

多ハドロン系でのトンネル現象

ハドロン輸送研究グループ ■ 岩 本 昭 ■

Tunneling Phenomena in Many-Hadron System

Akira IWAMOTO

Research Group for Hadron Transport Theory

Tunneling phenomena in many-hadron system are investigated in connection with spontaneous fission and subbarrier fusion. An attempt to describe these phenomena based on the many-body theory is presented.

1. 多ハドロン系でのトンネル現象

原子核は陽子、中性子、パイオン、等の強い相互作用をする粒子より構成され、これら粒子を総称してハドロンと言う。この系でのトンネル過程を概観することから始めよう。

トンネル現象は量子力学特有の、且つ分かりやすい事象として有名であるが、どの程度に理解されているであろうか？確かに1次元問題ないしは1次元問題に帰着できる系での障壁透過の問題は量子力学を学ぶ道程で何度かやらされる為、物理や化学を専攻した人にはかなりなじみある問題である。直感的にも理解しようと思うと、半古典理論の手法としてWKB法やインスタントン法が有効である。これらは基本的にはシュレディンガー方程式を解くときに、 \hbar の高次の項を落として低次の項のみで解くことに対応している。しかしながら、この近似により計算される透過確率そのものは \hbar による展開が出来ない形で与えられるので、効果そのものは純粋に量子力学的な効果である。

この様な1次元模型による計算は、有名なガモフによる原子核の α 崩壊の理論としてその最も初期の応用がなされ、現実世界でトンネル現象が重要な役割を果たしている事を明らかにした。更にその後、自発核分

裂が発見されるとニールス・ボーアはこれがトンネル現象であるといち早く指摘して、核分裂の理論的研究の基礎を確立した。しかしながら実際の崩壊寿命を精度良く計算するのは現在でも非常に難しく、特に核分裂では以下に述べるように多次元性を取り入れた計算が必要となる。

原子核反応としてのトンネル効果はそれ以外にも見つかっている。図1にその代表的な反応と、その反応でのポテンシャル障壁を示した。前述した α 崩壊、核分裂以外にサブバリアー核融合と呼ばれる現象がある。これは2つの重い原子核を衝突させ融合させる反応で、例えば2つのニッケル原子核を融合させバリウム原子核を作る反応を考えると、2つの電荷を持つニッケル同士に働くクーロン斥力と核力による引力の和として、高さが約90MeV程のポテンシャル障壁を生じる。入射エネルギーがポテンシャル障壁以下であってもトンネル効果により核融合が生じ、これをサブバリアー核融合と呼ぶ。しかもそれが図1で示すような単純な1次元のトンネル効果の計算で予測されているものよりはるかに大きな確率で融合が生じることが実験的に明らかになった。これの意味するところは、1次元模型に帰着できない多体問題としてのトンネル現象が生じていることを意味する。もう一つの例は、重

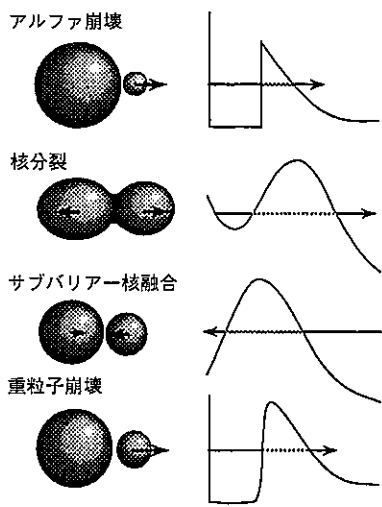


図1 多ハドロン系でのトンネル現象

粒子崩壊と呼ばれる現象である。これは α 崩壊と同じ種類の現象と考えられるが放出される粒子が ^{14}C や ^{32}Si と言った重粒子である。 α 崩壊より問題は更に複雑であり、ここでも矢張り多次元模型の導入が必要とされる。

2. トンネル現象の多次元模型—核分裂とサブバリアー核融合の場合

核分裂の場合、幾つかの変形パラメータを先ず導入して多次元のポテンシャルを計算し、更に質量テンソルを計算する。これらの計算にも色々な問題があるが、その点はここでは触れずにおく。これらの計算が終わった後で最も起こりやすい(古典)トンネル軌道を決定する。トンネル領域では運動量は虚数になるが、その絶対値をとり古典的な作用積分を計算してこの作用積分を極小化する軌道が最も起こりやすいトンネル経路に対応する。これが決定されると核分裂寿命の計算が半古典的に出来る。この場合には多次元性は原子核の形を表す変形パラメータを多数導入することである。実際の計算には、作用極小の経路を決定する代わりに、谷筋の路を核分裂経路として選ぶことがよく行われるが、一般的には正当化出来ない。

図2は、作用極小の半古典軌道を具体的に求める手法を概念的に示したものである。ここでは2次元のポテンシャル表面を考え、図の上部(上図)に示したようなエネルギー最低状態としての基底状態と、単純な鞍部点よりなるポテンシャルを考える。この系で基底状態からのトンネル過程による崩壊経路の決定は、先ず

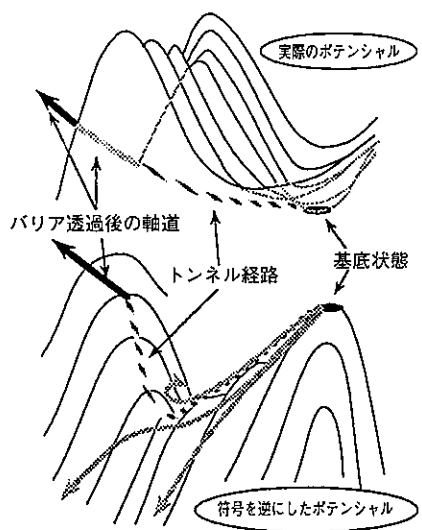


図2 2次元空間で作用極小のトンネル軌道を求める方法

上図のポテンシャル面を逆さまにしたポテンシャル面である下図を考えここで古典力学に従う運動を考える。ここでは基底状態は山の頂上に対応して、一方鞍部点は90度向きを変えた鞍部点となる。基底状態に対応する山の頂上へ物体を置くと、そこは準安定状態であるのでいつまでもそこに留まるが、ほんの少しでも動かすと山の頂上から下へ向かって滑り落ちる(図で薄矢印付きの線で示した軌道)。この動かす方向を微調整することにより、図で縞模様の線で示した軌道、即ち頂上から出発して左右どちらの谷にも落ちずに、綱渡りのようにして対面する斜面を登り、あるところで完全に停止してその後はもと来た路を引き返す周期軌道がある。この軌道が求める半古典軌道で、核分裂はこの軌道を辿り引き返し点で正エネルギー状態として外部へ出て行く(図の矢印付き実線)。この例のように、トンネル経路はポテンシャル表面の符号を逆にした系での古典的運動方程式と密接な関係があり、この操作が時間を実時間から虚数時間に変えることと同等であるため、虚時間法と呼んだりインスタントン法と呼んだりする。この手法で ^{238}U の自発核分裂を計算した報告がある¹⁾。

サブバリアー核融合の場合には、多次元性としては2核の相対運動以外に、入射核や標的核の回転や振動状態をチャンネルカップリングと呼ばれる手法で計算に取り入れることが良く用いられている²⁾。大きく変形した重い標的核の回転準位の励起の場合には、この手法は変形した標的核と入射核の歪曲されたポテンシャル表面のトンネル確率を、各部分について計算してそれを積分したものとして計算できる。例えば、図3

に示すのは $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反応の場合のポテンシャル表面の値を等高線で示したものである。この場合には2次元のポテンシャル表面が計算されており、色々な方向から核融合が起きると考え、方向により高さが変化するポテンシャル障壁のトンネル確率を計算して、それを面積要素を掛けて積分することにより核融合確率を計算する。この手法で変形核の核融合断面積を計算した報告がある⁹⁾。この場合には、多次元性は標的核の変形の自由度を取り入れることに相当して、これは又標的核の回転準位の励起を自由度として取り入れることと同等である。

3. A-体問題としてのトンネル現象の記述は可能であるか？

前節で、多自由度空間でのトンネル過程の例を核分裂とサブバリアー核融合について示した。これらの手法は、大事な自由度を現象論的に数を限って導入するというやり方であり、物理の常套手段である。しかし一方、もっと一般的に問題を解決する可能性は無いだろうか？原子核がA個の核子から出来ているとして、A-体問題として問題を解決できないだろうか？実際、正エネルギー領域ではA-体問題としての取り扱いが平均場近似を用いたり、これに散乱項をつけ加えることにより行われてきた。例えば時間依存ハートレーフォック (TDHF) 法やその古典近似であるヴラソフ法、この後者に散乱項を加えたBUU法、その親戚筋に当たるQMD法やAMD法がA-体問題として開発され、核反応計算に用いられてきた。ではトンネル過程ではどうか？

この方向での先駆的な研究は虚時間のTDHF法を用

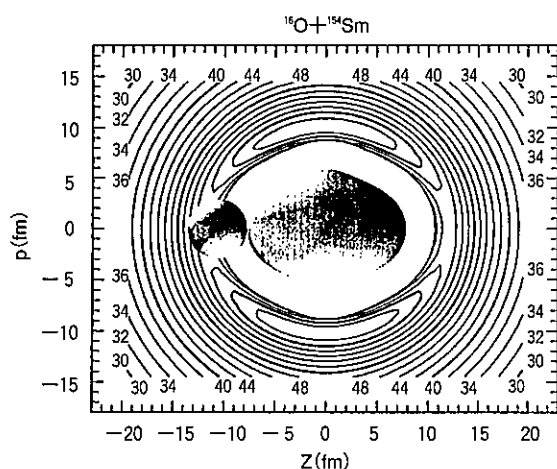


図3 変形した標的核と丸い入射核との間のポテンシャル平面の計算

いた研究がJ. Negele¹⁰⁾により始まったが、実際に核分裂を起こすような重い核への適用は大変困難で、その後の発展はない。我々はこの方向での研究を進展させるため、TDHF法の代わりにその古典近似であるヴラソフ法を用いる研究を開始して、最近幾つかの具体的な結果を得た。我々の方法では、量子力学的な1粒子波動関数の代わりに、1体分布関数を解く為に用いる試験粒子の運動の時間発展を追う。トンネル領域を定義する為の集団変数を適切に定義して、この領域に入ると試験粒子の運動が前述した虚時間での運動に対応するように特別な条件を課す。詳細は文献⁹⁾を参照していただくとして、図4に示すのはこの手法により計算した ^{226}Ra の自発核分裂の(虚)時間発展を示したものである。この様に核分裂のトンネル過程で起きる原子核の時間発展の様子が、A-体問題として解くことが出来る。

ここで述べた方法は核分裂を定量的に計算するにはまだ不十分であり、現在模型の改善に努めている。前述したサブバリアー核融合に対しては現在の形の模型でもかなりはっきりした結論が出せる。最近Ni+Niの核融合に適用したところ⁹⁾意外にも2核の間での粒子交換の効果が大きく、それにより核-核間ポテンシャルが入射エネルギーに独特の形で依存することを見いだした。

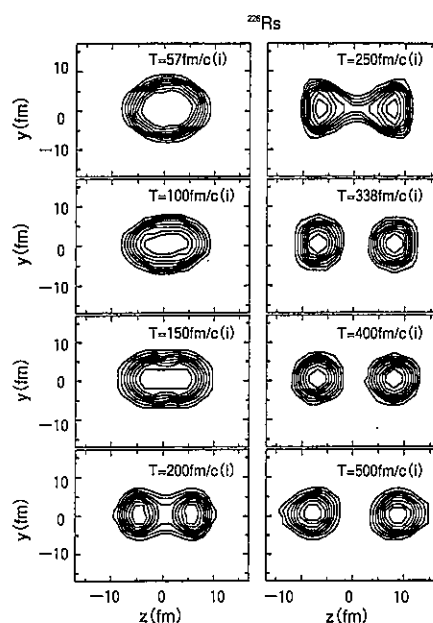


図4 ^{226}Ra の自発核分裂の(虚)時間発展を示す等密度表面。y軸とz軸の単位はフェムトメートル (10^{-15}m)で、核分裂は左上の状態から右下へと進行する。

参考文献

- 1) A. Iwamoto, Z. Phys. A349(1994)265.
- 2) M. Berckeman, Rep. Prog. Phys. 51(1988) 1047.
- 3) A. Iwamoto and P.Möller, Nucl. Phys. A 605 (1996)334.
- 4) J. Negele, Physics Today 38(1985)24.
- 5) A. Bonasera and A. Iwamoto. Phys. Rev. Lett. 78(1997)187 ; *ibid.* 79(1997)3540.
- 6) V. N. Kondratyev and A. Iwamoto. preprint (1997), submitted to Phys. Lett. B.