

話 題 (IV)

ガンマ線生成データの測定、理論計算及び評価に
関する NEANSC 専門家会議

東京工業大学

北沢 日出男

NEANSC 主催の標記専門家会議が、1994年11月9日から11日までの3日間イタリア、ボローニャ市の ENEA で、Coceva 教授 (ENEA、Bologna) を議長として開催された。参加者は約40名であり、この会議の後引き続いて14日から17日まで同じ議題の IAEA/CRP の研究調整会議が開催された関係上、IAEA の経済的援助によりロシア及び東欧からの出席者が比較的多いのが目立った。日本からは、北沢、井頭 (東工大)、柴田 (原研) の3名であった。約30名の専門家によるそれぞれの分野の現状報告及び研究発表があった。以下はその主な内容である。

第1日目の冒頭の Reffo (ENEA) によるガンマ線生成反応機構及び応用面でのデータニーズの概論に続いて、Dietrich (LLNL, Livermore) と Likar (Univ. of Ljubljana) により、直接-準直接模型 (DSD 模型) に関する最近の研究結果が発表された。従来、DSD 模型は核子の直接捕獲及び巨大共鳴状態を経由する準直接捕獲による単一粒子束縛状態への電磁遷移を記述するのに極めて有効な模型であった。Dietrich は、この模型を非束縛状態への遷移を含むように拡張し、これを 19.6 MeV の偏極陽子による $^{89}\text{Y}(\vec{p}, \gamma)$ 反応の断面積及び分解能の実験結果の解析に適用した。その結果、実験と理論の一致を得るために、単一粒子終状態の減衰効果が重要であることを示した。また、Likar は、射影オペレータ (P,D,Q) を用いて通常の DSD 模型の仮定の妥当性を調べることにより、電磁遷移における多重極オペレータの修正が必要であると示した。

次に、高エネルギー中性子による break-up 反応及び非弾性散乱ガンマ線生成に関する3件の報告があった。その中で、Pavlik (Univ. of Vienna) は、WNR (LANL, Los Alamos) における白色中性子源からの 400 MeV までの中性子を用いた Al 及び Pb のガンマ線生成断面積の測定及び理論計算との比較の結果を報告した。理論計算は、多段階前平衡過程を含む GNASH コードにより行われ、高エネルギーにおける前平衡過程の寄与の重要性が示された。Dickens (ORNL, Oak Ridge) は、軽核及び中重核の break-up

反応によるガンマ線を測定するように改善された ORELA のインビーム・ガンマ線計測装置を用いた $^{56}\text{Fe}(n,3n)$ 反応からのガンマ線測定の報告を行った。TNG コードによる計算はこの結果をよく再現している。ORELA では、予算削減のため一部の天体物理のための基礎データの測定を除いて、今後の測定計画は無いようである。Hongyu (Ohio Univ.) は、即発ガンマ線生成断面積測定における非即発ガンマ線の寄与を除くために、原子核準位の寿命 ($T_{1/2} = 1 \text{ ns} \sim \text{数時間}$) による補正を行う方法を提案し、14.9 MeV 中性子に対する Fe、Al、Si の測定結果を報告した。

Becvár (Charles Univ., Prague) は、重核の中性子捕獲によるカスケード・ガンマ線の放出をモンテカルロ法によりシミュレートする方法を提案した。この方法は、従来の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの計算方法とかなり異なり、多様なスペクトルの特徴をモデル化する可能性を与える。Jolie (Univ. of Fribourg) は、Univ. of Ghent の大強度 15 MeV linac の制動放射ガンマ線から、curved crystal とローランド円から成るスペクトロメーターを用いて tunable な単色ガンマ線を得ることが出来ることを示した。更に、このガンマ線源の重元素トモグラフィへの利用の可能性を述べた。

第 2 日目の最初の講演で、Kopecky (ECN, Petten) は、最近の実験データも考慮した E1 及び M1 ガンマ線強度関数の新しい質量依存性を与えた。統計模型計算において、従来の Brink-Axel 型の E1 強度関数は、ガンマ線イールドを過大評価するようである。Lo Iudice (Univ. of Naples) は、変形核の低励起状態 ($\sim \text{数 MeV}$) における軌道 M1 励起を QRPA を用いて統一的に記述する方法を提案した。この励起モードはシザーズ・モードと呼ばれ、アイソベクトル型の M1 モードによるものであり、スピンスピン相関を含まないのでその強度は局在する。このモードは、Lo Iudice によって互いに反対方向に回転する中性子及び陽子の二つの回転子を用いて最初に予測され、最近では IBA-2 によっても旨く記述されている。変形した重核の keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトルの中に見いだされるピグミー共鳴、特に数 MeV の励起エネルギーのところに観測されるバンプは、これまで考えられてきたような E1 巨大共鳴と結合しない E1 遷移によるものでなく、その強度の殆どはシザーズ・モードの励起によるものであろう。この観点に立って、変形核の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの精密測定は興味ある問題を提起すると思われる。Camera (Univ. of Milan) は、重イオン融合反応において観測される高エネルギーガンマ線 (10 ~ 20 MeV) の放射機構について言及した。このガンマ線は GDR の崩壊の結果として放出され、ガンマ線生成断面積及び角分布の非等方性は、回転する熱い原子核の形や構造に関する情報を与える。この場合、変形した原子核の GDR において通常観測される二つのピークは、熱的揺動により現れない。

非統計的なガンマ線放射に関しては 3 件の発表があった。その中で Kitazawa (Tokyo Institute of Technology) は、p 及び s d 殻核における非統計的なガンマ線放出の観測結

果を示した。これらの結果から、強いバレンス遷移、E1 巨大共鳴との結合による $p \rightarrow d$ 及び $d \rightarrow p$ 単一粒子遷移の遅延、共鳴状態における芯核の振動励起、回転励起、アイソベクトル型のスピン・フリップモードの励起が明らかにされた。Mengoni (ENEA) は、初期状態と終状態に対して直交した波動関数を用いて $^{12}\text{C}(n,\gamma)$ 反応に対する直接捕獲断面積を計算した。この結果は、東工大グループが観測した ^{13}C の緩く束縛された s 状態への遷移の断面積とよく一致しており、ハローを持った原子核における直接捕獲過程の振る舞いを明らかにするものであるとしている。この計算では、軽核の吸収ポテンシャルは小さいので 0 とし、模型パラメータの調整を行っていない。即ち、初期 p 波の波動関数の位相のずれは小さいので、 (n,γ) 断面積はポテンシャルの強度にあまり依存しない。しかしながら、通常、初期状態と終状態の単一粒子波動関数は直交していないので、この計算における波動関数の直交化は本質的なものではないように思われる。

次に、前平衡模型計算に関して 4 件の発表があった。Betak (Slovak Acad. Sci., Bratislava) は、角運動量保存則を考慮した前平衡エキシトン過程を含めて、14 MeV 中性子に対する生成ガンマ線スペクトルを計算した。これをスピンの依存しない前平衡過程による計算と比較すると、高エネルギー部分が強調される。Cvelbar (Univ. of Ljubljana) は、巨大共鳴領域における中性子捕獲状態からのプライマリー・ガンマ線の総和としての断面積及びカスケード・ガンマ線も含めた断面積を DSD 模型及び前平衡模型によって計算し、これらの相互の比較を行った。Herman (ENEA) は、核子捕獲によるガンマ線放出を、ハイデルベルグ・グループによって定式化された多段階複合核過程 (MSC) を用いて計算した。この計算では、一粒子励起及び集団励起 (GDR) の自由度も考慮されている。その結果、14 MeV 中性子捕獲ガンマ線スペクトルにたいする MSC の寄与は非常に小さく ($\sim 1\%$)、準直接過程 (DSD) が支配的であることが示された。また、この会議では、ガンマ線スペクトル計算における Brink の仮説の妥当性が何回か話題になったが、タム・ダンコフ近似の範囲では、この仮説は成立しているようである。

会議の最終日の実験技術及び測定に関しては 7 件の発表があった。Corvi (IRMM, Geel) は核分裂炉及び天体物理における (n,γ) 反応データに対するヨーロッパの最優先リクエストを示し、同時に即発ガンマ線の検出によって全捕獲断面積を測定する技術のレビューを行った。特に、ガンマ線スペクトルの形に依存しないガンマ線検出効率を持ち、散乱中性子に対して低い検出効率の全エネルギー検出器について重点的に述べた。Käppeler (KfK, Karlsruhe) は天体物理における keV 中性子 (3 ~ 250 keV) (n,γ) 断面積を測定するために開発した $4\pi\text{BaF}_2$ 検出器について発表した。この検出器は、42 個の BaF_2 を内径 15 cm、外径 20 cm の中空球状に組み立て、球の中心においたターゲットにコリメートしたビームを当てるようになっている。エネルギー分解能は 14.3 % で NaI(Tl) 検出器よりかなり悪いが、時間分解能が非常によく 630 ps であり、ガンマ線検

出効率は約 95 % である。この種の測定において、Igashira (Tokyo Institute of Technology) は keV 中性子領域における天体物理の基礎データとしての軽核の (n,γ) 断面積及び核分裂生成核種の (n,γ) 断面積の測定に関する東工大グループの仕事をレビューした。これらのデータは、JENDL-3.2 の核データ評価に積極的に取り入れられた。また、1-10 keV 中性子に対する (n,γ) 断面積を測定するために対になった二つの大型 NaI(Tl) 検出器から成るガンマ線検出システムを紹介した。

Nelson (LANL, Los Alamos) は WNR における 1-400 MeV の中性子に対するガンマ線生成データの測定の報告を行った。0.1-10 MeV のガンマ線観測に対しては高分解能 Ge 検出器が用いられ、ガンマ線生成断面積の測定が行われた。数 MeV-52 MeV のガンマ線に対しては BGO が用いられ、巨大共鳴領域の中性子捕獲ガンマ線の観測がなされた。特に、 $^{40}\text{Ca}(n,\gamma)$ 反応における ^{41}Ca のアイソベクトル E2 共鳴の測定では、通常の DSD 模型よりむしろ Dietrich によって提案された pure resonance model の妥当性が示された。また、40-300 MeV のガンマ線を検出するためのガンマ線望遠鏡は、最近 neutron-proton bremsstrahlung によるガンマ線の検出に用いられた。米国における中性子核データの測定活動の低下の状況の中で、WNR は実に独特な装置と方法により興味ある貴重なデータを出し続けている。Märten (IRMM, Geel) は、GELINA における ^{23}Na と ^{27}Al の共鳴領域の中性子断面積の高分解能測定について発表した。この実験では、非弾性散乱ガンマ線及び散乱中性子の両方を NE213 検出器によって観測した。非弾性散乱及び微分弾性散乱断面積は、全断面積とともに多準位 R 行列理論を用いて解析され、共鳴構造の中に door-way state を同定している。

評価に関しては 2 件の発表があった。Fu (ORNL, Oak Ridge) は ENDF/B-VI の構造材核種のガンマ線生成データの評価方法を報告した。理論計算は TNG コードを用いて行われている。Shibata (JAERI) は JENDL-3.2 に収納されているガンマ線生成データの評価方法及びベンチマークテストの結果を報告した。

応用に関しては、Petrizzi (ENEA, Frascati) は核融合実験炉 ITER を模擬した遮蔽ブランケットに対する核発熱実験の解析について報告した。また、Molnár (Hung. Acad. Sci., Budapest) は熱中性子捕獲による即発ガンマ線を利用する分析のためのガンマ線データの現状を報告した。

このほかにロシアから 6 件の講演があったが、分かり難いものが多かったので取り上げなかった。しかしながら、JINR (Dubna) の Sukhovej 及び Popov 等は中性子共鳴状態を一つの量子カオスと考えているようであり、統計的複合核状態から中性子結合エネルギー近傍のカオスを經由して低励起エネルギー状態における原子核の秩序化が達成されると想定している。また、このような考えに基づいて重核の共鳴領域からのカスケード・ガンマ線遷移の系統性を調べている。これらの仕事の今後の展開が期待される。

これまで述べてきたように、この専門家会議では原子核ガンマ線生成データに関する興味ある基礎的な問題提起が多く、活発な討論が交わされた。地の利を生かしてヨーロッパ近隣諸国のこの分野の専門家が一堂に会したためであろうが、日本の核データ・コミュニティの今後の活動の在り方にも参考になろうと思われる。