



重イオンサブバリアー核融合反応 (Heavy-ion subbarrier fusion reaction)

萩野 浩一 (東北大学大学院理学研究科物理学専攻)

原子核は量子力学の教科書に見られる様々な事項が具体的な物理現象として現れる興味深い量子多体系です。ガモフが1928年に逸早く量子力学を原子核の α 崩壊に適用し、量子トンネル効果で崩壊半減期の系統性をうまく説明したことはよく知られた事実です。これが量子力学の成功の有力な証拠の一つとなったことは言うまでもありません。その他にも、原子核反応における共鳴散乱、同種粒子の反応であるモットー散乱、電磁遷移における角運動量の合成(選択則)、調和振動子ポテンシャルの準位(殻模型)、など枚挙にいとまがありません。

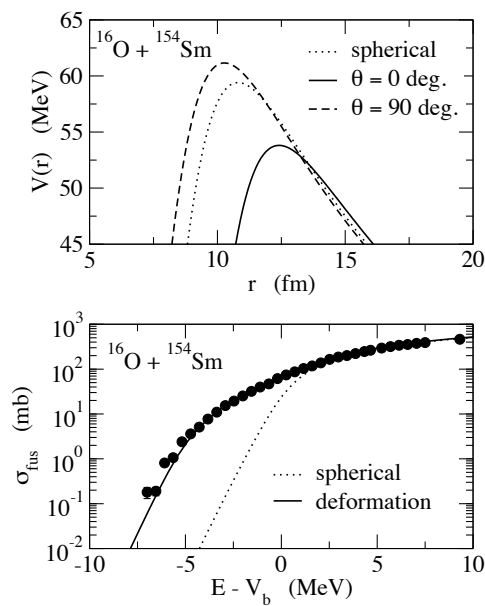


図1: $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反応におけるポテンシャル障壁(上)と核融合反応断面積(下)。核融合反応断面積は、クーロン障壁の高さ V_b から測ったエネルギーの関数としてプロットしてある。下図において、点線は ^{154}Sm の励起を考慮しない場合、実線は回転励起を考えた場合の計算結果。実験データは文献 [3] より。

$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 反応や $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反応に代表される重イオン核融合反応も、原子核物理における量子力学現象の典型的な例です。2つの原子核の間には、クーロン斥力と引力である強い相互作用の打ち消しあいのためクーロン障壁とよばれるポテンシャル障壁が存在します(図1上)。従って、入射エネルギーが障壁の高さより小さい場合は、核融合反応は量子トンネル現象で起こります。天体中での核融合反応も同様です。1970年代後半にクーロン障壁以下の入射エネルギーにおける重イオン核融合反応の実験ができるようになり、原子核の内部構造を考慮しない計算に比べて核融合反応断面積が著しく増大することが明らかになりました(図1下)。内部構造を考慮しない計算は、クーロン障壁より大きいエネルギーでの核融合反応断面積を再現していたので、このことは当時、大きな驚きでした。その後の研究により、クーロン障壁以下のエネルギーにおける核融合反応断面積の増幅現象は、原子核の内部励起を考慮することによって説明できることが明らかになりました [1,2]。これは、「環境」(原子核の内部構造)がトンネル効果の確率を増大させる好例と言えると思います。

原子核の内部励起が核融合反応断面積を増幅させることは、変形核の回転励起を考えると容易に理解することができます。この場合、良い近似で反応中に変形核の方向が変わらないと考えることができます。すると、2つの原子核の間のポテンシャルは変形核がどちらの方向を向いているかによって変化します。 ^{154}Sm のように軸対称プロレート

変形をしている場合、対称軸の向きが入射核の入射の方向と一致するとポテンシャル障壁は下がり、垂直方向を向いていると障壁が上がります（図1上）。核融合反応断面積は対称軸の方向に関して平均することによって求められますが、トンネル効果によって核融合が起こる場合、障壁が下がった方向の寄与がトンネル効果の確率に指数関数的に影響を及ぼし、断面積が増大することになります。

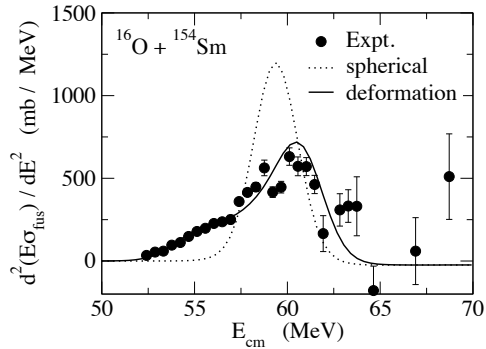


図2: $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反応における核融合障壁分布。図1上に示した実線と破線の間で障壁の高さが分布している。

原子核の内部励起を考慮して核融合反応断面積を量子力学的に求める方法が結合チャンネル法です。これは、2つの原子核の相対運動と原子核の内部自由度の結合を取り入れて量子散乱問題を解く方法です。結合が弱ければ摂動論（歪曲波ボルン近似：DWBA）を用いて断面積を求めることができますが、低エネルギー重イオン反応では結合の効果は強く、全てのオーダーを含む直接的な数値計算が必要となっています。1990年代になり、核融合反応断面積の測定精度が一桁上がるとともに、核融合反応断面積のエネルギー依存性を断面積のエネルギー微分をとることによって調べるということが流行します（図2）。いわゆる障壁分布の方法です。チャンネル結合の効果の一つの表現は、チャンネルごとに（正確には結合ハミルトニアンを対角化する固有チャンネルごとに）複数のポテンシャル障壁が存在し、それらが適当な重みで分布する、というものです。核融合反応断面積のエネルギーによる2階微分は、これらの障壁の高さの分布を与えるもので、反応のダイナミクスをわかりやすい形で見ることができます。この方法は様々な系に適用され、また、重イオン準弾性散乱に対しても同様の解析が行われています。これらの研究成果はレビュー論文 [1] にまとめられています。

重イオン核融合反応における最近の話題の一つは、極低エネルギー領域における核融合反応断面積の減少現象です。図1に示したように0.1 mb程度までの大きさの核融合反応断面積は結合チャンネル計算で説明することができています。ところが、入射エネルギーが更になくなり断面積が数10から数100 μb 程度になると、核融合反応断面積の実験データが結合チャンネル計算に比べて大きく減少することが明らかになってきました [4,5]。エネルギーが低くなり、トンネル領域において2つの原子核が接触をはじめることが核融合反応断面積の減少と何らかの関係を持つことがわかってきましたが [6]、減少のメカニズムは完全に明らかになっていません。2つの原子核が接触することにより一粒子状態の状態密度が急激に増大し、摩擦を生じさせていることが予想されますが、この現象を理解するためには、摩擦の量子論を進展させる必要があります。また、急激に増大する一粒子状態の自由度を環境ととらえ、環境との結合により量子デコヒーレンス現象が起きていると主張しているグループもあります。量子情報理論、非平衡系の量子論、超重核の物理、天体核反応などとも関連をもつ課題であり、今後の発展が大いに期待されています。

重イオン核融合反応における最近の話題の一つは、極低エネルギー領域における核融合反応断面積の減少現象です。図1に示したように0.1 mb程度までの大きさの核融合反応断面積は結合チャンネル計算で説明することができています。ところが、入射エネルギーが更になくなり断面積が数10から数100 μb 程度になると、核融合反応断面積の実験データが結合チャンネル計算に比べて大きく減少することが明らかになってきました [4,5]。エネルギーが低くなり、トンネル領域において2つの原子核が接触をはじめることが核融合反応断面積の減少と何らかの関係を持つことがわかってきましたが [6]、減少のメカニズムは完全に明らかになっていません。2つの原子核が接触することにより一粒子状態の状態密度が急激に増大し、摩擦を生じさせていることが予想されますが、この現象を理解するためには、摩擦の量子論を進展させる必要があります。また、急激に増大する一粒子状態の自由度を環境ととらえ、環境との結合により量子デコヒーレンス現象が起きていると主張しているグループもあります。量子情報理論、非平衡系の量子論、超重核の物理、天体核反応などとも関連をもつ課題であり、今後の発展が大いに期待されています。

- [1] M. Dasgupta *et al.*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **48**, 401(1998).
- [2] A.B. Balantekin and N. Takigawa, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 77 (1998).
- [3] J.R. Leigh *et al.*, *Phys. Rev. C* **52**, 3151(1995).
- [4] C.L. Jiang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 052701 (2002).
- [5] A.M. Stefanini *et al.*, *Phys. Rev. C* **82**, 014614 (2010).
- [6] T. Ichikawa, K. Hagino, and A. Iwamoto, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 202701 (2009).