



反転の島 (Island of Inversion)

宇都野 穰 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター)

近年、理研RIBFなどの大型加速器によって中性子過剰核の構造・反応が精力的に調べられ、既存の魔法数の消失や新魔法数の出現など、エキゾチックな現象が次々と発見されています [1]。反転の島 (island of inversion) [2]とは、中性子数20の魔法数が消失するとされる核図表上の領域に対する呼び名です。[2]にて提唱された反転の島は、図1に表される中性子過剰核の小さな領域にあたり、それは超重元素のisland of stabilityと同様、核図表上の島のように見えます。これは非常にキャッチーなネーミングのようで、island of inversionをタイトルに含む論文だけでも50本以上を数えます (Web of Science調べ)。

island of inversionの“inversion”は魔法数の消失を端的に表した言葉です。「魔法数 = 基底状態において閉殻構造を形成する核子数」であることから、魔法数の一つである中性子数20の原子核の基底状態は、図2(a)で表される閉殻配位が支配的であると期待されます。その場合、図2(b)に示す、閉殻から上の fp 軌道に中性子を2個励起させた $2\hbar\omega$ 状態は励起状態として出現します。しかし、反転の島に属する原子核では、後述する実験的証拠から、魔法数であれば本来励起状態であるべき $2\hbar\omega$ 状態が基底状態になると考えられています。これは、配位間でエネルギー順序が反転 (inversion) している、すなわち魔法数の特性が消失しているということになります。

反転の島研究の歴史は不安定核研究の中では比較的早く、1970年代に遡ります。当時、不安定核を生成・分離する唯一の装置であったISOL型施設では分離できる不安定核の元素選択性が非常に強かったのですが、アルカリ金属の ^{11}Na 同位体は容易に分離可能だったためです。結果的にNa同位体が反転の島に含まれていたのはまさに幸運と言えます。反転の島の最初の

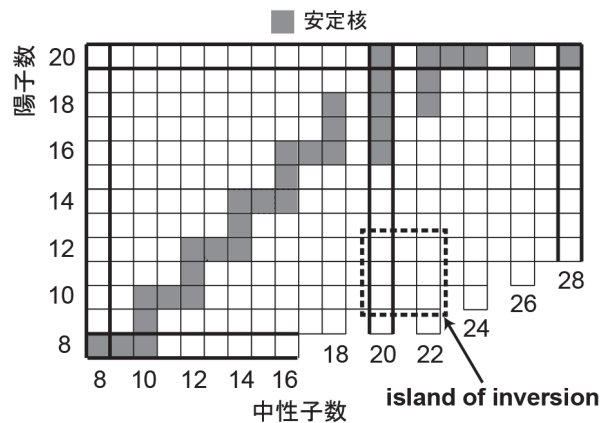


図1 [2]で提唱された island of inversion。

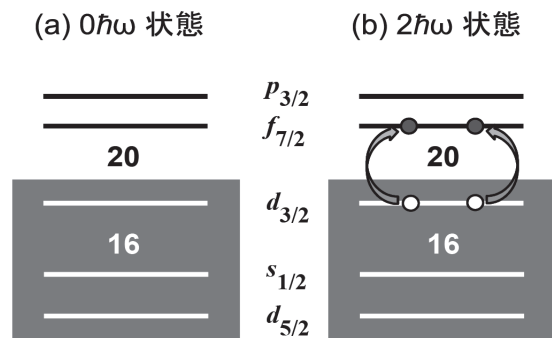


図2 中性子数 20 核における(a) $0\hbar\omega$ 状態および(b) $2\hbar\omega$ 状態の中性子配位の模式図。グレーの領域は閉殻配位、(b)における黒丸と白丸はそれぞれ粒子および空孔を表す。

実験的示唆はNa原子核の質量測定[3]によって与えられました。 ^{31}Na の中性子分離エネルギーが閉殻配位で期待されるものよりも明確に大きいことから、 ^{31}Na では閉殻配位よりもさらにエネルギーを下げる配位があると解釈されたのです。その後、Na同位体の基底状態の電磁モーメントや荷電半径の測定、ベータ崩壊分光による ^{12}Mg 同位体の励起準位の測定などから、 $2\hbar\omega$ 状態が変形によってエネルギーを稼ぎ基底状態となるという描像が徐々に固まってきました。1990年代になるとインフライト型の施設による不安定核ビーム実験が可能となり、それを用いた ^{32}Mg のクーロン励起実験[4]で得られた大きな $B(E2;0^+_1 \rightarrow 2^+_1)$ 値から閉殻構造の破れが決定的となりました。その後も実験、理論研究が数多くなされ、反転の島は当初提唱された領域よりも広く、また、その境界では $0\hbar\omega$ 状態と $2\hbar\omega$ 状態が強く混合した原子核もあると考えられています。

反転の島が未だに多くの研究者を惹きつけているのは、核力および弱束縛による殻構造の変化（殻進化）、中性子ハロー、変形やクラスター構造といった不安定核物理の重要な要素がそこに凝縮されているからでしょう。様々な要素が絡み合っているため、反転の島が出現するメカニズムが定量的に完全に明らかになっていないとはいえませんが、二つの要素が重要な役割を果たしていると考えられています。一つは陽子・中性子間の四重極相関で、プロレート変形を好む陽子数をもつ ^{10}Ne 、 ^{11}Na 、 ^{12}Mg 核が中性子のプロレート変形を引き起こすというものです。もう一つは中性子の殻構造の陽子数依存性です。テンソル力によって中性子の $d_{3/2}$ 軌道が ^{14}Si から ^8O にかけて相対的に上がり、その結果、より陽子数が少ない原子核では $2\hbar\omega$ 励起が起りやすくなります[5]。この効果は ^{24}O で知られているO同位体のドリップ線[6]と新魔法数16の出現[7]も同時に説明します。また、陽子数が減るにつれ、 fp 軌道の束縛エネルギーが小さくなり、小さな軌道角運動量をもつ $p_{3/2}$ 軌道が弱束縛効果によって相対的に下がります。このことと核力による殻構造変化の相乗効果によってMg近傍では $f_{7/2}$ 軌道と $p_{3/2}$ 軌道がほぼ縮退し、両者の軌道の混合がさらに四重極相関を強めます[8]。最近発見された ^{31}Ne における変形ハロー[9]はこの描像を支持するものです。

反転の島で培われた概念や理論・実験手法は他の不安定核領域にも活かされています。例えば、最近、中性子過剰 ^{20}Ca - ^{28}Ni 領域の研究が盛んになされていますが、そこは陽子、中性子ともに ^8O - ^{14}Si 領域のちょうど1主殻上にあたり、上記の概念をそのまま適用することができます。そういう意味で、反転の島は不安定核研究のgood practiceをもたらしたと言えるでしょう。

- [1] 理研を中心とした実験研究については、本林、櫻井両氏による本号記事も参照ください。
- [2] E. K. Warburton, J. A. Becker, and B. A. Brown, Phys. Rev. C 41 (1990) 1147.
- [3] C. Thibault et al., Phys. Rev. C 12 (1975) 644; 二中性子分離エネルギーの系統性と魔法数の関係について、H. Koura, T. Tachibana, M. Uno, and M. Yamada, Prog. Theor. Phys. 113 (2005) 305.
- [4] T. Motobayashi et al., Phys. Lett. B 346 (1995) 9.
- [5] T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 232502; Y. Utsuno et al., Phys. Rev. C 60 (1999) 054315.
- [6] H. Sakurai et al., Phys. Lett. B 448 (1999) 180.
- [7] A. Ozawa et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5493; R. V. F. Janssens, Nature 459 (2009) 1069.
- [8] I. Hamamoto, Phys. Rev. C 69 (2004) 041306(R).
- [9] T. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 262501; Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 142501.