

不安定核から粒子をたたき出す ——ノックアウト反応で見える新たな核構造



緒方 一介

大阪大学核物理研究センター/大阪市立大学理学研究科
kazuyuki@rcnp.osaka-u.ac.jp



上坂 友洋

理研仁科加速器科学研究センター
uesaka@riken.jp

原子核はどのような姿をしているのだろうか。液滴とする描像、それぞれの核子（陽子・中性子）が平均ポテンシャル中を“運動”する独立粒子描像、また原子核中に複数の核子のかたまり（房）が浮かんでいるクラスター描像などが知られている。多様な貌をもつ原子核の姿を捉える方法のひとつが、ノックアウト反応である。この反応では、高速の粒子によって原子核の構成要素が叩き出される。叩かれた粒子以外の状態が乱されなければ、叩き出された粒子が、原子核中にどの程度存在し、どのように運動していたかがわかる。核子あるいはクラスターを叩き出すことで、独立粒子描像あるいはクラスター描像で捉えた原子核の姿が浮かび上がってくる。

天然に存在する原子核（安定核）に高エネルギーの電子を打ち込んで陽子を叩き出す反応—— $(e, e'p)$ 反応——は、反応を引き起こす相互作用がよくわかっているため、原子核中の陽子をもつ一粒子構造の理解に大きく貢献した。そして最近、陽子を入射粒子とする同様の反応—— $(p, 2p)$ 反応——が、 $(e, e'p)$ 反応に比肩するクリーンな反応であることが示された。陽子を用いれば、原子核中の中性子やクラスターを叩き出す道が開けてくる。さらに、陽子と中性子のバランスが崩れた原子核（不安定核）の研究でも活躍が期待される。不安定核を入射ビームとして水素標的に打ち込むことで、安定核と同様に様々なノックアウト反応を測定することができるからである。

安定核の研究により、核内の核子を独立粒子描像によって描ける割合は約65%であることが知られている。不安定核ではどうだろうか？ これに関しては、数多くの議論がなされてきたが、陽子による核子ノックアウト反応—— (p, pN) 反応——の

結論は、不安定核か安定核かで独立粒子性の割合に大きな違いはないというものであった。

(p, pN) 反応は、不安定核の魔法数（原子核を特別安定化する核子の数）の研究にも活用されている。不安定核と安定核では魔法数は変化しうることが知られているが、 ^{78}Ni という中性子が過剰な原子核は、陽子数の28も、中性子数の50も、安定核と同様に魔法数の意味をもつことが明らかになった。このほか、魔法数と関連した面白い話題として、陽子の数が1つ変わるだけで、魔法数をもった原子核の安定度が著しく変化するというものがある。これも $(p, 2p)$ 反応によって見出された。

独立粒子性が崩れるのは、平均ポテンシャルに繰り込めない相互作用のためであり、その帰結として現れるもののひとつが、原子核のクラスター構造である。特に有名なのが α 粒子（ヘリウム4原子核）のクラスターであるが、近年では、空間的に局在する2中性子（ダイニュートロン）や、重陽子と同じ量子数をもつ陽子-中性子対なども盛んに研究されている。これらのクラスター構造を実証する手段としても、陽子によるノックアウト反応が大いに活躍している。

ノックアウト反応は、直観的にもわかりやすく、また理論の不定性も小さい、強力な研究手法である。原子核の独立粒子的側面とクラスター構造的側面の両方にアクセスできることも重要である。前者を多体相関を免れて残存する成分、後者を独立粒子性を崩す多体相関が発現したものと捉えれば、両者はまさにコインの裏表であるといえる。それらの相補的な知見を統合することで、安定核・不安定核の真の姿が明らかになると期待される。

用語解説

$(e, e'p)$ 反応：

電子によって原子核内の陽子を叩き出す反応。核内で起きる反応の振舞いを観測する最もクリーンな反応のひとつとして名高い一方、現時点では中性子や複合粒子をノックアウトする手段としては確立していない。

$(p, 2p)$ 反応：

陽子によって核内陽子を叩き出す反応。核力で起きる反応で、かつ入射・放出粒子のすべてが原子核の相互作用を受けるため、不定性が大きいと考えられてきたが、最近、実験・理論両面の進歩により、 $(p, 2p)$ 反応は原子核の一粒子構造を定量的に調べられる手段であることが示された。

魔法数：

独立粒子描像では、核子はそれぞれ座席数の決まった軌道に順番に詰まっていく。この軌道のエネルギー間隔は一律ではなく、殻構造が現れる。結果、原子でいう希ガスと同様に、核子の数が特別な値を取ったとき、原子核が安定する。その数を魔法数とよぶ。安定核の魔法数は2, 8, 20, 28, 50, 82, 126の7つ。



ノックアウト反応とだるま落としには、多くの類似性がある。成功の秘訣は、叩かれた部分以外が、何が起こったのかを感知しないこと。