



会議のトピックス (IV)

3rd RCM on Updating the Photonuclear Data Library and Generating a Reference Database for Photon Strength Functions

甲南大学
宇都宮 弘章

hiro@konan-u.ac.jp

日本原子力研究開発機構

岩本 信之

iwamoto.nobuyuki@jaea.go.jp

ロスアラモス国立研究所

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

1. はじめに

IAEA が主催する本 CRP (Coordinated Research Project) は, γ 線強度関数と光核反応データの 2 つのライブラリを整備することを目的としており, 他の CRP とはやや趣を異にする。CRP の Web ページは <https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/> にある。2016 年に第一回会合が開かれ, 今回 (2018 年 12 月 17–21 日) のウィーンが最終の会合となった。参加者は 15ヶ国から 20 名程である。通常の会合とは別に, 光核反応データの評価値を第三者がレビューする特別な会合が 2018 年 6 月に設定された。

近年, Oslo 大学や Dresden-Rossendorf 研究所, iThemba などのグループで強度関数の直接・間接的な測定がなされている。それに加え, 理論計算や過去の実験データから得られた巨大共鳴 (Giant Dipole Resonance, GDR) パラメータなどを, 通常の原子核物理研究や光核反応データ・中性子捕獲断面積評価の高精度化に応用したいという需要がある。そういったデータは直接的な実験値ではなく EXFOR には少々馴染まないため, 特別なライブラリとして利用者に提供しようというのが目的の一つである。

IAEA では過去に光核反応データの CRP が組織されており, その成果は 1999 年に IAEA Photonuclear Data Library として提供されている。本 CRP で整備される最新の GDR パラメータ等は光核反応断面積計算の要となる物理量でもある。一方, 甲南大学を中心とするグループは新しい手法を用いた (γ, xn) 反応断面積の精密な測定を行っており, 過去の実験データの矛盾が解消されつつある。さらに JAEA は最新の光核反応データライブラリ JENDL/PD-2016

をリリースしたばかりである。これら新しい知見に基づき、IAEA 光核反応データライブラリの改訂を行うのが、もう一つの目的である。本来2つの目的は密接に関連すべきものではあるが、技術的な問題もあり、結果的には2つのプロジェクトが一つのCRPに同居するような形となってしまった感は否めない。本報告ではNewSUBARU放射光施設での測定と、光核反応データライブラリについて述べる。



図1 クリスマスシーズンの Graben 通り

2. 光核反応実験データ

2.1 PHOENIX Collaboration

PHOENIX 共同研究は、日本のNewSUBARU放射光施設での光核反応測定データを本CRPに提供することを目的とし、甲南大学、Oslo 大学、ELI-NP (Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics), IFIN-HH (Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering), Moscow 大学、SINAP(上海応用物理研究所)、Bruxelles 自由大学から構成されている。測定されるのは γ 線入射反応における中性子放出断面積(γ,n), (γ,xn)であり、過去にも同様の反応の測定はなされている。しかしながら中性子検出手法の問題から測定データの間で矛盾があり、信頼性の高いデータ評価を行う上での妨げになっていた。本共同研究では、NewSUBARUにおけるレーザーコンプトン散乱による γ 線生成、並びに甲南大学で新たに開発された光核反応中性子検出手法によってより精度の高い測定が可能となり、過去の測定データの問題点を克服している。

今回測定されデータ評価に応用された(γ,xn)反応は ^9Be , ^{59}Co , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{139}La , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{169}Tm , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{209}Bi の11核種になっている。また(γ,n)反応に対しては、 ^{13}C , $^{58,60,61,64}\text{Ni}$, $^{64,66,68}\text{Zn}$, ^{89}Y , $^{137,138}\text{Ba}$, $^{156,157,158,160}\text{Gd}$, $^{182,183,184}\text{W}$, ^{185}Re , ^{192}Os , $^{203,205}\text{Tl}$ が含まれる。これらのデータ並びに解析結果は、 γ 線強度関数のデータベースに入るとともに、光核反応データ評価の基礎となっている。

2.2 Moscow 大学による測定データの評価

過去の測定データの問題、特に全光吸収断面積がどのように $1n$, $2n$, $3n$ 反応等に分配されるかは、光核反応評価を行う上で大きな問題となっていた。Moscow 大学の Varlamov 氏はこれらの割合に着目し、実験データに基づく評価を行っている。これは通常我々が言うところの評価とは少々異なり、モデル計算を利用することで過去の実験データの補正を行うようなものである。これらの数値は Evaluated というフラグ付きではあるが EXFOR に含まれていて、やや混乱する。

この補正されたデータを統計モデルコードで再現するように計算し、それをライブラリ評価値とする方法も考えられるが、Varlamov 氏の評価そのものに彼らのモデル計算が含まれているために注意を要する。CRP では彼らのモデル計算を EMPIRE, TALYS, CCONE, CoH₃ と比較したが、前平衡過程での中性子放出の差はかなり大きいようである。TALYS や CCONE 計算を補正前の実験データに適用すれば、原理的には Varlamov 氏が行った補正と同じである。この評価済み実験データをどのように取り扱うかは、JAEA, KAERI, CIAE の担当者の判断に任されることになった。

3. 各研究機関における光核反応データの評価

3.1 IFIN-HH/ELI-NP (ルーマニア)

評価担当の Filipescu 氏は、NewSUBARU 放射光施設を使って光中性子断面積の測定実験を行うデータ提供者でもあるが、甲南大を中心とする PHOENIX 共同研究で得られた測定データを基に EMPIRE コードで核データ評価も行っている。担当している核種は ^{59}Co , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{139}La , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{169}Tm , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{209}Bi である。評価では、 γ 線強度関数に Standard Lorentzian (SLO) 型と Simplified Modified Lorentzian (SMLO) 型を用いて光中性子断面積の計算を行っており、特に 25 MeV 以上の γ 線エネルギー領域における光中性子生成断面積 ((γ, xn) 反応断面積) に対しては SMLO で測定データを良く再現できることが示された。しかしながら、SMLO で採用されている共鳴幅はモデル名の通り単純でエネルギーに比例した形を持つため、エネルギーが高くなると断面積が大きくなる傾向があった。これが原因でたまたま再現がうまくいっていた可能性があり、Plujko 氏 (ウクライナ) によると、この共鳴幅のエネルギー依存性は過大評価気味になるため、修正が必要であるとの説明があった。

3.2 JAEA (日本)

JAEA では、本 CRP が始まる前から光核反応データファイル JENDL/PD-2016 の開発が進められていた。そのため、本 CRP では前回の IAEA 光核データライブラリに収録されていた 164 核種に対する断面積データと JENDL/PD-2016 との比較図 (測定データを含む) の作成が主な作業 (のはず) であった。また、IAEA としては、本 CRP で開発する核データのエネルギー領域を 200 MeV まで拡張したい意向があったため、ALICE-F コードで評価されていた構造材核種についても CCONE コードを使って再評価し、エネルギー上限も拡張した。さらに IAEA からは新たに追加したい核種がリクエストされたため、全体としては

50 核種程度 ($^{35,37}\text{Cl}$, $^{36,38,40}\text{Ar}$, ^{45}Sc , $^{46,47,48,49,50}\text{Ti}$, ^{51}V , $^{50,52,53,54}\text{Cr}$, ^{55}Mn , $^{54,56,57,58}\text{Fe}$, ^{59}Co , $^{58,60,61,62,64}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, $^{174,176,177,178,179,180}\text{Hf}$, $^{185,187}\text{Re}$ など) の評価も担当したことになる。CCONE による新評価データを収録した光核反応データファイルは、IAEA の新ライブラリ公開前に、JENDL/PD-2016 の更新版 JENDL/PD-2016.1 として公開する予定なので、こちらでも参照して頂きたい。

なお比較図に関してであるが、光核反応データライブラリは少々特殊で、ファイルに与えられたデータをそのまま実験データと比較することはできず、データ処理の手間がかかる。例えば (γ, n) 反応測定データには、中性子を一個放出する反応以外に荷電粒子を放出する反応も含まれている場合がある。そのような実験データと評価ライブラリを比較する場合、データファイル内のそのような反応断面積を合計しなければならない。IAEA 側はこのことを認識していなかったようで、NDS で開発されたシステムを使えば比較図は容易に作成できると考えていたふしがある。実際には JAEA 側がこのような処理並びに比較図の作成全てを担当し、本 CRP への甚大なる貢献となった。

3.3 KAERI (韓国)

前回の IAEA 光核データライブラリの大半は KAERI が作成したデータが採用されていたが、今回はそのファイルに収録されていない核種及び Varlamov 氏により測定データの補正が行われた核種 (^{14}C , ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, $^{140,142,143,144,145,146,148,150}\text{Ce}$, ^{153}Eu , ^{175}Lu , $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$, $^{63,65}\text{Cu}$, $^{91,94}\text{Zr}$, ^{115}In , ^{116}Sn , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{159}Tb , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi) を担当した。光核データの評価計算には、TALYS コードが使用された。実験データについて、本 CRP では当初 Varlamov 氏の補正データを採用することが推奨されていたため、KAERI の評価では、主としてこの補正データが利用されている。評価では、TALYS コードを利用したモデルパラメータチューニングシステムを開発して、断面積計算が行われた。このシステムでは、TALYS のインプットファイルの作成やモデルパラメータのチューニングなどが自動化されており、かなりの省力化が実現されているようである。ただし、再現した結果に対するインプットデータが最終的にどのような数値になったのかを確認していなかった点など、少々不安を感じさせる一面もあった。

3.4 CIAE (中国)

CIAE では CRP 会合の参加者だけではなく、CNDC のメンバーが核データ評価の実務を担当しており、開発意識の高さを感じた。評価を担当した核種は、 $^{6,7}\text{Li}$, ^9Be , $^{10,11}\text{B}$, ^{51}V , $^{50,52,53,54}\text{Cr}$, $^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$, $^{180,182,183,184,186}\text{W}$, ^{209}Bi と $^{112,114,115,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$ である。評価用コードは中性子入射用コードを光子入射へ拡張したと思われる MEND-G と GLUNF コードが利用されていた (あまり馴染みのない名前だが、欧米からすると CCONE も同様かもしれない)。中重核の評価には MEND-G コードが利用されており、200 MeV までの計算が可能とのことであった。光核反応で重要な γ 線強度関数についても、SLO などの Lorentzian 型や半微視的モデルの 7 種が使用でき、7 種すべてのモデルを使って評価を行い、再現性を検討するという手の込んだ評価手法を採っていた。しかしながら、筆者 (岩本) が各機関からの評価

結果を加えた比較図の作成も依頼されていたのだが、その作業中に CIAE から提供された断面積データテーブルに“負の値”や“NaN”(not a number)が入っていることに気が付いた。これらの不具合をその都度指摘したが、評価したパラメータもしくは計算コードにまだ問題があるように感じた。前回の IAEA 光核データライブラリに収録された日本からのデータにもいくつか不備があったので、これらの点が解消されることを期待したい。なお、CIAE もこれを機に光核データライブラリ (274 核種を収録) の公開を予定しているそうである。

3.5 データファイルの選択

各機関が担当した核種を見ていて気が付かれた方もいるかもしれないが、今回の CRP では、どの機関がどの核種の評価を行うかという事前の割振りがなかったため、評価データが重なるという事態が発生してしまった。IAEA 側が初めからそれを容認していたという事情もある。また、新たに評価された核データが現行の IAEA ライブラリを改善しているとも限らないので、全ての評価結果を一枚の図に載せ、それを元に評価値の選択が行われた。これには第 3 回会合のうち 2 日間を割り当てている。多くの核種が収録され最新版でもある JENDL/PD-2016 から多くが採用されたが、各機関の評価も甲乙付けがたいものとなっていることもあり、JENDL/PD-2016 と重複している核種の多くは担当核種の少ない KAERI または CIAE から採用されることになった。これでようやく終わったように見えるが、実はまだ NewSUBARU 施設で測定されたデータを基にした評価や、一部結論を後回しにした核種の選択が進行中であり、あともう少し議論が続くそうである。



図 2 St. Stephan 前のクリスマスマーケット

4. 会議室ノマド

今回を以て CRP の会議は終了するため、時間的な制約もあり、少々異例ではあるがグループを 2 つに分けることを提案し、了承された。強度関数組はそのまま会議室に残り、ライブラ

り組は同じ棟の他の会議室へと移動することにした。クリスマス直前ということもあり、進行中の会議は少ない(ように見えた)。IAEAの会議室システムで空き部屋を確認し、その一つを適当に選んで、さて仕事を開始しようとした矢先、見知らぬグループの侵入にあい「この部屋は自分たちが予約している」とのこと。会議室システムの情報に不整合があったのか、あるいは直前に取られたのか。やはり適当に入るのはまずいと、NDSの秘書に連絡し、会議室を一つ押さえてもらった。

その予約された部屋へ向かうと、既に誰かに使用されている。ここは自分たちが押さえたんだと、中の人々を追い出す度胸は無いので、その隣の部屋を勝手に使わせてもらうことにした。でもその部屋に、ここを予約していると誰か来たらどうするのか。本来なら隣の部屋が自分らの会議室である。おそらく間違っ使用されているので、自分らはここを使っている。残念だが他の空いた部屋を探してくれ。そう言えば良いとのこと。トコロテン方式が通用するほど大量に会議室を用意しているのがIAEAである。



図3 真冬の Vienna International Centre と地下鉄 U1 線

5. おわりに

最近の γ 線強度関数に関する研究の進展により、中性子捕獲断面積がかなり精度良く計算できるようになってきている。過去にはE1遷移が最も重要だと考えられていたが、実は低エネルギーでのM1遷移が重要であると認識されるなど、核構造への理論的・実験的な知見が

原子核反応理論へ取り込まれつつある。本 CRP では学術的な議論も活発に行われ、実験、理論、評価を含む小さなコミュニティを形成していたようである。本 CRP は今回会合が最終となるが、光核反応ライブラリのリリースまでにはまだ少々時間がかかりそうで、引き続きメールベースの議論を続け、2019 年 1 月末に β 版の取り纏めを目標にしている。最終的な報告は、強度関数とライブラリ、2つの論文として出版される予定である。最後に、本 CRP の Scientific Secretary として尽力された IAEA NDS の P. Dimitriou 氏に感謝の意を表したい。



図 4 Ringstraße 脇に佇むキャメルジャケット二人