



反応断面積と原子核半径

(Reaction cross sections and nuclear radii)

堀内 渉 (北海道大学大学院理学研究院)

1985年の谷畑らによるリチウム11のハロー構造の発見 [1] 以来、核子当たり 100~1000 MeV の入射エネルギーによる重イオン反応における原子核の全反応（相互作用）断面積の測定が盛んに行われています。このエネルギー領域における散乱過程の全反応断面積は原子核の半径に密接に関係し、特に不安定原子核の大きさに関する情報を得る上で近年その重要性がさらに高まってきています。全反応断面積は弾性散乱を除いた原子核衝突の全ての反応過程による断面積の和として定義されます。高エネルギーでは2つの原子核が重なった領域、すなわち相互作用領域で核破砕反応が起こるため、全反応断面積は入射・標的原子核の核半径をそれぞれ R_P , R_T とすると、2つの原子核の半径の和による「断面積」、 $\pi(R_P + R_T)^2$ 、でよく近似されます。

実験による断面積測定ではトランスミッション法が用いられます。短寿命の不安定核ビームを厚い原子核標的に入射し、反応後に核種が変化していない事象を同定することで、反応断面積を導く方法です。短寿命の不安定核ビームを厚い標的に入射する方法を取るため、標的にできないような短寿命な核種、ビーム強度の弱い安定線から遠く離れた原子核にも適用可能という長所があります。しかしながら、このように得られた断面積は全反応断面積とは異なる量です。これは入射核種の変化をもたらさない非弾性散乱や、標的核のみを励起あるいは破砕する反応を「非反応」事象として数えてしまうからです。このような断面積は相互作用断面積と呼ばれ、上に挙げた非弾性散乱過程が「反応」に含まれていないため、一般に全反応断面積より小さくなります。ただし、高エネルギーでは核種変化を伴う反応過程が主となるので、相互作用断面積は全反応断面積の良い近似となります。また、中性子（陽子）過剰原子核では、束縛する励起状態の数が安定原子核に比べて少ないので、相互作用断面積と全反応断面積の差はさらに小さくなります。

類似の観測量である荷電変化断面積についても最近盛んに研究がなされています。相互作用断面積が核種が変化した粒子を数えるのに対して、荷電変化断面積は電荷が変化した粒子のみ「反応」事象として数えることで測定されます。高エネルギーの荷電変化過程が入射原子核の陽子の直接剥離過程であるならば、全反応断面積が核半径を反映するように、荷電変化断面積は陽子分布半径を直接表す観測量となり得ます。これは相互作用断面積と同様の設定で測定が可能のため、不安定原子核の陽子分布半径を決定する方法として注目を集めています。

さて、谷畑らの相互作用断面積から導かれたリチウム11の巨大な核半径 [1] は大きな驚きをもって迎えられ、ハロー構造の探索及びその形成機構の解明は現在もなお不安定原子核物理の中心課題の一つとなっています。反応断面積による原子核の半径研究は広がりを見せており、ハロー構造のみならず、原子核の変形の情報を得るためにも有用であることがわかってきました。原子核の波動関数が変形すると、様々な方向の波動関数の重ね合わせになります。そのような場合、球形の原子核に

比べ表面がぼやけ、結果として半径が大きくなります。実際に原子核の四重極変形度と核半径が強く関わっていることが、微視的な構造・反応計算で得られた全反応断面積と実験データとの良い一致によって示されています [2]。現在炭素標的による不安定原子核の全反応及び相互作用断面積測定はマグネシウム同位体まで到達しています [3]。その測定精度は1%以下となっており、不安定核の核半径についてかなり正確な情報が得られるようになってきました。

全反応 (相互作用) 及び荷電変化断面積は中性子・陽子分布半径の差、すなわち中性子スキン厚の決定に大きな進展をもたらす可能性があります。不安定原子核における中性子スキン厚の存在はナトリウム同位体の相互作用断面積の系統的測定によって明らかにされました [4]。近年有限核の情報を基にした核物質の物性研究が盛んに行われ、中性子スキン厚の精度の良い決定は非対称核物質の性質に制限をかける上で重要であると言われていています [5]。伝統的な電子散乱による原子核荷電半径の導出は原子核の密度の飽和性に代表される重要な性質を明らかにしましたが、標的核が長寿命である必要があるため、不安定原子核に適用することは困難です。同位体シフト法は不安定核の陽子分布半径を決める上で強力な方法ですが、限定された原子核にのみしか適用できません。逆運動学による陽子弾性散乱を用いたスキン厚を測る試みも行われていますが、こちらもまた測定可能な原子核が限られているのが現状です。そのような状況の中で相互作用断面積、荷電変化断面積による半径研究は、ビーム強度の弱い不安定原子核に対しても測定が可能という大きな利点があります。最近、陽子標的を用いた全反応断面積の入射エネルギー依存性により陽子・中性子分布半径を決める方法が提案されました [6]。特に軽い原子核において、荷電変化断面積測定による陽子分布半径の研究が精力的に行われており、それらの中性子スキン厚や、高エネルギーの荷電変化反応機構についての理解が深まりつつあります [7]。

将来不安定核に対する電子散乱が可能になる時が来ると思いますが、現在のところ広い質量領域で測定を行うことができる全反応、相互作用、荷電変化断面積による原子核半径研究は最も現実的かつ有望な方法です。不安定核ビーム施設の高度化や測定器、反応標的の発展によって測定対象の原子核の数が格段に増えてきています。理論模型の進展も著しく、グラウバー模型や畳み込み模型による核半径研究が盛んに行われています。それらは後から調整するパラメータなしで最新の実験データを再現し、未知の不安定核の断面積の予言が行える精度に達しています [2]。測定はマグネシウム同位体を超え、今後さらに重い原子核領域に向かって進んで行くことと思います。未知の原子核の「大きさ」から得られる新たな情報が楽しみです。不安定原子核の陽子・中性子分布半径が精度良く決まることにより、核構造あるいは核物性に関するより深い理解が得られることを期待しています。

- [1] I. Tanihata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**, 2676 (1985).
- [2] K. Minomo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 052503 (2012); W. Horiuchi *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 024614 (2012); S. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 044610 (2014).
- [3] M. Takechi *et al.*, Phys. Rev. C **90**, 061305(R) (2014).
- [4] T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3241 (1995).
- [5] 例えば L. W. Chen *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 024321 (2010).
- [6] W. Horiuchi *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 011601(R) (2014); *ibid* **93**, 044611 (2016).
- [7] T. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 032502 (2011); A. Estradé *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 132501 (2014); S. Terashima *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 101D02 (2014); Y. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. C **94**, 011602(R) (2016).