

即発中性子スペクトルをめぐる二都物語 A Tale of Two Cities: Vienna and Los Alamos

近畿大学
大澤 孝明

ohsawa@ele.kindai.ac.jp

1. 2つの町での会合

2008年11月24～27日にウィーンのIAEA本部で「主要アクチノイド核の核分裂即発中性子スペクトルに関する諮問家会議」(Consultants' Meeting)が開催された。そのちょうど半年後の2009年5月27～30日に、ロスアラモスで「即発中性子スペクトルに関するミニワークショップ」が開かれた。

「核データニュース」の編集部からの要請は、後者の会合について紹介するということだったが、この2つの会合の内容は重複する部分と相補的な部分があるので、まとめて紹介することにする。なお、この2つの会合に両方とも出席したのはM. Chadwickと筆者の2人である。

2. ウィーン (IAEA/CM)

この会合はIAEA/NDSのRoberto Capote Noyの提唱により、Mark B. Chadwick (LANL, 米)、Eric Bauge (Bruyère-le-Châtel, 仏)、Stephan Oberstedt (IRMM, EU)、Alexander Vorobyev (Peterburg Nucl. Phys. Inst., ロシア)、Vladimir Maslov (JIPNR, ベラルーシ)、筆者(近大)の6名を招集して行われた。5日間にわたり核分裂即発中性子スペクトル(以下、PFNSと略記)の現状と問題点について議論し、勧告をまとめ、協力研究計画(CRP)をスタートさせることが目的である。

● 最初に、Mark ChadwickがLANLで開始されたPFNSの理論的・実験的研究の背景と計画について簡潔に報告した。近年行われた感度解析の結果から、PFNSが高速炉の炉心特性に従来考えられていた以上の影響をもつことがわかったことを指摘した。LANLで行われたJEZEBEL(Pu球)に対する感度解析によるとPFNSは k_{eff} に-0.3%～+0.4%の不確かさをもたらすという。日本の石川眞氏らの感度解析、OECD/NEA WPEC Subgroup26(革

新炉システムの核データニーズ、主査 M. Salvatores) においても、PFNS を含む核データの精度向上が今後の課題とされている。

● Eric Bauge はフランス・アメリカ共同で行われた U-235、U-238(n,xnf)の PFNS と平均エネルギー及び即発中性子数の入射エネルギー依存性の測定結果を紹介した (LANL/WNR 設備の FIGARO ビームラインを使用、中性子は TOF 法、検出器はシンチレーション・セル)。これは 200 MeV までの広範な入射中性子エネルギーに対する一貫した測定であるという意味で、貴重なデータである。特に、高エネルギーでは pre-fission neutrons や multiple-chance fission neutrons が多くなるのでその効果を検証するために役立つであろう (ついでながら、Nikolai V. Kornilov はこのデータにかみついている。興味のある方は次を参照 : N.V. Kornilov *et al.* Phys. Rev. Lett. **101**, 039201 (2008)。反論は Ethvignot *et al. ibid.* **101**, 039202 (2008))。

E. Bauge はまた、H. Goutte らによって行われた Hartree-Fock-Bogoliubov 計算に基づく原子核変形ポテンシャル面の計算結果を示した。パソコン画面上に 3D カラー動画表示された曲面は、マルチモード核分裂モデルでいう少数の「モード (変形経路)」の存在を裏付けているように見えた (U. Brosa の変形ポテンシャル計算はラフすぎるとの批判は以前からあったが、結果的には HFB 計算と大きくは異なるようだ)。なお、この 3D 動画グラフィックスは今のところ非公開だという。

● S. Oberstedt は、天文観測のため望遠鏡を携えて某国へ行ってしまった F.-J. Hambsch に代わって、Geel で行われている核分裂関係の実験を紹介し、また Hambsch、Kornilov らがブダペスト研究炉を用いておこなった PFNS の結果を紹介した。結果を淡々と報告したのみで特に強い主張はしなかった。

● 筆者は、まず、JENDL Actinoid ファイル 2008 (JENDL/AC-2008) の評価方法と結果を紹介した。すなわち、(n,n'f)反応の閾値以下では、筆者が「マルチモード Madland-Nix モデル」で計算し、それ以上のエネルギー領域ではマルチモード解析が十分に行われていないので、岩本修氏 (JAEA) が開発したコード CCONE の計算値が採用されている。CCONE コードの概要については、事前に岩本氏からいただいた情報に基づいて紹介した。

筆者が提唱する「マルチモード Madland-Nix モデル」は、Madland-Nix (以下 MN と略記) の直角三角形型核温度分布モデルを基本としつつ、それに次のような改良を加えたものである。

- ① 核がどのような変形経路 (核分裂モード) をたどるかによって、Q 値もエネルギー分配 (全運動エネルギーと内部励起エネルギーの間の分配) も大きく異なるので、PFNS はモード別に計算し、それを合成する方が核分裂過程を正確に反映できる。
- ② 原型 MN モデルでは、準位密度は $a=A/C$ 型の簡便な式を採用し、定数 $C (=8\sim 11)$ は測定データに合うように経験的に決める、とされていた。しかし、核分裂片は

シェル (N=50, 82; Z=50) 領域にまたがって存在しているので、準位密度にもシェル効果が敏感に反映する。また、*ad hoc* に調整できるパラメータをできるだけ減らすという意味でも、Ignatyuk の超流動モデルの計算値を採用する方が合理的である。

- ③ 原型 MN モデルでは、軽分裂片と重分裂片から同数の中性子が放出されると暗黙に仮定されているが、実際には大きく異なる。2つの分裂片からの放出中性子スペクトルが同じなら、これは意味のないことになるが、実際にはスペクトルには大きな違いがあるので、これは結果に影響する。
- ④ 核の断裂 (scission) の瞬間までは2つの分裂片はつながっているのだから、2つの分裂片の核温度は等しい、と考えるのが原型 MN モデル。しかし、一方の分裂片がシェル領域にある場合、2つの分裂片の変形度も stiffness も異なるから、中性子放出の時点での励起エネルギーも準位密度パラメータも異なる、すなわち核温度も異なる考える方が自然である。

以上の方法に基づき計算したスペクトルの結果を他と比較して示した。

● V. Maslov の講演ははじめから戦闘モードだった。ENDF/B-VII や JENDL/AC-2008 がいかにダメかを示してやると切り出し、自分の評価値と実験値がいかによく一致しているかを示すグラフを次々に出した。そして、筆者を指さして「無意味な研究は直ちにやめよ」と叫びだす始末。それにしても、奇妙なことに自分の (すばらしい) 評価計算方法にはいっさい言及しなかった。Capote からもらった発表済み論文のコピーを見て初めて分かった。Maslov の評価法とは、彼のオリジナルではなく、Kornilov らの経験式そのものだった。

Many-Source-Term Formula (N.V. Kornilov et al.)

$$\begin{aligned}
 N(E) &= (1-\alpha)^{\frac{1}{2}} [W_{AL}(E) + W_{AH}(E)] \\
 &+ \frac{\alpha}{\nu} E \left\{ \frac{\zeta}{T_1^2} \exp\left(-\frac{E}{T_1}\right) + \frac{1-\zeta}{T_2^2} \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right) \right\} \\
 &+ \alpha(\nu-1)W_{A-1}(E)/\nu
 \end{aligned}$$

$\alpha=0.25$ Watt spec. from LF after fission of CN A Watt spec. from HF after fission of CN A
 Low-energy scission neutrons ($T_1=0.4\text{MeV}$) High-energy scission neutrons ($T_2=1.5\text{MeV}$) $\langle E_{SCN} \rangle = 2.08 \text{ MeV}$
 Neutrons from accelerated fragments after fission of the nucleus A-1 formed after emission of one scission neutron

図 1. Kornilov-Maslov の PFNS 経験式

彼らの経験式は、図 1 に示すように、2つの分裂片から放出される中性子スペクトルを Watt 型スペクトル W_{AL} 、 W_{AH} で表し、それに Maxwell 型の scission neutron 項を 2 つ付け加える。さらに、scission neutron を放出した後の分裂片からの放出中性子項を付け加えるというものである。Kornilov らは、この式を入手可能なさまざまな核種の測定データにフィットしてパラメータを決めた（主に Physics of Atomic Nuclei というロシア語からの翻訳誌に出された過去の論文を調べてみると、このパラメータ・フィッティングにはいくつかのバージョンがあるらしい。当初は Kornilov 名義で、後になって Kornilov-Maslov の共同名義で発表されている）。

これだけいろいろなパラメータがあればどんなスペクトルでも再現できるだろうと思う。Watt 型（1952 年）など関数型が固定された解析表式（やその組み合わせ）自体が一時代以上昔のものである。かつては Weisskopf-Ewing の式さえ「あんなものはだめだ」と断言していたその人が、平気で Watt の式を使っていることにビックリである。

Scission neutron の存在は物理的には興味深い問題だが、筆者の知る限り、その割合は C. Wagemans によると $(1.1 \pm 0.3)\%$ 、O.I. Batenkov, M.V. Blinov らによると 3%（いずれも Cf-252(sf)の場合）程度であって、25%などというデータは聞いたことがない。その上、scission neutron に高・低エネルギー（ $T=0.5$ MeV, 1.5 MeV）の 2 成分があるという話は青天の霹靂である。その物理的根拠を聞いても明確な回答はなかった。

昔からそうだが、この人は自分の手の内は決して見せようとしない。比較に用いた測定データの規格化法についても何も言わない。核データ計算に使っているコードの素性も不明である（あれは Uhl と Strohmaier の STAPRE コードに手を加えたものらしい、と間接的に聞いたことはある）。いつも自分が正しく、他人は間違っている、実験値とずれていれば実験値が間違っていると主張し、質問しても別の話にすり替えたりするばかりで、学術的な議論はほとんど成立しない。PFNS の問題についても、以前は「高エネルギー成分が重要」と主張していたはずなのに、今回は MeV 領域の成分にはいっさい触れず、もっぱら 1 MeV 以下の「低エネルギー成分を再現できない MN モデルはダメだ」と繰り返していた。

実は、JENDL-3.3 のマイナーアクチノイド (MA) 核種の PFNS には Maslov の評価値が大量に入っている。菊池康之氏がセンター長の頃に、ISTC 資金付きで Maslov に委託した評価結果がそのまま採用されているためである。報告書を見れば分かるように、この評価計算は、現在 Maslov が批判してやまない、最も簡単な原型 MN モデル計算値（に pre-fission 成分を加えたもの）である。筆者の PHYSOR2008 発表論文でも指摘した通り、JENDL-3.3 の MA 核種の PFNS には奇妙なギザギザがあったり、pre-fission neutron 成分が核分裂断面積から推定されるよりも強すぎる、など不可思議な点がみられる。この点について質問したところ、「あれは部下がやった計算だから自分には責任がない」という拍子抜けするような答えが返ってきた。

- さて、この IAEA 諮問委員会の審議の結果は INDC(NDS)-0541 (2009)として出版されており、IAEA の HP からダウンロードできるので、興味のある方はごらんいただきたい（この草案のまとめ役の Chadwick が席を外している間に、Maslov が強引に原稿に書き込んだ文章や、挿入した図が多数入っている。どれがそれかを見分けるのも一興）。

3. ロスアラモス (Mini-Workshop)

2009 年 5 月 27～30 日に、Los Alamos でミニワークショップが開かれた。LANL 外からは、ヨーロッパから F.-J. Hamsch、日本から筆者が参加し、それ以外は LANL の理論部門と陽子加速器 (LANSCE) 部門のスタッフである。Dave Madland、Peter Möller らの大御所、T. Kawano、P. Talou、M.B. Chadwick の働き盛り三羽鳥（失礼）と話げたのは貴重であった。

- Patrick Talou (LANL) は、PFNS を原子核が鞍部点 (saddle) から断裂点 (scission) に至る最も drastic な変化を経験する際の情報を含んでいるとの観点から、多角的な関心を寄せている。PFNS のみならず、中性子の個数分布、平均個数の入射エネルギー依存性、核分裂片との角度相関、断裂の時点における自由エネルギーの、内部エネルギーと運動エネルギーへの分配、など興味深い課題を列挙していた。

Talou が、Kawano、Chadwick らと共におこなった試みに、核分裂片崩壊過程のモンテカルロ・シミュレーションがある。さまざまな核分裂片ペアの崩壊過程をシミュレートし、放出される中性子の個数分布とエネルギー分布を計算し、分裂片全運動エネルギーとの相関を調べている。この種の計算で、核分裂片の初期励起エネルギーを推定する際に、「2 つの分裂片の核温度は等しい」という原型 MN モデルの仮説を使用した場合と、筆者が 1991 年に小さな論文で提唱した非等温性を導入し、核分裂モードごとに非等温性を変化させた場合を比較すると、後者の方が測定値との一致が少し改善されたという。モンテカルロ法は励起核の崩壊過程の物理を探究する上で、有効な方法であると思う。

- Franz-Josef Hamsch は、ハンガリーのブダペスト研究炉 (10 MW) で Kornilov らとともに実施した冷中性子 (100 K) による U-235 の PFNS と、7 MV-Van de Graaf を使った 0.5 MeV 中性子による PFNS について報告した。測定法はいずれも NE213 に等価な液体シンチレータを用いた TOF 法である。測定例は多数あるが、一例を図 2 に示す。

彼の結論は、(1)今回の測定データは従来の測定データ（この場合は Yufeng *et al.*）とよく一致する、(2)新データは、ENDF/B-VII 評価値とは一致しない（ここでいう ENDF/B-VII 評価値とは、Madland が新しい入力パラメータ・セットを用いて原型 MN モデルで計算したデータが積分データとの一致が良くなかったため、ENDF/B-VI に戻したものだという）。MN モデルは、1 MeV 以下で過小評価する傾向があると言う。

1 MeV 以下の低エネルギー端のデータの信頼度については議論が多い。図 3 に示すよ

うに NE213 の検出効率がこの領域で急速に低下し、かつ、誤差が大きくなること、検出器による散乱中性子の影響を受けやすい、などの問題点があるからである。従来広いエネルギー領域をカバーする測定データとして P.I. Johansson, B. Holmqvist (Nucl. Sci. Eng. **62**, 695 (1977)) のデータが知られているが、これは MN モデル計算値とよく一致する。一方、Starostov や Drapchinsky などロシアの測定データは 1 MeV 以下で MN 計算値より大きい。

- 筆者は、PFNS の低エネルギー領域での測定値と MN モデル計算値のずれについて、次のような可能性を考えている。

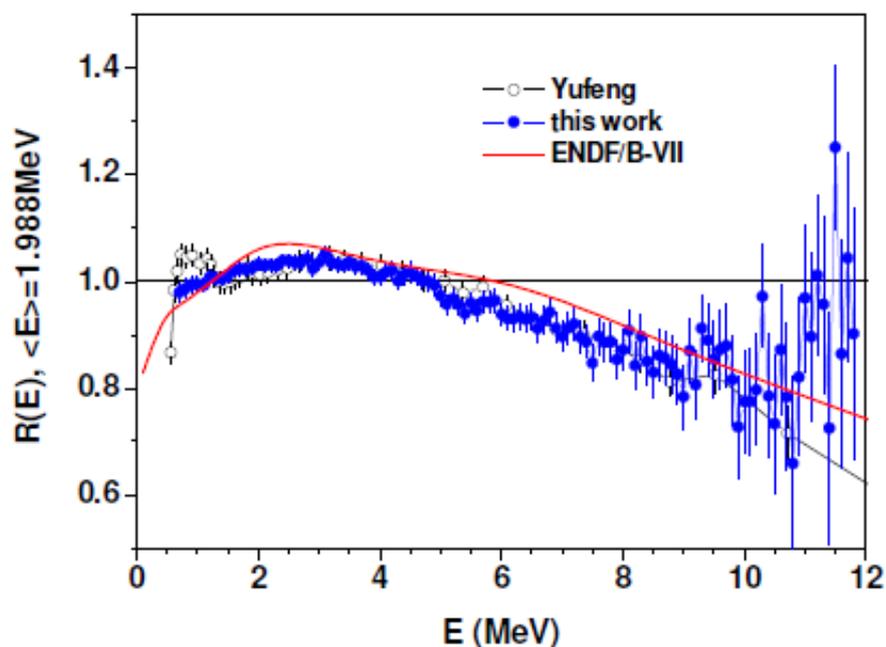


図 2. U-235 の PFNS (核温度 1.988 MeV の Maxwell 分布に対する比の形でプロットしたもの)。Hamsch の発表から。

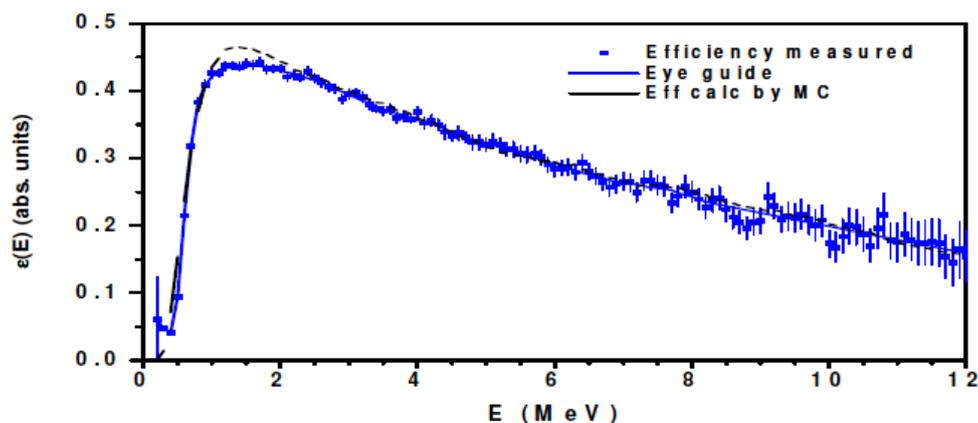


図 3. NE213 の中性子検出効率のエネルギー依存性 (Hamsch による)

- (A) 測定データに不確かさがある
- (B) 核分裂片のクーロン加速途中における中性子放出がある
- (C) 核分裂片からの中性子放出に重心系での非等方性がある
- (D) 断裂時に垂鈴状の変形核のネック部から放出される scission neutron がある
- (E) 大きな角運動量 (約 $7\sim 8\hbar$) を持つ励起核からの中性子放出において yrast 効果が効いている

(A)については、1 MeV 以下で Johansson らのデータ (低目) と、Yefeng et al.及び Kornilov-Hambsch のデータ (高目) の間に差異があるのは事実である (図 2)。Maslov は自分の式と合わない Johansson を頭から否定するが、筆者はより精度の高い測定で確認する余地があると思う。Hambsch はスチルベンなど閾値の低いシンチレータを使うことを考えている、と言っていたが、実験家側からのこのような努力に期待したい。

さて、もし、1 MeV 以下で Yefeng et al., Starostov et al., Kornilov et al.の高めの測定データが正しいとしたら、理論側からみて、どのような検討材料があるだろうか。筆者が考える検討項目が、上記(B)~(E)である。

(B)については、核分裂片が加速途中の中性子放出 (Neutron Emission During Acceleration; NEDA) が 30%あると仮定した場合の計算結果を図 4 に示す。スペクトルの低エネルギー側が増強されていることが分かる。これは、加速途中の核分裂片から放出される中性子は、分裂片から受けとる運動量が小さいという kinematic な理由による。

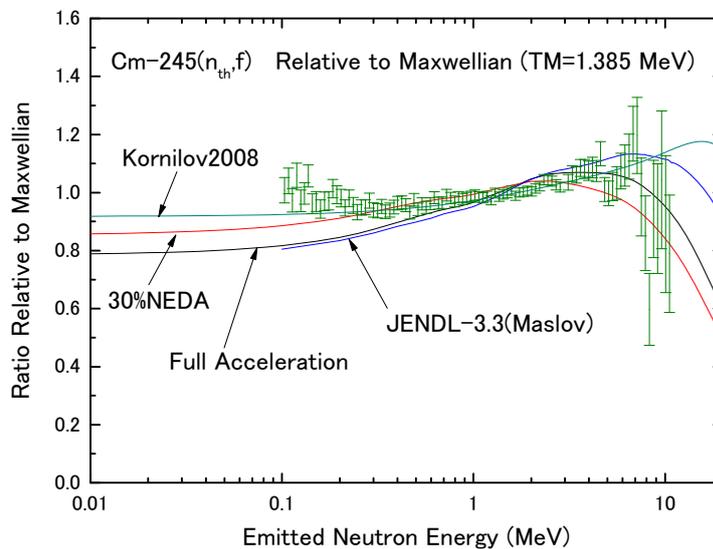


図 4. Cm-245(n_{th}, f)の PFNS ($T_M=1.385$ MeV の Maxwell 分布に対する比で表示)

(C)は、核分裂片は大きな角運動量 (約 $7\sim 8\hbar$) をもつため、それから放出される中性子は核分裂片の重心系から見て非等方的に放出される可能性があるということである。

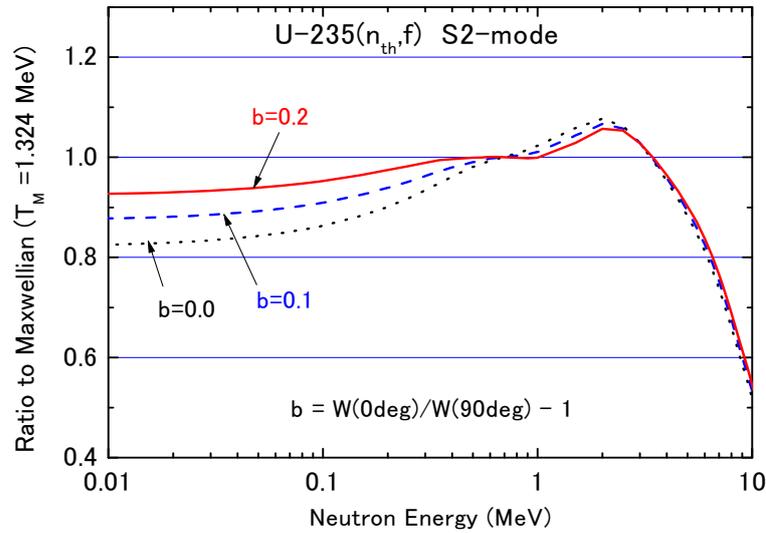


図 5. 即発中性子の核分裂片重心系非等方放出の効果

この効果を MN モデルに組み込むことは難しくない。数値計算の結果を図 5 に示す。この場合も、1 MeV 以下、及び 5 MeV 以上の成分を増強する効果があることが確認できる。

(D)はいわゆる scission neutron である。そのエネルギーもスペクトル形状についても情報が乏しいが、Maxwell 型の分布を仮定してよいならこの成分を重ね合わせることは容易である。(B)、(C)の効果を検討した上で scission neutron を考慮するなら、Kornilov-Maslov のように不自然な存在比率を仮定しなくても測定データに近い結果を得ることができる。最後に、(E)は、大きな角運動量 (約 7~8h) を持つ励起核からの中性子放出において、

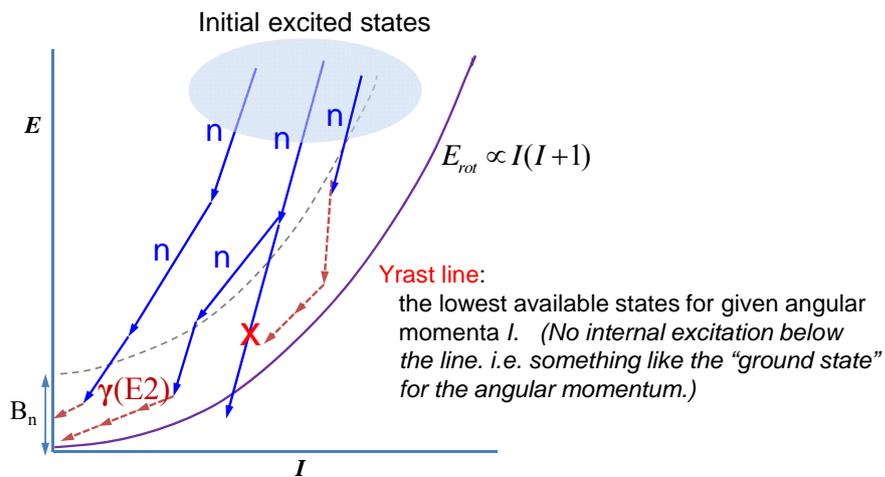


図 6. 励起核の崩壊過程における yrast 準位の効果

yrast line 以下への遷移が禁止されるとすると、大きなエネルギーをもった中性子の放出が抑制されるため、中性子スペクトルはソフトになるだろう、という筆者の予想である (図 6)。重イオン反応とは異なり、 $J=7\sim 8\hbar$ 程度の角運動量でこの効果がどれほど効くかわからないが、角運動量保存則を考慮したモンテカルロ計算でその効果を調べることもできると思う。

4. 筆者の基本的考え方

PFNS の計算モデルの改良に当たっての、筆者の基本的な考え方は、次の通りである。

- (1) PFNS 問題は、核分裂という多面的な現象の一つの側面をなすものであり、他の側面(核の変形モード、そのモードごとの質量・運動エネルギー分布など)と consistent でなければならない。
- (2) 原子核の基本的物理量(準位密度、逆過程断面積、シェル効果等)は現在入手できる知識を可能な限り活用し、物理的に押さえられる量はできる限り正確に押さえる。そうすることで *ad hoc* な調節パラメータはできるだけ減らす。

もとより、核データ研究において、理論的に詰めることが困難な場合に経験式を使うことはよくあることである。しかし、その代償として、物理的メカニズムを曖昧にしてしまうという欠点を伴う。PFNS の研究は、歴史的に見ると、当初は Maxwell、Watt 型などの半経験式から出発したが、その限界が明らかになるに及んで、1980 年代からは、Los Alamos (MN) モデル、カスケード蒸発モデル (Märten-Seeliger, Hu Jimin)、Hauser-Feshbach 型モデル (Brown-Dietrich, Gerasimenko)、Monte Carlo シミュレーション (Dostrovsky、Lemaire ら、Büyükmumcu ら) など、核分裂片からの中性子放出の物理に立ち入ったモデル化が試みられてきた。ここで再び Kornilov-Maslov のような、調整パラメータ満載の経験式に戻るのには、筆者には「祖先がえり」のように見える。その結果、fission physics 上の検討課題が覆い隠されてしまっただけで、おもしろくも何ともない。

MN モデルに対する批判として、Kornilov らは「MN モデルのスペクトルは、逆過程断面積や準位密度にきわめて敏感であり、後者はほとんど信頼できない (hardly reliable)」(Phys. At. Nucl. **62**(2) 173 (1999)) と書いているが、ほかの断面積計算では準位密度パラメータや光学ポテンシャルを平気で使っておきながら、PFNS の場合にはこれらが信用できないと言うのは一貫性を欠いていると思う。

Kornilov からきたメールに“Sorry, fast reactors won't work”と書いてあった。現状の PFNS では高速炉の設計もできないだろう、ということらしい (関西で言う「おちょくり」?) が、これも例によって極端な誇張である。PFNS の不確かさが問題だとは言っても、なにも高速炉の設計ができないほどひどいわけではない。

ベラルーシの科学アカデミー会員に昇進した Maslov は「科学には diplomacy が必要だ」

と言い、WONDER2009 国際会議でも大演説を行うつもりらしいが、研究は学問ベースで進められるべきであって、外交的思惑で左右されるべきではないと思う。

かつて、PFNS に 20 MeV 以上の高エネルギーピークが存在するという大発見データが発表されたことがある。国際機関からの支援金で研究が進められたが、結局は「検出器の誤信号だった」で終結。偶然か故意かは知らないが、何かトピックスを打ち上げ、外交的手腕で資金を集め、最後は尻切れトンボで終わるというケースを何度か目撃したことがある筆者としては、「画期的発見」に対しては慎重にならざるをえないのである。もっとも、こういう態度が別種の偏りを生むという可能性も否定しないつもりだが。

5. 謝辞

ウィーンでは、最終日に、永年行ってみたいと思っていた郊外の町ハイリゲンシュタットを訪れることができた。ここはベートーヴェンが難聴に絶望して遺書を書いたとされる土地である。交響曲「田園」の旋律を頭の中に響かせながら歩いた小川沿いの「ベートーヴェンの散歩道」Beethovengang は、どこか京都の「哲学の道」と似ていなくもない・・・。

Los Alamos は、mesa と呼ばれる、頂上が平らで周囲が絶壁の特徴ある台形型地形が印象的である。柄にもなく「自然の造形力の多様性」などということを考える。ここへ来たのは 2 度目のはずだが、前回の記憶がおぼろげなのは当方の脳が朧朧としてきた証拠かも。

ウィーンと Los Alamos、共通点がほとんどない 2 つの町だが、なんとなく、高校生の頃に受験勉強のために読んだ Charles Dickens の「二都物語」を思い出した。

最後に、Los Alamos で帰り際ぎりぎりまでいろいろ議論していただき、メールでも意見をいただいた、カウボーイハットの似合う Dave Madland 氏、夕食に招待していただいた日本酒通の Peter Möller 氏、そして、—— *last but not least* —— Albuquerque—Los Alamos 間を往復送迎していただき、LANL 滞在中にもあれこれと本当にお世話になった河野俊彦さんに、心から御礼を申し上げます。