



会議のトピックス (II)

RIPL-4 IAEA Coordinated Research Project

LANL

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

1. はじめに

IAEA Nuclear Data Section が整備している Reference Input Parameter Library (RIPL) は主に核反応模型計算に使われる種々の入力データをライブラリとして提供するものであり、現在第3版までがリリースされている。原子核質量、励起準位(核構造)、平均共鳴パラメータ、光学ポテンシャル、準位密度、 γ 線強度関数、それに核分裂に関する数値データがライブラリに含まれ、他の研究や評価で得られたデータを広く網羅している。準位密度のように計算モデルの違いから何種類ものセットが得られるものについては、RIPLとして公開するものをいくつか選択し、どれを使うかは利用者の判断に委ねられる。

RIPLの第4版作成がこのプロジェクトの目的で、この版では特に核分裂に関連した入力データの整備に重点を置くことになった。これはある意味非常に困難な取り組みで、核分裂に関する核データの模型計算は現在でも大きな誤差を伴う。核データ分野で現在広く使われている統計模型計算コード — CCONE, TALYS, EMPIRE, CoH₃ — の相互比較を過去に行ったことがあるが、全く同じ入力パラメータを用いたとしても、表からは見えないコード間の差異によって核分裂断面積の計算結果は異なってしまう。そのためRIPL会議にはこれらコードの開発者が欠かせない。

今回は2017年、2019年に続く3回目の会合であるが、2021年コロナ下でのオンライン会合も開催されたので実質的には4回目となり、参加者の研究進捗並びに最終報告論文の執筆計画が議題の中心であった。参加者は上記コード関連の研究者に加え、核分裂理論と光学模型の専門家が含まれる。ここでは核分裂に関連した議論について報告する。

2. 核分裂モデル

核分裂モデルパラメータを議論するとき問題になるのが、計算モデル依存性である。核分裂過程は今でも研究が盛んな分野であり、パラメータさえ用意しておけば必ず同じ結果が得られるという状況にはまだない。LANLのTalouとLLNLのVogtが近年の核分裂研究の現状をまとめた本[1]を出版しているので、モデルの詳細についてはそちらを参照してほしい。



図 1 春の Vienna International Centre

2.1 統計模型計算に含まれる核分裂モデル

核分裂断面積計算に最も標準的に使われてるモデルは、図 2 に示されるように 2 つの双曲線で表現された核分裂障壁をシステムが透過する確率を求めるものである。Class-I と書かれた通常の複合核状態から原子核を引き伸ばしていくには余分なエネルギーが必要であるが、複合核のエネルギーが十分高ければ V_A と V_B の障壁を乗り越えることができる。 C_A, C_B は幅のように表記しているが、実際は双曲線の曲率である。この 4 つが最も簡単なモデルで核分裂断面積を計算するための最低限のパラメータとなる。核分裂障壁の透過は WKB 近似によって解析的に求まるので、このモデルが広く利用されている。

V と C によって核分裂が起きうる最低のエネルギーが決まるが、トンネル効果によってさらに高いエネルギーの状態を透過する核分裂も起こる。これらは障壁上部の核構造から求められる。障壁の上に離散準位が並び、さらに高いエネルギー領域を透過していく過程は準位密度 ρ_A, ρ_B で考慮される。これらも核分裂断面積計算に大きく影響するが、非常に不確かな量でもある。一般にはこれら 2 つの障壁は独立したものとして取り扱われるが、Class-II と呼ばれる障壁間の谷に離散準位を仮定するモデルもある。

独立した障壁と考えると、 V_A に対する透過度 T_A と V_B に対する T_B は個別に計算される。実際に核分裂チャンネルへ流れていく強さとして、これら 2 つを

$$T_f = \frac{T_A T_B}{T_A + T_B} \quad (1)$$

と合成し、これが Hauser-Feshbach コードの中での実際の核分裂透過係数となる。

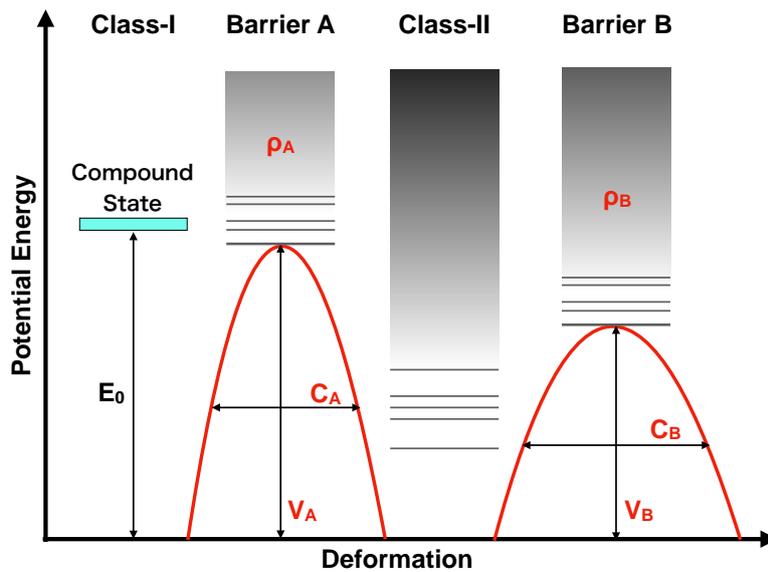


図2 原子核の変形に対する核分裂障壁の変化を2つの双曲線で近似したもの

2.2 核分裂の微視的モデル

簡単に言えば核分裂とは原子核が小さく留まろうとする性質に Coulomb 力が打ち勝つ現象である。これを量子力学的に捉えようとする研究が盛んであるが、RIPL-4 の会合では比較的良好に知られた2つのアプローチが議論された。Micro-Macro モデルは古典的な液滴模型に殻模型による量子力学的効果を加え、Hartree-Fock-Bogoliubov は全てのエネルギーを微視的に求める。具体的な特徴は全く異なるアプローチであるが、それぞれのモデルを用いて多くの原子核の核分裂障壁の高さと幅が求められ、RIPL ではこのデータを提供する。

これらの方法で求まるのは、原子核の種々の形状に対するエネルギーであり、ポテンシャルエネルギー面と呼ばれる、いわば山岳地帯の地形図である。例として Micro-Macro モデルの一つ FRLDM (Finite Range Liquid Drop Model) [2] で計算されたポテンシャルエネルギー面を図3に示す。原子核を引き伸ばしていくと、ある時点で左右対称に分かれたほうがエネルギー的に起こりやすくなるが見える。実際に核分裂過程がどの山道を進むのかは別の計算が必要であるが、図2の実線はその道筋(図3の矢印)の断面を見たものとなる。

RIPL-4 ではこの道筋も提供する予定であるが、それが実際に核分裂断面積計算に使えるかどうかは未知数である。図3ではポテンシャルエネルギー面を原子核の伸びと左右非対称の簡単な2次元平面で表しているが、実際には図示できない高次の原子核変形が存在する。一見滑らかに変化しているように見えるポテンシャルエネルギー面だが、高次変形を考慮すると数値的非連続が起こることが知られており、長年の課題となっている。

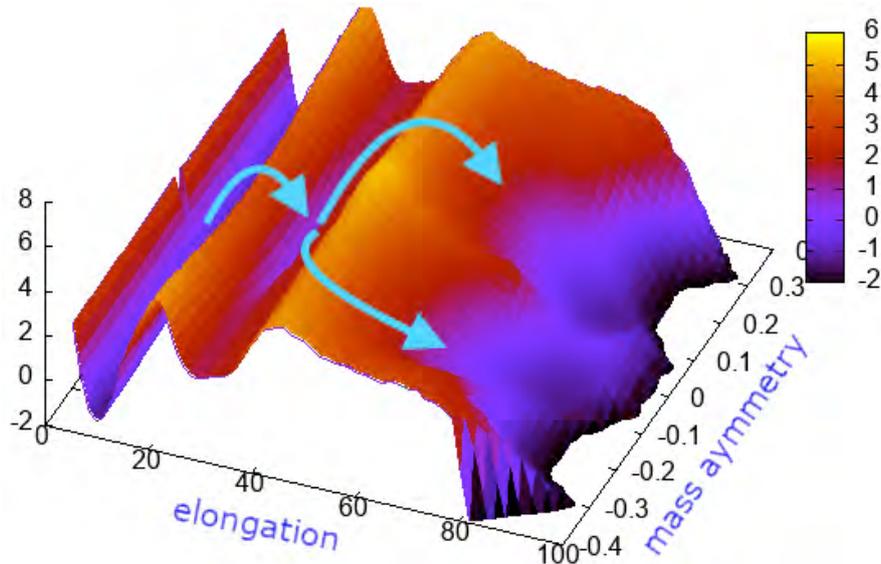


図3 ^{236}U のポテンシャルエネルギー面と核分裂の道筋

2.3 現象論的核分裂障壁

実験データから求められた核分裂障壁のデータも RIPL は提供するが、これには少々注意が必要である。例えば ^{238}U への中性子入射反応では、中性子エネルギーが 1.5 MeV くらいから核分裂断面積が急激に上昇し、システムのエネルギーが核分裂障壁を乗り越えたと分かる。中性子束縛エネルギーは 4.8 MeV なので障壁の高さは 6.3 MeV 程度と見積もることができる。しかしながらこの数値が図2の V_A や V_B に直接対応している訳では無い。1.5 MeV 中性子の場合、最も強く核反応に寄与しているのは p や f の奇パリティの波である。一方 ^{239}U の基底状態は $(1/2)^+$ の偶パリティなので、実線で示された双曲線より上部を通過していると考えられる。つまり実際の核分裂障壁は 6.3 MeV 以下の可能性が高い。

こういった選択則を考慮するには統計模型計算コードを用いて核分裂断面積を再現するパラメータを求める他はなく、結果的に得られたパラメータはモデル依存となってしまふ。計算コードによって数 100 keV から 1 MeV 程度の差が起こり得るが、核分裂障壁の誤差としてはかなり致命的なものである。

2.4 核分裂障壁透過

RIPL-4 のデータベース構築とは少々離れるが、ポテンシャルエネルギー面を実際の核分裂断面積計算に使えるかどうかは議論の一つであった。RIPL 参加者である S. Hilaire と筆者の間で Eq. (1) について数年議論してきた。もし複合核が十分高いエネルギーを持っているなら、両方の障壁は容易に超えられるので、透過係数は 1 と考えるのが自然である。一方個々の障壁を考えると、それぞれの透過度は $T_A = T_B = 1$ で、Eq. (1) から $T_f = 1/2$ となってしまふ。つまり原子核が一旦 Class-II に留まり、そこから半分が核分裂へ、残りは元の複合核へ戻ることを意味し、あまり直感的ではない。

2つの障壁をより合理的に繋ぐ、さらには双曲線ではなく任意のポテンシャルエネルギーの形状に対する核分裂透過係数を求める方法を Hilaire, Talou それに筆者で提案し [3], これを RIPL の会合で報告した。現状では次元計算であるが、多次元への拡張を行うことにより、微視的計算で得られるポテンシャルエネルギー面を用いた核分裂断面計算も可能になると考えている。

3. おわりに

冒頭で述べたように RIPL には種々のモデルパラメータが含まれる。離散準位データや平均共鳴パラメータなど IAEA 側で用意できるものもあるが、 γ 線強度関数や準位密度は独立した CRP の枠組みで整備されつつある。 γ 線強度関数は光核反応データライブラリ IAEA Photonuclear Data Library 2019 [4] 作成時に集められた巨大共鳴パラメータが追加され、準位密度については新しい CRP が開始される予定である。

ところで話は全く変わるが、出張時の隙間時間に、まだ一度も訪問したことがなかったウィーン中央墓地を観光してきた。墓地を観光とは少々不謹慎であるが、あの有名な Beethoven と Schubert が並んで埋葬され、さらには Brahms, Strauss 家, Lanner, Wolf, Suppe など名だたる音楽家が眠るこの墓地は、今では有名な観光地となっている。Beethoven と同じ場所に Mozart もいるようだが、彼の埋葬地は不明なので、この下には誰もいないはず。

Bortzmann の墓には有名な $S = k \log W$ が描かれ、Ligeti の墓はあまりにシンプルでなかなか見つけられずかなり彷徨した。最も Ligeti の墓参りをしようという奇特な人は少ないだろう。なかでも異彩を放っていたのは Schönberg のもので、これはもうモダンアートである。



図 4 ウィーン中央墓地に埋葬された Schönberg の墓

参考文献

- [1] P. Talou, and R. Vogt, “Nuclear Fission, Theories, Experiments and Applications,” Springer (2023).
- [2] P. Möller, J. R. Nix, W. D. Myer, W. J. Swiatecki, “Nuclear Ground-State Masses and Deformations,” *At. Data Nucl. Data Tables* **59**, 185 (1995).
- [3] T. Kawano, P. Talou, and S. Hilaire, “Solving the one-dimensional penetration problem for the fission channel in the statistical Hauser-Feshbach theory,” *Phys. Rev. C* **107**, 044610 (2024).
- [4] T. Kawano, et al., “IAEA Photonuclear Data Library 2019,” *Nuclear Data Sheets* **163**, 109 (2020).