物理学、宇宙物理学の創成期に活躍した物理学者である。彼は、ビッグバン直後、宇宙の拡大が開始して 3 分後から 20 分後までのおよそ 17 分間続いた高温・高密度の状況下で、陽子同士の衝突から始まり原子番号 3 のリチウムまでの軽い原子核までができたという仮説を提唱した(ビッグバン元素合成)。この仮説では、すべての元素合成は、陽子と中性子の

結合状態である重陽子を経由する。この結合は非常に緩く、それが辛うじて安定的になるには、現在核構造研究の観点から盛んに研究されている核力の中のテンソル力成分の役割が重要である。裏を返せば、テンソル力が現実よりも少し弱ければ、このビッグバン元素合成の仮説は成立しない。この 1 例からも如何に原子核構造や核力の性質が、元素の起源の理解にとって重要かつ絶妙な役割を果たしているかがわかる。このビッグバン元素合成仮説では、当然ながら元素合成過程は一度しか起こらない。しかし、このことは水素やヘリウムの軽い元素の存在量が時代と

もに変化しているという天体観測上の知見と矛盾していた。

これに対して、ウィリアム・ファウラーを中心とした物理学者たちは、1957 年の論文（著者の姓の頭文字をとって B²FH 論文[99]と呼ばれる）で、ビッグバン元素合成を起点として、ウランウムなどの重元素に至るまでの元素の起源を説明するシナリオを提示した。その後、多少の修正を経て、おおむね図 3-24 にまとめられた過程が重要だと考えられている。このシナリオでは、ビッグバンの後、宇宙が冷え、軽い元素で構成されたガスが凝縮してできた恒星の燃焼により新たな元素合成過程が起こったと考えられている。この元素合成過程は、今現在も起こっており、実際に我々が見ている恒星からの光は、元素合成の過程である水素燃焼からシリコン燃焼における燃焼過程、CNO サイクルなどのエネルギー生成機構から発せられていると考えられている。これらの燃焼過程



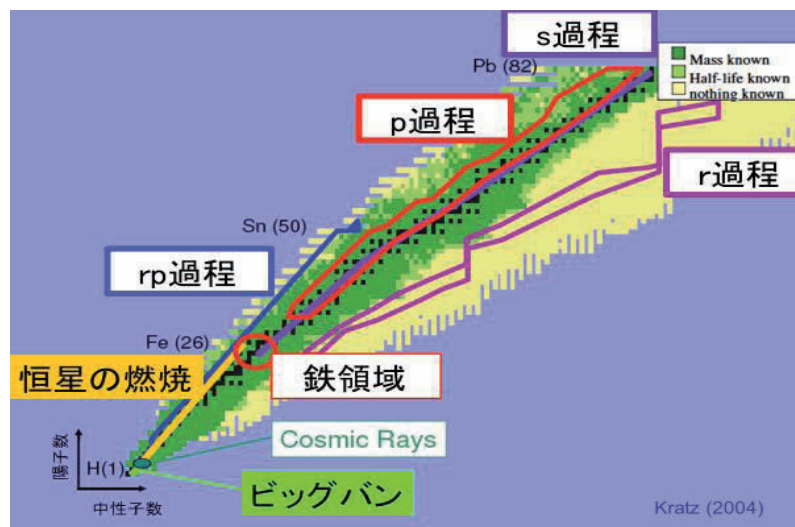
図 3-23 ウィリアム・ファウラー

では原子番号 2 の原子核であるヘリウム(⁴He)が重要な役割を果たしている。例えば、原子番号 6 の炭素(¹²C)を十分な生成率で作るためには、ヘリウム原子核が 3 個同時に融合する必要がある¹²。この融合が可能であるためには、¹²C 原子核が、ホイル状態と呼ばれる 3 個の α 粒子(⁴He 核)からなる共鳴状態を持つ必要があり、その共鳴状態の記述には原子核の多核子相関の取り扱いが必要不可欠である。また、炭素より重い核をヘリウム原子核との核融合で生成するには、 α 崩壊におけるポテンシャル障壁であるクーロン障壁を乗り越える必要がある。この過程はエネルギー生成が可能な限り、つまり、核融合反応が化学反応で言うところの発熱反応である限り繰り返され、核融合反応が吸熱的になる鉄領域で止まる¹³。これらの過程は熱的平衡状態を保ちながら、ゆっくり起こり、恒星の中では徐々により重い原子核が蓄積していく。

ただし、核融合できる元素は鉄領域までの比較的軽い元素である。鉄より重い元素は、恒星内での核融合のような平衡状態における過程ではなく、原子核が、その束縛エネルギーの不足を、天体爆発をはじめとする何らかの機構で解放されるエネルギーで補いつつ、陽子、もしくは、中性子を連続的に捕獲することで生成されたと考えられている。特に自然界に存在する重元素のうち約半数は、中性子捕獲反応がベータ崩壊と競合しながらも速く進む r (rapid) 過程と呼ばれる元素合成過程で作られたと考えられている(図 3-24 参照)。r 過程が理論的にファウラーらにより予言されて既に 60 年が経過しているが、未だにその過程が起こっている天体は解明されていない。しかし、最近、中性子連星合体後に観測された可視光の近赤外線光の観測により、r 過程元素合成の直接測定が示唆され [100]、核物理の研究が盛り上がっている。

¹² ⁴He 原子核 2 個からなる系は束縛状態を持たないため。

¹³ 鉄領域で、核融合が発熱的な現象から吸熱的な現象に代わる理由は、この領域で原子核の束縛エネルギーが最も深くなるためである。



残る半数は漸近巨星枝（AGB）¹⁴星と呼ばれる恒星の進化段階で、比較的ゆっくりとした中性子捕獲反応（slow 過程）で作られたと考えられている。その他、元素によっては、陽子を捕獲する rp 過程、強いガンマ線によって原子核を分解する p 過程などが、その起源の説明に必要だと考えられている。

図 3-24 様々な元素合成過程。黒点は安定核。その他の色は不安定核を示す。r 過程でウランに至る重イオンが合成されたと考えられている。

3.3.4.2 21 世紀の宇宙核物理学～神話から歴史へ

このように 20 世紀の中ごろにおいて、人類はすでに元素の起源を説明する最も有力な仮説を手に入れていた。しかしながら、この仮説が現実起こったものかどうかを検証する試みは、ごく最近になってようやく本格的なものとなってきたところである。この意味で、21 世紀の宇宙核物理学の目的は、20 世紀に生まれた元素の起源を説明する仮説を、様々な原子核実験データや、天体現象の観測を通して、より具体的な事象でつづられた歴史として完成させることにある。

このような世紀をまたいだ宇宙核物理学のパラダイムシフトの中で、日本の物理学者が果たしてきた役割は極めて大きい。このことは、本章全体で述べられているように、不安定原子核研究一般を日本のコミュニティがリードしてきたことと無縁ではない。図 3-24 の核図表に示したように、元素合成過程の多くは、身の回りの自然界に存在する安定な原子核の領域ではなく、人工的に作り出される必要のある不安定核領域を経由すると考えられている。また、元素合成を引き起こす核反応の多くも、身の回りでは見られないものであり、その定量的記述は非常に難しい。このような自然界に存在しない原子核およびその反応を、如何に知恵を絞って調べるかが、不安定原子核物理学の醍醐味の一つであり、この点において、日本の研究者コミュニティは全体の知識と技術を結集し、世界をリードしてきた。以下では、これまでの日本の貢献を、鉄までの軽い元素の合成と、鉄より重い元素の合成に大きく分けて、説明する。

¹⁴ ヘルツシュプルング・ラッセル図と呼ばれる恒星を明るさと温度の関係に基づき分類した図において、低温で明るい進化の進んだ恒星のグループに対する呼称である。太陽質量の 0.8 倍から 8 倍の質量を持つ恒星は、その生涯の後半にこの段階を経る。

3.3.4.3 これまでの日本の宇宙核物理学

鉄までの軽い元素の合成過程に必要な個々の核融合反応の確率は極めて低く、自然界では恒星のような高温、高密度の環境でしか起こらない。このような小さい確率しか持たない反応を地上で再現することに伴う困難を克服するため、大きな努力が払われてきた。日本では特に 1990 年代に入って実験宇宙核物理研究の機運が高まった。その中で、九州大学での $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$ 直接反応測定、RCNP や JAEA の安定核ビームを使った反応研究などが成果を挙げてきた。また、産総研や甲南大の NewSUBARU のガンマ線ビームラインを使った光分解反応測定も、宇宙核物理研究に大きく寄与するものであった。特に不安定核ビーム技術が大きく発展したことで、不安定核を含む核反応の研究を進める新しい可能性が開かれた[101, 102]。その端緒となったのが hot-CNO サイクルの始まりに関する $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)$ 反応研究であり、日本のグループがクーロン分解反応によって共鳴反応率の導出に成功した。その後も世界的に不安定核を含む天体核反応の研究は進展した。特に ^8B 太陽ニュートリノ生成率を決める $^7\text{Be}(\text{p}, \gamma)$ 反応の研究進展は著しく、日本のグループによるニュートリノ振動の発見と併せて太陽のニュートリノ発生機構を定量的に理解する鍵を与えた。不安定核ビームは安定核と比較すると、ビームの強度が弱い。このために、核反応の再現がより困難となるという問題があるが、ビーム量の増強や、 $^8\text{B}(\gamma, \text{p})^7\text{Be}$ クーロン分解反応といった逆反応や、 $^7\text{Be}(\text{d}, \text{n})^8\text{B}$ 代理反応を用いた手法の適用によって、困難が克服されつつある。また最近では日伊共同研究でなされた $^{18}\text{F}(\text{p}, \alpha)$ 反応率の測定は特筆に値する[103]。この研究では、通常測定が非常に困難な低いエネルギー領域での反応率が決定されている。日本のコミュニティの持つ能力をベースにしながら、国際協力を推し進めることで花開いた研究成果の好例と言える。このような様々な反応の実験的研究の遂行において、日本における低エネルギー核反応理論研究の進展が重要な役割を果たしてきたことは言うまでもない。

先に述べたように鉄より重い元素合成過程には幾つかの種類があるが、中でも r 過程元素合成のメカニズムの解明に向けて、日本は非常に大きな役割を果たしてきた。この背後には、2000 年代に夢の RI ビーム工場 (RIBF) が登場したことにより、日本の不安定原子核物理学コミュニティが、r 過程が経由する安定線から遠く離れた中性子過剰核の大量生成に関して、世界に冠絶する能力を獲得したことが大きい。

特に RIBF におけるヨーロッパと日本の研究グループの共同プロジェクトである EURICA プロジェクトでは、 β 崩壊の持つ寿命を、r 過程の経路にそって系統的に測定することに成功した。中性子捕獲と β 崩壊は、言うなれば自動車のアクセルとブレーキのようなものである。アクセルである中性子捕獲により r 過程は安定線より遠い中性子過剰領域を通ることができる。一方ブレーキである β 崩壊は、原子核をより安定なものに改変する事で r 過程の経路を安定線に押し戻す。特にブレーキである β 崩壊の寿命は原子核構造に強く依存し、直接測定する必要があった。

実際に、RIBF で得た β 崩壊の系統的データを用いることで、日本を中心としたグループは、ある爆発的天体現象モデルでは、 r 過程で作られたと思われる原子核の存在量分布をいわゆる第二ピーク領域付近から希土類元素の質量領域にわたる広い質量領域で再現できることを示すという快挙を達成した(図 3-25)[104]。この研究そのものは核データの地道な測定が業績として花開いたものであるが、それと並行して、このような存在量分布のパターンを生む機構として存在する魔法数の研究が日本で進展したことも見過ごされてはならない事実である。

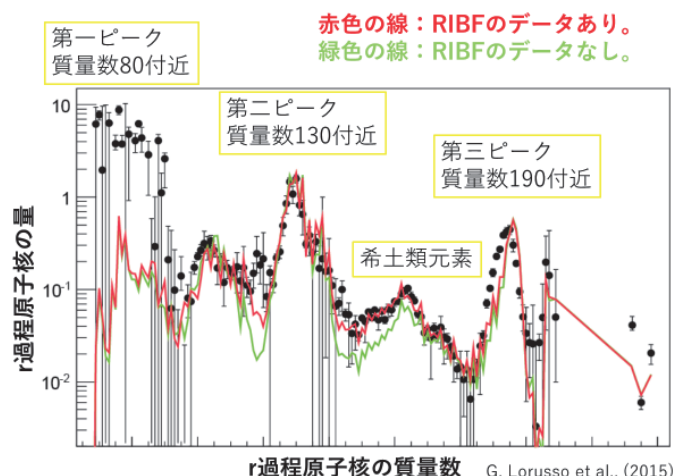


図 3-25 r 過程原子核の量。RIBF で測定された核データで観測が良く再現されている。

3.3.4.4 これからの日本の宇宙核物理学

元素の起源は一見かなりの部分がよく理解されるようになってきたかのように思われる。しかし、以下にのべるように、かなり基本的なレベルで説明のつかない謎が数多く残されているのである。このことは元素合成が「いつ」、「どこで」、「どのように」起こったかのいずれかの疑問に対する私たちの現時点での答えに、まだ不十分もしくは間違っている点があることを示唆している。この問題は、単に原子核のデータや、天体観測のデータを別々に集めたところで、解決できない可能性が高い。これからの日本の宇宙核物理学は、原子核物理学と天体観測を中心とした宇宙物理学を、本格的に融合する時代に入ったといえる。

軽い元素の起源は、主要な点に関しては理解されていると思われるが、大きな課題が残されている。例えば、ビッグバン元素合成における ${}^7\text{Li}$ 合成量は観測量とモデル計算との間に数倍の開きがある。炭素燃焼過程における ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ の融合反応の低エネルギーの共鳴的振る舞いは理解されておらず、AGB 星における炭素燃焼を再現できない。

天体観測はまだまだ発展途上にあり、現在の元素合成の理解に隠された綻びが今後次々と明らかになるであろう。特にガンマ線の観測は、X線の観測とは違い、原子ではなく、原子核そのものに敏感であるという点で、非常に重要な天体観測手法になりつつある。1990年代以降のガンマ線観測衛星により特定の元素由来の宇宙ガンマ線が発見され、ごく最近も ^{56}Ni 由来のガンマ線が新たに観測されている

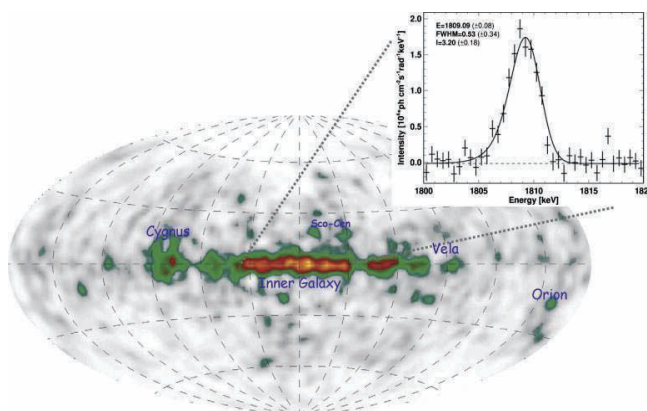


図 3-26 天体中の ^{26}Al (寿命 2.6 万年)由来の γ 線分布。

が[105]、それぞれのガンマ線の生成源や生成量には、核データの不足に由来する大きな不定性が残されている。また図 3-26 に示した ^{26}Al のガンマ線の観測データのように、今まさに我々の銀河で起こっている元素合成が観測されるようになってきた。これらの観測データを実際の天体現象の中で起こっている過程につなげる上で、原子核の反応率の測定データの重要性は増している。

重い元素の起源の理解への道のりは、さらに複雑である。r 過程が起こるとされる起源天体が具体的に何であるかですら、まだ明らかになっていないのである。現段階で言えることは非常に多くの中性子が放出されないといけないということであり、そのような天体現象の候補として重力崩壊型超新星や、中性子星連星系の合体等が考えられている。これらの天体現象はいずれも、「ビッグバン元素合成—巨大質量を持つ初期世代星の誕生—超新星爆発—中性子星・ブラックホールどうしの合体—星間空間への熱・物質放出—一次世代の星形成」という宇宙・銀河の進化における物質とエネルギー循環の連鎖の中に位置する高エネルギー天体現象である。爆発・合体メカニズムを解明することは、超新星ニュートリノ、重力波、光赤外線的同时検出など[106]とともに重元素合成過程の解明を目指すマルチメッセンジャー天文学の中心的な研究課題となっており、観測的宇宙論や銀河進化論の研究を進める上でも喫緊の課題である。

必要な基礎的物理量は、原子核質量、中性子捕獲反応断面積と中性子分離エネルギー、ベータ崩壊および電子・陽電子捕獲の半減期と Q 値、核分裂崩壊率、核分裂片の質量分布、光・核反応率、ニュートリノ・原子核反応率、等である。特に弱い相互作用による反応は、ニュートリノ加熱型超新星爆発において重要であると近年注目を集めているが、その反応率の直接測定は非常に難しい。これは弱い相互作用による反応断面積があまりに小さいため、元素合成を理解するために重要な 100 MeV 以下のニュートリノビームによる標的核実験が実質的に困難であるからである。このため、ハドロンの荷電交換反応や電子・ミュー粒子などのレプトンを用いた実験によって、原子核の弱電相互作用に対するレスポンスを測定する実験も重要となるであろう。また、宇宙における爆発天体現象は極めて高温・高密度になるため、原子核の基底状態間の遷移だけでなく、励起状態間の遷移も測定する必要もあるだろう。

以上の個別の原子核の反応率、応答に加えて、原子核の核物質としての性質の理解の重要性が近年増している。例えば、現在の宇宙核物理学の知識では、ニュートリノ加熱型超新星は、爆発

現象そのものがほとんど再現できない。太陽質量の 20 倍～100 倍の質量を持つ星が超新星爆発した観測的証拠があるにもかかわらず、シミュレーションでは近年ようやく 11.3 倍太陽質量の星の爆発に成功したところである。このことは、爆発のダイナミクスや、その背後にある原子核の性質（状態方程式、ニュートリノと原子核の間の相互作用）に対する我々の理解に、大きな変更が必要であるかもしれないことを示唆している。この問題を解決するために、観測と原子核実験双方からの研究が今後重要になってくるであろう。

また、ごく最近報告された二つのブラックホールの融合から来る重力波の観測成功のニュースで幕をあげた重力波天文学は、中性子星連星系の合体現象に関する情報をもたらし始めている¹⁵。この現象から来る重力波の波形は核物質の状態方程式に強く依存すると考えられ、今後の原子核実験から得られる状態方程式に基づいて、この重力波の波形を理解できるかは非常に興味深い課題である。またこの合体現象は天体現象の中で最も多くの中性子を出す。このような非常に強い中性子フラックスのある状況下では、 r 過程の経路はより重い原子核領域に伸張し、最終的には核分裂を起こす。この r 過程経路の終端が核図表のどこにあるかは、 r 過程の元素合成に果たす役割を理解する上で基本的な情報であり、中性子連成系の観測の進展とともに注目をあつめる実験的・理論的課題になるであろう。また r 過程によって作られた重い元素が核分裂した後、再度 r 過程を繰り返す核分裂サイクルが起こればと考えられる。核分裂サイクルが一体どのようなものであるかを明らかにするために、不安定核における核分裂研究を行うことが非常に重要になってくるであろう。

これらの課題に取り組むために、現在の核物理実験の手法は大きな変更を迫られている。特に r 過程で生成された重元素の内、質量数 190 付近に位置する原子核のグループ（第 3 ピーク）の元となる中性子過剰原子核を生成することは、現在の RI ビーム生成手法では困難である。日本の KISS プロジェクトでは、深非弾性散乱における多中性子移行を利用して、このような未知の中性子過剰原子核を世界で初めて生成しようとしている。また、OEDO プロジェクト [40]では、幅広い核図表にわたって、低エネルギーの不安定核ビームを効率よく生成する全く新しい手法を開発し、ヨーロッパの ISOLDE や米国の FRIB の低エネルギー RI ビームに対抗しようとしている。これら低エネルギービームの開発は、天体現象で重要な温度領域に対応した核反応を実験室で再現するという意義がある。また究極的には、RI ビームの大量生成に限界が来る日が必ず訪れる。そのような場合には、辛うじて生成された一個の不安定核を最大限利用しつくす必要がある。日本の Rare-RI-Ring (R3)プロジェクトや MR-TOF プロジェクト[107]では、このような希少な原子核を長時間蓄積することで、一個の不安定核粒子から、その質量の測定や将来的には核反応測定を可能にすることを目指している。

このように元素の起源を解明する研究は、原子核物理学、天文学、宇宙物理学などの諸分野を横断する隣接境界領域のシナジー効果による研究者間の協力が必要不可欠である。また、近い将来、現在建設中の米国の FRIB などの施設の登場により、世界との熾烈な競争にさらされるであろう。日本の知恵、技術、人材、資金を結集することで、この競争に打ち勝ちたいと考えている。

¹⁵ LIGO, VIRGO, KAGRA など測定が行われている。

3.4 他分野との関係

不安定核物理分野は、図 3-27 に示したような他分野および大型施設におけるプロジェクトと連携して、素粒子から宇宙までを結んだ幅広い科学研究を展開している。以下、図の左（素粒子）から右（宇宙）の方向に向かって、各分野との連携を説明する。

不安定核物理分野は、標準模型の検証や新しい素粒子（超対称性粒子）の探索など目指した基礎物理分野と連携している。基礎物理分野における研究では、興味のある現象を示す信号が非常に小さいため、信号探索に用いる物理系の雑音を極端に下げるか、もしくは信号を増幅する必要がある。これら 2 点において、不安定核は非常に有利な性質を持つ。例えば、不安定核は、外界の影響によらず、自ら、弱い相互作用を通して安定核へと壊変していく。このため弱い相互作用を通し基礎物理を研究する場として有用である。また、超対称性粒子によって生じる原子の電気双極子モーメント(EDM)探索の計画も進められている。原子核が八重極変形した場合には、EDM の信号が大幅に増幅され、測定感度が上がると予想される。このような低エネルギーの高精度実験は、LHC などの超高エネルギー加速器実験の相補的な研究として注目されている。八重極変形した原子核としては、フランシウム不安定核が候補であり、フランシウムの大量生成の開発が進められている。

不安定核物理分野は、不安定核生成を武器にハドロン物理と連携を始めている。ハドロン物理のみならず、現代科学の最大のテーマの一つは、物質の質量の起源の解明である。物質の質量はそのほとんどを原子核が担っており、その原子核の質量の 99% は核子（陽子、中性子）の質量が担っている。したがって、核子の質量の起源を理解することが重要であるが、核子質量のたった 2% しか裸のクォークの質量で説明できず、何らかの質量獲得メカニズムの存在が必要である。この質量獲得メカニズムとして、核子質量のほとんどがカイラル対称性の破れを通して生じているというものが提唱されている。このカイラル対称性の破れを核媒質中で調べることを目的として、従来のハドロン物理分野では、自然界に存在する原子核でパイ中間子原子分光が行われてきた。現在、不安定核物理分野とハドロン物理分野の連携により、RIBF で供給される不安定核を用いてパイ中間子原子を作るプロジェクトが展開されようとしている。これが成功すれば核媒質の種類を自由自在に変えながら、質量獲得メカニズムを調べるという全く新しい研究が可能になる。

ストレンジネス核物理分野は、不安定核物理分野、核物質分野と同様に量子多体系の物理を対象とする。前者の扱う原子核が後者二つのそれと異なる点は、陽子、中性子に加えてストレンジネスを含んだラムダ粒子を構成要素とするところにある。このため、後者では、構成要素のフレーバーの持つ対称性が $SU(2)$ 群で記述されるが、前者では $SU(3)$ 群によるという違いがある。このような基礎的な対称性の違いが原子核の振る舞いに与える影響は、量子多体系の物理として興味深い。例えば、共鳴の候補が見つかった 4 中性子系は、通常の原子核としては不安定であるが、たった 1 個のラムダ粒子を構成要素として追加すると、深く束縛すると予言されている[108]。これはフレーバーの持つ対称性が、原子核全体の性質を劇的に変化させることを意味している。このような観点から、ストレンジネス核物理分野における研究と不安定核物理分野の研究は、常に相補的な知見を与える。

次に、不安定核物理分野は、身の回りの物質に関連した科学分野、技術開発分野とも、連携を行っている。これは原子核が身の回りの物質を構成する元素の構成要素であるからである。超重元素生成は、元素周期表の拡大を通して、元素を扱う科学である化学のフロンティアを拡大し、重元素の化学を生み出している。一方、通常身の回りにある元素の原子核を、放射性同位体 (RI) に置き換えるだけでも、様々な応用が可能である。例えば、 α 線を放出する幾つかの重イオン RI を用いると、癌への分子標的を生成することが出来る。また、100% 輸入に頼っている ^{99m}Tc など、医療診断に用いられている RI を効率良く生成する方法の探索も不安定核物理分野が貢献すべき重要な課題である。このような切り口から、医療、創薬分野との連携を行っている。また、不安定核物理分野は工学分野とも連携を行っている。原子力発電所からの高レベル放射性廃棄物の処理は、現在の世界が抱える大きな問題であり、原子核工学研究者は、この問題の解決に取り組んでいる。特に、廃棄物の減容を目的とした核変換が非常に重要な技術であると考えられ、この技術開発に必要な基礎データ取得に不安定核物理分野は貢献している。これは不安定核物理分野の持つ能力が、核廃棄物を構成する RI の性質を調べる上で、非常に有用であるからである。2018 年現在、ImPACT プロジェクトの枠組みの中で、連携が行われている。

前節において詳しく述べたが、不安定核物理分野の大きな柱の一つである宇宙物理分野は、今後天文学、特に近年可能になってきた可視光、X 線、ガンマ線、重力波の測定などを組み合わせたマルチメッセンジャー天文学と密接に連携していく。特に r 過程における元素合成機構を、原子核データと観測の双方から解き明かすことが重要である。また、中性子星連星の合体現象のダイナミクスの理解には、不安定核物理分野や核物質分野で取り組んでいる核物質の状態方程式研究の知見が必要不可欠である。

最後に、核物質分野は、不安定核物理分野と原子核研究のアプローチが全く異なることにより、非常に効率の良い原子核研究の推進が可能になっている。不安定核物理分野は、核図表の広い領域にわたって不安定核を生成する、言い換えれば系の持つアイソスピンを制御することによって、アプローチしているのに対し、核物質分野は、特に原子核の励起エネルギーを高精度で測ることで、言い換えれば、エネルギーを精密制御することで、アプローチしているという違いがある。後者のアプローチは、将来的には不安定核にも適用すべきものであるが、現状では難しい。このため核物質分野が精密制御という観点から核物理研究分野を切り開き、不安定核物理分野は技術的な進展ともにそれを取り入れ、アイソスピン制御アプローチと組わせていくという関係にある。また、 4π ガンマ線検出器の開発など、予算規模の大きい検出装置開発に関しては、双方の協力が必要であると考えられる。



図 3-27 不安定核物理と核物理を含む他分野と関係。

3.5 これからの不安定核物理

前回の白書から4年の間に、不安定核物理研究分野では、特筆すべき成果が多数あった。原子番号0の4中性子共鳴候補の発見、数十もの新同位体の生成、113番元素の命名権獲得、これら新しい量子状態の発見は、存在を可能にしている物理の解明を促し、今後の原子核物理を飛躍的に進める契機になることは確実である。核反応は、安定の島への道筋をつけるためにも、実験、理論両面からの検討が不可欠になる。核構造理論と核反応理論を一体として、一つの量子状態として記述することは、核物理のパラダイムシフトへと繋がると期待できる。核構造研究においては、第2世代のRI生成分離装置RIPSから第3世代のBigRIPSへ進んだことで、ビーム強度が大幅に増加し、より安定線から離れた原子核が生成可能になった。この結果、中性子過剰同位体の核構造情報が飛躍的に広がり、Mayer-Jensen以来受け継がれてきた、スピン軌道角運動量の相互作用によって決定される魔法数の概念が崩れ、より普遍的な核構造モデルの構築が進められている。新たな核構造モデルの構築と共に、今後は、無限量子多体系である物性物理では見られない有限量子多体系として予言されている様々な核子相関を解明するのが課題になっていくであろう。宇宙核物理では、 r 過程経路解明に向けて、核データの蓄積が進んでいる。 r 過程の元素生成過程に位置する原子核の寿命を網羅的に測定することで、従来考えられていたよりも r 過程が速いことが分かるなど、核データが超新星爆発モデルを検証するという重要な成果があげられた。しかし、 r 過程経路を左右する質量、中性子放出確率、中性子捕獲確率がまだ未測定である。 r 過程に関わる研究がまだ挑戦的なテーマであることに変わりなく、これらの測定を通して、初めて元素合成が生じた天体現象に制限をかけることができる。

今後5年間のマイルストーン

未知の量子状態の探索: 過去5年間の成功は、RIBFの大強度ビームによってもたらされた、と見ることができる。今後は、更なるビームの大強度化とともに、検出器群の整備を進めていくことが重要である。

RIBFでは、113番元素の次の未知超重元素として、 $Z=119$, 120番元素の生成を目指している[109]。ドイツGSI、ロシアJINR、フランスGANILとの競争を打ち勝つためには、超重元素生成と同時に、生成物の同定方法の確立が肝要である。RIBFではMR-TOF装置を用いた超重元素質量測定プログラムが進行中であり、早急に完成させて優位性を高める必要がある[110]。新同位体探索ではビーム量を増強し、装置や検出器の放射線耐性を上げることでより安定核から遠く離れた不安定核が生成できる。2020年にはアメリカ・ミシガン州立大のFRIBが稼働し、競争が激化するため、RIBF施設の早急な性能向上が必要である。状態方程式の完成に向けては、アクティブ標的型の飛跡検出器の大型化を進めて、錫同位体の単極子巨大共鳴を網羅的に測定し、 $K\tau$ 項を決定することが目標となる[111]。

量子多体系の物理: 核構造研究では、新魔法数探索、奇核および変形した重い原子核において、 γ 線分光を通した物理実験が主になると予想される。特に新二重魔法数原子核の候補である ^{140}Sn

の第一励起エネルギーや、正四面体型変形が予想される ^{80}Zr 、バナナ型変形が予想されている ^{150}Ba の核分光実験が短期目標になる。これらの実験には、高エネルギー分解能かつ高位置分解能を持つ GRETINA demonstrator や GRAPE [112] などのトラッキング型ゲルマニウム半導体検出器の整備が不可欠になる。エキゾチックな変形状態を選択的に励起させるために、世界的にユニークな低エネルギー RI ビームを供給できる OEDO 装置を駆使し[40]、またアインシュタニウム、トリチウム、 ^{14}C 標的等の放射性同位元素標的を組み合わせた実験を推進する。新しい中性子相関を探索する場としては ^{60}Ca からの二中性子崩壊測定が一つの目標となる。この実験を可能にするためには、PANDORA、HIME、NEBULA+[113] と言った中性子検出器の開発が不可欠であろう。また、世界唯一の不安定核電子散乱装置 SCRIT の本格運用により、不安定核の電荷分布が初めて明らかになる [114]。

宇宙核物理: r 過程の経路決定のために、経路上の原子核の中性子放出確率を測定する BRIKEN 計画が進行中であり、EURICA の実験結果同様に大きな成果が期待できる。r 過程の解明には不安定核の質量測定も不可欠であり、飛行時間測定、質量リング等を用いた質量測定を進めていく必要がある。r 過程原子核第 3 ピーク周辺の ^{200}W - ^{195}Tm 生成は、RIBF で採用している核分裂や核破碎反応では到達が困難であり、多核子移行反応を用いた KISS 装置を増強することで推進する。KISS 装置にも競合相手として、JINR の GALS 装置、ANL の N=126 factory があり、早期の増強が望まれる。

10 年後以降の不安定核物理研究施設へ

2017 年の初めに不安定核物理分野の大型研究計画マスタープランとして、日本学術会議に提案された RIBF 次期計画では

- 2 基の重イオン加速器の新設によって、現在の一次ビーム量を 30 倍に増強。
- 4π ゲルマニウム検出器の新設による不安定核の高スピン状態開拓。
- OEDO のビーム量増強、反応生成物分析器の新設による高励起状態分光。
- KISS の高度化による、超重元素の開拓研究。

の四つの新規開発が提案された。この次期計画の一部は、加速器、イオン源の増強として認められ、2020 年から運転が開始する。今後数年は、不安定核物理研究の分野で、日本が世界に於いて指導的立場が保たれることを意味するが、RIBF 次期計画後の計画を含めて議論を開始する良い機会である。

「アイソスピンを制御した量子多体系物理」という不安定核物理の定義を考えれば、この分野の究極目標は存在が予言されている原子核を全て生成することにあると言える。RIBF を始めとする世界の大型施設では、安定線からより遠い不安定核を作るために、一次ビームの大強度化が進められてきたが、未反応の一次ビームを止めるビームダンプの冷却能力、放射線遮蔽の観点から、近い将来、一次ビームの入射核破碎反応を用いた不安定核生成の限界が来ると予想される。今後 10 年は、より中性子過剰な原子核を生成するための開発研究を行っていくことが重要である。このことから、下記の新規開発の提案を、本計画では追加する。

- 新しい不安定核生成方法の探索。

一つの方法として、不安定核ビーム量がより多く見込める ISOL 方式で生成した不安定核を再加速して入射核破碎反応を行うハイブリッド型が、ヨーロッパや中国で提案されている。一方で、ISOL の技術は未だ確立されておらず、経験の蓄積が不可欠である。その点、RIBF は既に SCRIT で小型 ISOL を所有し、ハイブリッド化へ向けた基盤技術が存在している。また、安定の島の探索には、ISOL からの大強度、高品質不安定核ビームを KISS と組み合わせることが必要と考えられており、RIBF のハイブリッド化を支持している。

生成する別な手法としてより安定線から遠い不安定核を、希少な不安定核ビームをエネルギー補償型蓄積リング内で周回させ、そのリングを原子炉内に通すことで、高中性子束をビームに照射し、中性子捕獲によって、より中性子過剰な不安定核をつくることが提案されている [115]。文字通り一個の不安定核を用いた核実験である。エネルギー補償型蓄積リングを用いると、希少な不安定核と、水素やヘリウムといったガス状物質をジェット標的として用いた核反応実験も可能になる。これら二つの開拓研究を進めていくことが重要と考えられる。

量子多体系の物理の目標として、超重元素領域の魔法数の探索がある。この魔法数は安定の島の存在と深く関係しており、したがって超重元素領域の核構造研究が不可欠である。しかし、重い原子核領域では励起準位密度が高く、各々を識別するには、マスタープランの 2 番目に挙げられた 4π トラッキング型ゲルマニウム半導体検出器群が不可欠である。現在、核物理センターに GRETINA demonstrator 一台があるだけであり、 4π 検出器群の整備が望まれる。データ収集系を含めて数十億と、加速器施設並みの投資が必要であり、国内だけでなくアジアの諸国を巻き込んだ共同研究体制を作っていくことが重要になろう。重い原子核では、四重極変形度に対してポテンシャルの極値がなくなることとも言われており、殻模型では記述できない新たな原子核となっているかもしれない。

ところで、近年のレーザー技術の発展により、原子分子内の直接電子運動が観測されるようになってきた[116]。電子の原子中の運動の時間スケールは約 100 アト秒(10^{-18} 秒)である。一方、レーザーの最短時間分解能はアト秒であり、十分、電子の運動が観測可能である。さらに、レーザー技術の進展は凄まじく、既に自由電子レーザーを用いて、zepto 秒(10^{-21} 秒)単位のレーザー開発が視野に入れられている。もし、zepto 秒を切るようなレーザーが実現すれば、原子核反応の直接観測ができるかもしれない。特に多段階反応を経ると考えられている準核分裂反応測定では、反応時間が間接的に測定されているが 10^{-18} ~ 10^{-21} 秒とばらつきがあり [117]、十分レーザーでの観測が可能になる。次世代施設の目標として、このような核反応の直接観測も在り得る。レーザーを使わない方法としては、同一方向に核子当たり 10 GeV にまで加速させた重イオン衝突器で、相対エネルギーが 0 でない状態で原子核同士を衝突させる。原子核反応の時間が 10^{-18} 秒の場合には、3 nm 程度動く。電子顕微鏡レベルの検出器を用意することで、原子核反応を直接観測することができるかもしれない。さらに、加速器を 3 本にすることで三体反応測定も発展形として考えられる。10 年という期間では実現困難であろうが、核反応の直接測定に向けた間接測定等、基盤研究を進めていく必要がある。

謝辞

本稿の執筆に当たり、ワーキンググループメンバー以外にも多数の方々に協力して頂いた。特に、市川隆敏氏(第1章)、梶野敏貴氏(第4章)には文章の原案作成にもご協力頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] https://www.gsi.de/en/researchaccelerators/fair/information_on_the_fair_project/facts_and_figures.htm
- [2] M. Ikegami, et al., Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC 2014, Geneva, Switzerland.
- [3] Y. Kadi, M.A. Frasser, A. Papageorgiou-koufidou, CERN2018-002-M.
- [4] J. Dilling, R. Krucken, L. Merminga, Hyp. Int. 225 41 (2014).
- [5] R. Caballero-Folch et al., Phys. Rev. C 98, 034310 (2018).
- [6] C. Scheidenberger, JPS Conf. Proc. 6, 010027 (2015).
- [7] N. Fukunishi, Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan.
- [8] K. Morita et al., Journ. Of the Phys. Soc. Japan, 73, 2593-3596(2004).
- [9] K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. 116, 052501 (2016).
- [10] W.D. Myers, W.J. Swiatecki, Nucl. Phys. 81, 1 (1966).
- [11] H. Meldner, Arkiv Fys., 36, 593 (1967).
- [12] M. Caamano et al., Phys. Rev. C, 88, 024605 (2013).
- [13] Y.X. Watanabe et al., Phys. Rev. Lett., 115, 172503 (2015).
- [14] P.T. Greenlees et al., Phys. Rev. Lett. 109, 012501 (2012).
- [15] K. Nishio et al., Phys. Rev. C 77, 064607 (2008).
- [16] S. Dmitriev, M. Itkis, and Y. Oganessian, EPJ Web of Conferences 131, 08001 (2016).
- [17] V. Zagrebaev and W. Greiner, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35, 125103 (2008).
- [18] Y. Hirayama et al., Nucl. Instrum. Meth. B 353, 4 (2015).
- [19] R. Léguillon et al., Phys. Lett. B 761, 125 (2016).
- [20] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts & J. W. T. Hessels, Nature 467, 28 (2010).
- [21] V. Ajdacic et al., Phys. Rev. Lett. 14, 444 (1965).
- [22] A.C. Philipps, Rep. of Prog. Phys. 40, 905 (1977).
- [23] F.M. Marques, PRC 65, 044006 (2002).
- [24] J. Zenihiro et al., RIKEN Acc. Prog. Rep. 16, 54 (2017).
- [25] S. Ota et al., RIKEN Acc. Prog. Rep. 17, 68 (2018).
- [26] R. Shane et al., Nucl. Instr. Meth. A 784 513 (2015).
- [27] D.R. Lafosse et al., Phys. Rev. Lett. 74, 5186 (1995).

- [28] T. Ichikawa, J.A. Maruhn, N. Itagaki, K. Matsuyanagi, P.-G. Reinhard, and S. Ohkubo Phys. Rev. Lett. 109, 232503 (2012).
- [29] H. De Vries et al., Atomic and Nuc. Data Tables, 36 (1987) 495.
- [30] I. Tanihata et al., Phys. Rev. Lett. 55, 2676 (1985).
- [31] T. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. 60, 2599 (1988).
- [32] M. Wakasugi, T. Suda and Y. Yano, Nucl. Instrum. and Methods A278 (2004) 216.
- [33] T. Suda et al., Phys. Rev. Lett. 102, 102501 (2009).
- [34] N. Orr, Physics 9, 14 (2016).
- [35] K. Miki, H. Sakai et al., Phys. Rev. Lett. 108, 262503 (2012).
- [36] S. Noji, Doctoral dissertation, University of Tokyo, 2012.
- [37] Y. Sasamoto, T. Uesaka et al., Proceedings of the French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems (World Scientific, Sigapore), pp. 148-151 (2013).
- [38] M. Dozono, T. Uesaka et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 49, 50 (2016).
- [39] S. Shimoura for OEDO Collaboration, Letter of intent for RIBF PAC June 2014.
- [40] M. Kamimura et al., Prog. Theor. Phys. Suppl. 89 (1986), 1.
- [41] T. Matsumoto et al., Phys. Rev. C 70, 061601(R) (2004).
- [42] S. Aoyama, T. Myo, K. Kato and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. (2006) 116 (1): 1-35.
- [43] T. Myo, Y. Kikuchi, H. Masui and K. Kato, Progress in Particle and Nuclear Physics 79 (2014) 1–56
- [44] Y. Kikuchi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 2016 (10): 103D03.
- [45] 森永晴彦 日本物理学会誌 51 巻 4 号 (1996).
- [46] C. Thibault, et al., Phys. Rev. C12, 644 (1975).
- [47] D. Guillemaud-Mueller, et al., Nuclear Phys. A426, 37 (1984).
- [48] T. Motobayashi, et al., Phys. Lett. B346, 9 (1995).
- [49] H. Sakurai, et al., Phys. Lett. B448, 180 (1999).
- [50] H. Iwasaki, et al., Phys. Lett. B522, 9 (2001).
- [51] A. Navin et al., Phys. Rev. Lett. 85, 266 (2000).
- [52] C.R. Hoffman et al., Phys. Lett. B 672, 17 (2009).
- [53] R. Kanungo et al., Phys. Rev. Lett. 102, 152501 (2009).
- [54] S. Takeuchi et al., Phys. Rev. Lett. 109, 182501 (2012).
- [55] Z.Y. Xu et al., Phys.Rev.Lett. 113, 032505 (2014).
- [56] D. Steppenbeck et al., Nature (London) 502, 207 (2013).
- [57] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog. Part. Nucl. Phys. 61, 602 (2008).
- [58] L. Gaudefroy et al., Phys. Rev. Lett. 97, 092501 (2006).
- [59] G. Burgunder et al., Phys. Rev. Lett. 112, 042502 (2014).
- [60] L.P. Gaffney et al., Nature 497, 199 (2013).
- [61] T. Sumikama et al., Phys. Rev. Lett. 106, 202501 (2011).

- [62] R. Yokoyama et al., Phys. Rev. C 95, 034313 (2017).
- [63] S. Takami, K. Yabana, and M. Matsuo, Phys. Lett. B 431, 242 (1998).
- [64] M. Grasso et al., Phys. Rev. C 79, 034318 (2009).
- [65] A. Mutschler et al., Nature Physics 13, 152 (2017).
- [66] T. Duguet et al., Phys. Rev. C 95, 034319 (2017).
- [67] A.N. Andreyev et al., Nature 405, 430 (2000).
- [68] C. Force et al., Phys. Rev. Lett. 105, 102501 (2010)
- [69] F. Rotaru et al., Phys. Rev. Lett. 109, 092503 (2012).
- [70] A. Gottardo et al., Phys. Rev. Lett. 116, 182501 (2016).
- [71] K. Ikeda et al., Prog. Theor. Phys. E68, 464 (1968).
- [72] E. Epelbaum et al., Phys. Rev. Lett. 106, 192501 (2011).
- [73] W. R. Zimmerman et al., Phys. Rev. Lett. 110, 152502 (2013).
- [74] T. Kawabata et al., Phys. Lett. B 646, 6 (2007).
- [75] R.B. Wiringa et al., Phys. Rev. C 62, 014001 (2000).
- [76] N.Itagaki and S.Okabe, Phys. Rev. C 61, 044306 (2000).
- [77] M. Freer et al., Phys. Rev. Lett. 96, 042501 (2006).
- [78] D. Suzuki et al., Phys. Rev. C 87, 054301 (2013).
- [79] A. Fritsch et al., Phys. Rev. C 93, 014321 (2016).
- [80] H. Yamaguchi et al., Phys. Lett. B 766, 11 (2017).
- [81] T. Suhara et al., Phys.Rev.Lett. 112, 062501 (2014).
- [82] H.Morinaga, Phys.Rev.101,254 (1956); Phys. Lett. 21, 78(1966).
- [83] J.-P. Ebran et al., Nature 487, 341(2012).
- [84] J.-P. Ebran et al., Phys. Rev. C 90, 054329 (2014).
- [85] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).
- [86] R.Subedi et al., Science 320 (2008) 1476.
- [87] E.Piasetzky et al.,Phys. Rev. Lett. 97, 162504 (2006).
- [88] H.J. Ong et al., Phys. Lett. B 725, 277 (2013).
- [89] K. Miki et al., Few-Body Syst. 54, 1353 (2013).
- [90] S. Terashima et al., RCNP-E443 proposal.
- [91] T. Nakamura et al. Phys. Rev. Lett. 96, 252502 (2006).
- [92] Y. Kikuchi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 103D03, (2016).
- [93] A. Spyrou et al., Phys. Rev. Lett. 108, 102501 (2012).
- [94] Z. Kohley et al., Phys. Rev. C87, 011304(R) (2013).
- [95] Z. Kohley et al., Phys. Rev. C91, 034323 (2015).
- [96] National Research Council's board on physics and astronomy (2002), "The 11 Greatest Unanswered Questions of Physics".
<http://discovermagazine.com/2002/feb/cover>

- [97] George Wallerstein et al., "Synthesis of the elements in stars: forty years of progress", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 69, No. 4, October 1997.
- [98] ジョージ・ガモフ著、伏見康治訳、白揚社；復刻版(2016/7/30)。
- [99] E. M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, and F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* 29, 548 (1957).
- [100] I. Aravi et al., *Nature* 551, 64 (2017).
- [101] Y. Nagai, M. Igashira, N. Mukai, T. Ohsaki, F. Uesawa, K. Takeda, T. Ando, H. Kitazawa, S. Kubono and T. Fukuda: *Astrophys. J.* 381 (1991) 444.
- [102] T. Motobayashi et al.: *Phys. Lett. B* 264, 259 (1991).
- [103] S. Cherubini et al., *Phys. Rev. C* 92, 015805 (2015).
- [104] G. Lorusso, S. Nishimura, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 114, 192501 (2005).
- [105] Roland Diehl et al., *Science* Vol. 345, Issue 6201, pp. 1162-1165 (2014).
- [106] 第23期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2017）、「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験」、「LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星」、「次世代赤外線天文衛星 SPICA」。
- [107] P. Schury et al., *Phys. Rev. C* 95, 011305 (2017).
- [108] E. Hiyama, The 15th RIBF discussion meeting at Sendai. 3rd/Aug./2016.
- [109] K. Morita, *JPS Conf. Proc.* 14, 010004 (2017) [4 pages]
- [110] <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-24224008/>.
- [111] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-015-4130-5>
- [112] <http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/nuspeq/index.php?Detector%2FGRAPE>.
- [113] <http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~nebula/>
- [114] http://www.lns.tohoku.ac.jp/~scrit/SCRIT_Sendai_e/SCRIT_Sendai_e/SCRIT_MainPage.html
- [115] R. Reifarh et al., *EPJ Web of Conferences* 93, 02013 (2015).
- [116] E. Gouliemakis et al., *Nature* 466, 739 (2010).
- [117] R. Du Rietz, et al., *Phys. Rev. Lett.* 106 052701 (2011).