

 会議のトピックス(III) 

P(ND)²: Perspective on Nuclear Data for the Next Decades; Workshop on the future of theory- and experiment-based nuclear data evaluation

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺 幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

標記ワークショップが、フランス・パリ郊外 Bruyères-le-Châtel にあるフランス原子力庁 (CEA) の DAM Ile-de-France (DIF) 研究センターにて9月26~28日の3日間開催された。理論及び実験(測定)に基づく核データ評価の将来像について議論するために、現地組織委員長 E. Bauge (CEA-DIF) を始め、欧州・米国の核データ研究者等によって組織されたワークショップで、招待講演のみに限定した専門家会議形式であった。尚、CEA-DIF では同様なワークショップを1996年に開催しており、高エネルギー核データが注目され始めた時期で、テーマは“Nucleon-Nucleus Optical Model up to 200 MeV”であった。

今回の参加者は口頭発表者35名に数名のご意見番 (A. Kerman 等) や地元の研究者等を加え、約50名であった。日本からは、馬場護先生 (東北大) と Orsay に長期訪問研究員として滞在中の千葉豪氏 (当時サイクル機構、現原子力機構) と筆者の3名に加え、LANL の河野俊彦氏が参加した。実験・理論含め多岐に亘った話題が取り上げられ、活発な討論が行われ、充実した内容であった。講演の詳細については、Web ページ (<http://www.nea.fr/html/science/pndnd>) にプログラム及びアブストラクトが公開されているので、そちらを参照してもらいたい。以下、その概要について報告する。

まず、実験・測定に関する講演は全7件(全講演数の20%)で、現在核データ測定をリードしている各施設 (Uppsala、GSI、IRMM、Orsay、LANL、LLNL、東北大) における測定の現状や将来計画等について報告があった。その中で個人的に関心を持った話題を2つ以下に述べる。

1つは、“surrogate” (代理) reaction technique と呼ばれている核反応データの革新的間接測定法で、関連した2件の講演が J. Escher (LLNL) と M. Aiche (CENBG) によって行われた。これは、複合核を経由して進む2段階反応に対する断面積測定に適用される。まず実験では、測定すべき反応の第1段階 (特定の複合核形成) を別の代替 (“surrogate”) 反応に置き換え、複合核崩壊の測定 (注目する崩壊の分岐比を測定) を行う。複合核形

成断面積は理論計算によって求め、“surrogate”反応を使って測定した分岐比と組み合わせ、最終的な断面積を算出する。Aiche 等は、この測定手法を中性子入射核分裂断面積測定に適用した結果について報告した。彼等は、“Surrogate”反応として IPN Orsay のタンデム加速器からの ^3He ビームを用いた移行反応 ($^{232}\text{Th}(^3\text{He},p)^{234}\text{Pa}$) を利用して、生成した複合核 ^{234}Pa の核分裂率分布を励起エネルギー15MeV まで測定し、不安定核 ^{233}Pa (半減期 27 日) に対する中性子入射核分裂断面積を中性子エネルギー10MeV まで求めることに成功した。参考までに、この実験結果はすでに Nucl. Phys. **A735** (2004) 345 に公表済である。彼等は、最近この手法を $^{242,243,244}\text{Cm}$ と ^{241}Am のマイナーアクチニドに適用しており、予備的な結果について報告がなされた。“Surrogate”反応法以外の代表的な間接測定方法には、天体核分野の実験に使われるクーロン分解や ANC (Asymptotic Normalization Coefficient) 法などがあり、直接測定が困難な不安定標的核の反応については、今後有望な測定方法になるであろう。いずれも実験と理論を組み合わせた手法なので、実験技術の向上ばかりでなく、理論の予測精度向上や適用限界等の理解が不可欠である。

もう 1 つは、J. Blomgren (Uppsala) によって紹介された野心的な新型中性子源の提案である。CERN の Beta-beam チームによって概念設計が行なわれている電子ニュートリノ (あるいは反電子ニュートリノ) ビームの生成プロジェクトをベースにした提案である。この Beta-beam チームは、蓄積リングを高速で周回している放射性イオン(例えば、 ^6He and ^{18}Ne) のベータ崩壊を利用して、高強度の電子ニュートリノビームを生成しようとする計画を提案している。なお、このプロジェクトについては Beta-beam チームのホームページ (<http://cern.ch/beta-beam>) に詳しく述べられている。これを中性子源に応用するには、蓄積リング中の大強度ベータ放出核種ビームからの遅延中性子を利用することになる。数字の根拠をメモすることを失念したが、生成中性子強度の推定値は 10^{11} 個/秒が期待できるという話だった。実現可能性の有無は別として、こうした“野心的な”計画が検討されていることを紹介しておく。

次に、理論関連の講演内容について概説する。全講演数の 8 割を占め、定番のトピックス (質量公式、準位密度公式、結合チャンネル法、前平衡模型、捕獲反応、核分裂、R 行列等) に加えて、CDCC 法や少数多体系理論についてもそれぞれの専門家による講演 (主として現状報告) があった。さらに、応用に関連して、共分散や積分実験の発表もあった。これらの個別テーマに加え、実際の核データ評価に応用されている理論の現状に関する包括的な講演として、TALYS コードの開発者である A. Koning による“Current status of nuclear model-based data evaluation”や天体核関連データの S. Goriely による“Microscopic models for nuclear data evaluation”も示唆に富む内容を含んでいた。以下、筆者の興味を引いた話題について紹介する。

まず、M. Dupuis (CEA-DIF) による講演“Inelastic scattering microscopic calculations with second order Born approximation – link with FKK preequilibrium formalism”である。彼等は、

現象論を避けて、弾性散乱と非弾性散乱（直接と前平衡過程含む）を完全に微視的理論で記述することを狙っている。光学ポテンシャルは Melbourne の g-行列から作成した微視的なものを使い、標的核はランダム位相近似（RPA）で記述する。励起状態への非弾性散乱遷移は RPA の波動関数と DWBA の枠内で計算する。連続状態への拡張では、第 2 オーダーのボルン近似を適用し、終状態は可能なすべての 2p-2h 状態を考慮する。FKK 理論の多段階直接過程の計算は、本来 $\langle \tilde{\chi}^+ | V | \chi^+ \rangle$ であるべき行列要素を DWBA 型の $\langle \chi^- | V | \chi^+ \rangle$ に置き換えて計算しており、FKK が抱える問題点（ χ - $\tilde{\chi}$ 問題）として長らく論争が行われてきた。（注：オリジナルの FKK 論文にはこの DWBA 型の行列要素は出てなく、最初 Bonetti が行った FKK 計算で使われたので、最近では FKK-B と呼ばれている。）Dupuis 等はこの点は正しく扱って 2 段階過程までの計算を行ったが、結果は 2 段階過程が効いてくる後方角において実験値を過大評価しており、その原因を探っている段階とのものであった。1 つの可能性は FKK と同じく on-shell 近似を採用しており、これに問題があるのではないかという話であった。

これ以外の前平衡モデル関連講演のひとつは河野氏（LANL）による“Effect of spin distribution in the pre-equilibrium process on cross-section calculations”である。GNASH 計算では、前平衡成分放出後の残留核のスピンド分布は複合核放出と同じと仮定されている。FKK 計算で求めたスピンド分布を用いた GNASH 計算を行い、アイソマー生成断面積やガンマ線生成断面積に大きな影響を与えることを示した。もう 1 件は、筆者による講演“Pre-equilibrium light cluster production in nucleon induced reactions at intermediate energies”である。Iwamoto-Harada-Sato の励起子モデルと QMD 計算を使った 96MeV 中性子入射反応の解析結果を示し、QMD 計算における軽イオンクラスター生成改良する方法を提案した。

連続状態への遷移に関連して、今回、CDCC の適用について 2 件の講演（N. Keeley と P. Chau：いずれも CEA-DIF 所属の若手）があったことも特記すべき点であろう。CDCC は Continuum Discretized Coupled-Channel 法の略であり、重陽子などの緩く結合した核を含む反応の記述に成功した理論で、最近では不安定核入射反応への応用がなされている。国内では九大理の核理論グループが先駆的な研究に進め、世界的評価を得ている。なお、今回の 2 件の講演はいずれも重陽子入射反応を扱ったもので、核データ評価への実際的な応用を目指しており、計算コードの開発並びに適用性の調査というまだ初期の研究段階といった印象であった。

共分散関連の講演についても一言だけふれておく。先に述べた Koning の講演では、TALYS 計算結果に対してモンテカルロ法で誤差評価を行い、誤差付の計算結果を示したのが印象的だった。共分散関連では、H. Leeb（Vienna）による“Basic statistics and consistent covariances for nuclear data files”と千葉による“Resonance self shielding in covariance processing”の 2 件講演が行われた。

ワークショップの最後に Koning が座長を務め、サマリーと核データ評価の将来展望に

ついて全体討議を行った。以下に、その論点を箇条書きにして、私見を交えて討論内容についてまとめることにする。

- (1) Can/Should we rely on "microscopic ingredients" for nuclear model calculations?
- (2) "Normal" OMP and Coupled-Channels calculation is well established. Can MCAS and CDCC play the same role for light system?
- (3) Are we ready for the routine quantum mechanical preequilibrium calculations?
- (4) New roads for experiments? New energies, new targets, surrogate reactions, exclusive reactions, cover 200-2000MeV range with inverse kinematics, etc.
- (5) Is it possible to supply uncertainties (covariance) at every level of nuclear science?
- (6) Can we translate applied nuclear data needs (power reactors, nonproliferation, SEU, medical) into priorities for theoretical and experimental nuclear physics?

まず、(1)の微視的モデルに基づく計算に頼るべきかどうかという質問に対しては、微視的モデルの信奉者である Goriely (前述) は“YES”と言うであろう。計算処理能力の向上に伴い、核データ評価に使う理論は微視的モデルの指向をより強めることになると予想される。しかし、現状では現象論的な扱いも高い予測能力をもつ場合には核データ評価には依然として有効であり、すべてが微視的計算に置き換わることはないと考える。次の質問(2)に出てきた CDCC は先に解説したが、MCAS とは Amos (Melbourne) 等が提唱している Multi-Channel Algebraic Scattering 理論の略で、複素結合チャンネル理論の1つである。軽核の共鳴領域における散乱の記述への適用が期待される。詳細は省略するが、今後の発展に注目したい。(3)の量子論的前平衡計算については、評価に使う段階にまだ解決すべき点が多々あることがわかってきたのが実状である。先に述べた FKK 問題が解決せずには多段階計算へ FKK を応用することは難しい。また他の理論 (TUL や NWY) による3段階以上の計算は宿題のままである。さらに α などの複合粒子放出の量子論的計算はまだ道のりが遠い。しかし、(3)は(1)とも関連しつつ次の10年の課題となりうると筆者は考える。(4)の実験に関しては、実験技術の向上と実験屋のアイデアによって、革新的な測定方法にチャレンジして新しいデータや高品質のデータを取得していくことを目指すことになろう。同時に、理論モデルに制約を与えるような inclusive から exclusive な物理量の測定も必要という意見があった。同感である。(5)の共分散については、Koning が TALYS 計算で見せたような定量的に評価した誤差付の計算結果と微分実験データを比較・議論する時代になるのかもしれない。

最後の(6)は、核データ研究のサポート (資金・人材両面) を得るために重要な問いかけである。理論・実験物理との密接な協力なくして核データ研究の進展はない。新しい実験施設 (例えば、国内では J-PARC や RIBF) における実験テーマの提案、核データ評価計算に最先端の核理論を導入する取り組み (上記の(1)~(3)とも関連)、新しい核データ

ニーズ（例えば、天体核や不安定核データ、物質・生命分野の核データ）の掘り起こし作業などを通じて、理論・実験物理の優先順位の中に“核データ”を位置づけていく工夫・努力が必要であろう。国内においても、核物理畑で活躍している（いた）実験・理論屋が平和的応用指向をもった核データ研究にもっとコミットできる環境作り（Posdoc や研究資金面）に努力し、研究者層の厚みが増し、内容がさらに深化（or 進化）した核データ研究へ向かっていくことを願っている。

最後に、本ワークショップのポスター（絵：Henry Dancer、詳細は前述のワークショップ HP 参照）及び集合写真を掲載して、本会議報告を締めくくりにする。

