

複合粒子生成のための核内カスケードモデルの改良

日本原子力研究開発機構
核変換工学技術開発グループ
岩元 大樹
iwamoto.hiroki@jaea.go.jp

1. はじめに

現在、私は九州大学を卒業し、加速器駆動システム (ADS: Accelerator Driven System) による長寿命放射性核種の核変換に関する研究開発を行っている。表題とは異なる研究に従事しているが、原稿の依頼を受けたので、これを機会に、九州大学大学院在籍時に行った研究について簡単に紹介したい。

2. INC について

核内カスケード (INC: IntraNuclear Cascade) の歴史は長い。歴史を紐解くと、古くは 1950 年代の Metropolis らによる研究まで遡ることができる。彼らの著書[1]を読むと、INC の骨格はこのころ既に完成していたようだ。

核内カスケード (INC) モデルとは、「原子核を核子の集合体とみなし、原子核反応は核子同士の二体衝突の重ね合わせで記述できる」という仮定に基づいたモデルである。と言っても、いまいち解りにくいかもしれない。これは、以下に述べるビリヤードの衝突をイメージすると解りやすい。

まず、ビリヤード台の上に大きく円を描く。そして、ビリヤードの球をその中に複数個ランダムに置いておき、ある程度離れた所から、これらの集まり目掛けて球を勢いよく打ち込む。打ち込まれた球は円内のどれか 1 個の球と衝突し (二体衝突)、弾かれた球は近くに置かれた球と次々と衝突を繰り返していくはずだ。弾かれた球のなかには、円の枠線を越えて飛び出ていくものもあるだろう。

INC は、この一連の過程をモンテカルロ法を用いて忠実にシミュレーションするモデルである、と言っても過言ではない。このとき、円の外に飛び出た球が、核反応から放

出された核子、すなわち放出粒子に相当する。円内に置かれた球は核内核子に相当し、これらの球の集合または円が原子核に相当する。最初には打ち込まれた球は入射粒子である。

図 1 は、実際の INC 計算で、入射陽子が ^{40}Ca 原子核に衝突する直前の様子を示したものである。図では 3 次元的に核子が配置されたものを 2 次元に投影してある。もちろん実際には、核子の運動を相対論的に取り扱う必要があること、原子核は密度分布と運動量分布を持って存在していること、パウリ原理を考慮しなければならないこと、核子と核子の衝突の断面積は入射エネルギー

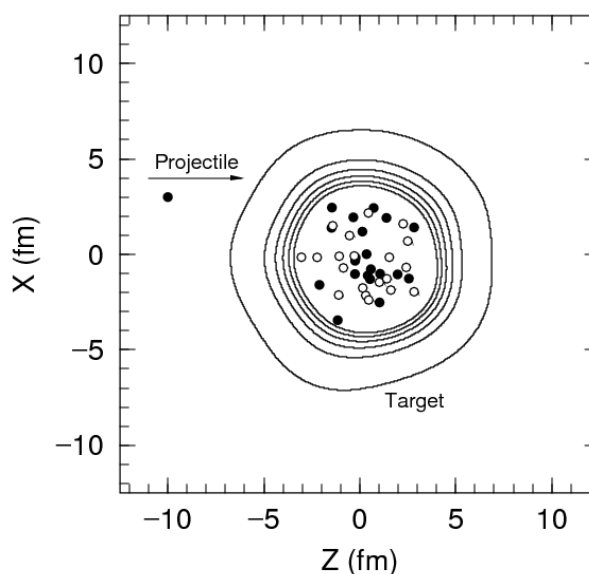


図 1 INC モデルによって入射粒子が原子核に衝突する様子。イベント毎に核内核子の位置と運動量、入射粒子の衝突係数はランダムに決定される。

に依存すること、エネルギーが高くなると Δ 粒子や π 中間子などの生成も考慮しなければならないこと等々…、その描象はもう少し複雑であるが、基本的にはビリヤード衝突のようなイメージで大方間違っていない。

3. INC の欠陥

さて、上のビリヤードの例で、球と球同士が衝突した後に、二つの球がくっつき合うといった現象は起こり得るだろうか？ 言うまでもなく、このような現象は、少なくともビリヤードでは絶対に起こらない。容易に想像できるように、これは INC にも同じことが言える。すなわち、通常の INC モデルでは、核反応から放出される粒子は必ず単一の核子であって、重陽子などの複合粒子が生成・放出されることは絶対に起こり得ない。

ご存知のように、実際の核反応では、中性子や陽子などの単一の核子だけでなく重陽子やヘリウムなどの複合粒子が放出される。まさにこれが、現状における INC の最大の欠陥となっている。

4. QMD について

INC の枠組みで複合粒子生成のメカニズムを組み込むには、どのような方法が考えられるだろうか。解決策の一つとして次の方法が考えられるだろう。

「二体相互作用 (interaction)、すなわち核子間の引力を考慮したうえでカスケード計算をさせる。引力を与えることによって核子同士は互いに引き合い、複合粒子となって放

出されるはずである。」

このように、INC モデルに二体相互作用を考慮して量子論的色彩を持たせたものは、量子分子動力学 (QMD: Quantum Molecular Dynamics、以下 QMD と略す) [2] と呼ばれる。QMD は、適切な二体相互作用パラメータを与えることによって擬似的ではあるが、安定な原子核 (基底状態) を作る事が可能である。

それではこの QMD を使えば、複合粒子の生成も説明できるのではないかと期待されるだろう。事実、上で述べた予想の通り、QMD

を使って、複合粒子の生成を記述することは原理的には可能であり、QMD 計算でも複合粒子は生成される。ところが図 2 を見てもわかるように、QMD は実験値を大幅に過小評価することが知られている。これは、複合粒子生成を再現できる厳密な二体相互作用のパラメータセットを得ることが難しいためである。

ここで、そもそもそのような都合の良い二体相互作用のパラメータは実際に存在するのか、といった疑問が生じる。QMD は、量子論的色彩を含んでいるとはいえ、その運動方程式は古典的運動方程式に支配されており、量子論的には何ら正当化することはできない。更に、QMD は計算時間という問題も孕んでいる。よく知られているように、QMD は INC に比べて多大な計算時間を要する。これは、相互作用が組み込まれているために、運動方程式を解くのに膨大な時間が費やされるためである。

このように、QMD は、相互作用を取り入れている点においては、INC よりも一歩進んだモデルと言えるものの、理論的には必ずしも正当性が十分に保証されたモデルとは言いがたいのが現状である。また、遮蔽設計や線量評価などの工学利用を考えると、QMD は不利なモデルであると言わざるを得ない。

そこで私達は、QMD のような相互作用を用いたアプローチよりも、従来のカスケード計算に立ち返って、複合粒子生成のメカニズムを INC に組み込んでいくほうが、理論面においても計算時間の面においても極めて有利であると考え、複合粒子生成も計算できる INC コードの開発に着手した。

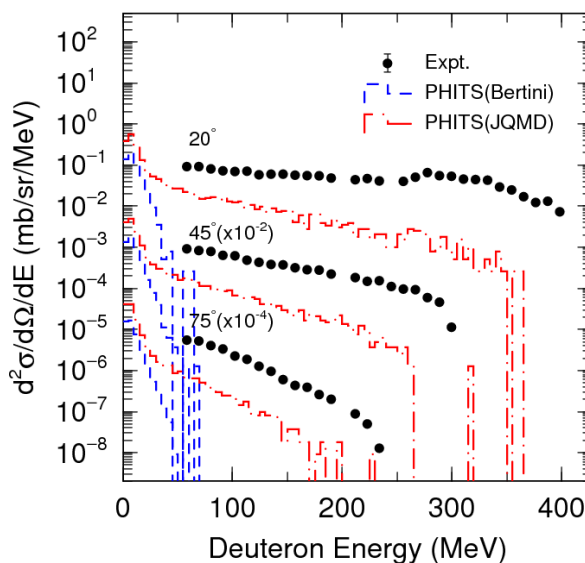


図2 重陽子スペクトルの実験値と計算値 (Bertini INC、JQMD) との比較。JQMDは、実験値を大幅に過小評価している。

5. 複合粒子生成 INC コードの開発

前述したように、INC は歴史の長いモデルであり、これまでも、INC モデルに複合粒子生成のメカニズムを組み込む試みは行われている。いくつか例を挙げよう。Mashnik 氏等[3]は、核内カスケード過程とそれに続いて起こる複合核過程（蒸発・核分裂過程）との間に、前平衡過程（励起子模型）を新たに組み込むことによって複合粒子生成を記述するモデル（CEM: Cascade Exciton Model）を開発した。このモデルは、3つの過程（段階）を経ることから“3段階モデル”とも呼ばれている。しかしながら、この3段階モデルには多くの問題点が指摘されており、その正当性は極めて疑問である。また Boudard 氏等[4]は、核子が原子核から放出される際に、核表面付近の核子をコアレッセンス（結合）させるモデル（表面コアレッセンスモデル）を提唱した。ところが、彼らのモデルだけでは精度において不十分で、新たなモデルを追加する必要性が指摘されている。このように、長い歴史にもかかわらず、INC に複合粒子生成のメカニズムを組み込む試みは、いまだに発展途上であるのが現状である。

本研究で開発した複合粒子生成モデルは、「表面コアレッセンスモデル」と「ノックアウトモデル」の組み合わせモデルである。詳細は著者の学位論文を参照[5]していただくとして、ここでは簡単な説明にとどめる。

複合粒子生成 INC コードの開発に当たっては、カスケード計算に関する研究室代々のノウハウを受け継ぎながら[6]、著者が独自に INC コードを作成し、従来の核子生成スペクトルの妥当性を確認したうえで、複合粒子生成メカニズムを組み込んでいる。したがって、従来の INC 計算による核子生成スペクトルの結果も、他のカスケードモデルの結果と比較して全く遜色はない。表面コアレッセンスモデルは、上で述べた Boudard 氏等の論文[4]を参考にして作成し、著者が開発した従来型 INC コードに組み込んだ。ノックアウトモデルは、現象としては既に様々な核反応実験で確認されているものの、INC モデルに組み込んだ例はない。そこで本研究では、ノックアウトモデルを独自に開発し、このモデルも表面コアレッセンスモデルと組み合わせて INC コードに組み込んだ。

6. 計算結果及び考察

複合粒子生成二重微分断面積の一例を図 3 に示す。ここで、図に示されている Bertini モデルとは、PHITS や MCNPX などに標準的に用いられている高エネルギー核反応モデルである。Bertini モデルは従来の INC モデルに基づいたモデルであるため、そもそも複合粒子生成を計算することができない。低エネルギー付近に見られる青線で描かれたスペクトルは、カスケード計算終了後に引き続いて計算される統計崩壊計算によって生成される粒子のスペクトルであり、カスケード計算によるスペクトルではないことに注意していただきたい。この図より、本研究で開発したモデルと Bertini モデルの違いは一目瞭然であり、我々のモデルの方が実験値を飛躍的によく再現していることがわかる。

100 MeV から 400 MeV までの入射粒子エネルギーで複合粒子生成二重微分断面積を比較した結果、我々が開発したコードは、中性子や陽子の単一核子だけでなく、重陽子、三重陽子、ヘリウム-3 に対しても、軽い核 (^{12}C) から重い核 (^{209}Bi) までの広範囲の標的核に対して、実験値を良好に再現することが判明した。これらの結果は、文献[5]を参照していただきたい。

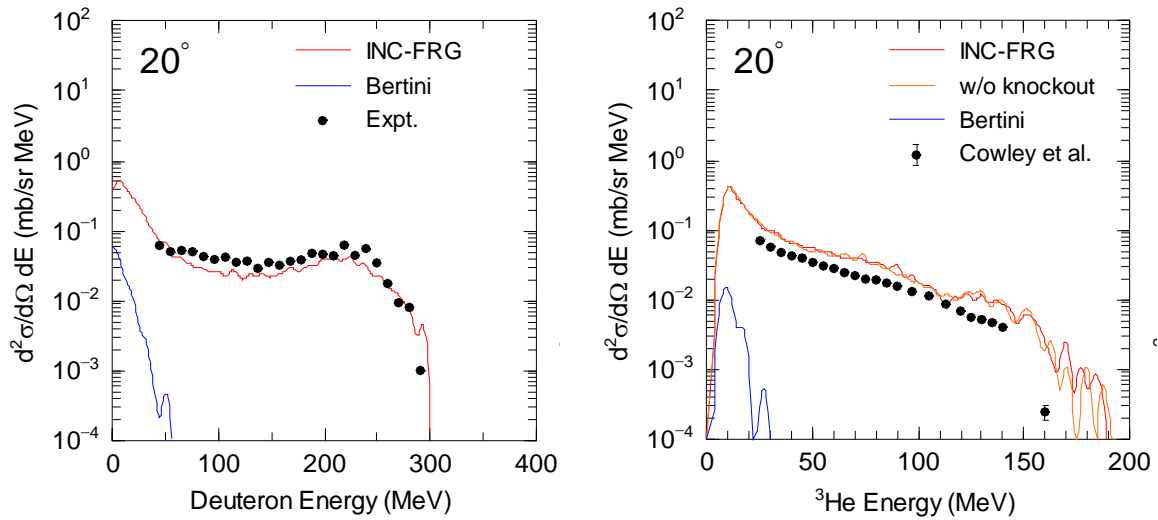


図 3 $p(300 \text{ MeV}) + ^{12}\text{C}$ における重陽子生成二重微分断面積 (左図) と $p(160 \text{ MeV}) + ^{59}\text{Co}$ における ^3He 生成二重微分断面積 (右図)

図 4 は、180 MeV 陽子入射による ^{27}Al から生成される核種の質量数分布を示したものである。ここで、カスケード過程に引き続いて起こる蒸発・核分裂過程の統計崩壊計算

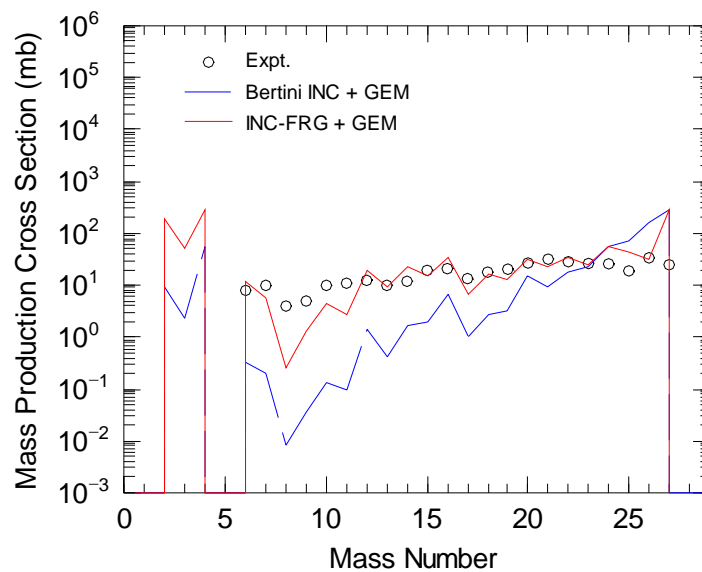


図 4 $p(180 \text{ MeV}) + ^{27}\text{Al}$ 反応における生成核種質量数分布の実験値と計算値の比較

は、一般化蒸発モデル (GEM: Generalized Evaporation Model) [7]を用いている。同一の統計崩壊コードを用いているにもかかわらず、本研究で開発したモデルと Bertini モデルで違いが見られるのは、カスケード計算によって計算される高励起原子核の情報が両モデルで異なってくるためである。

7. まとめと今後の課題

研究では、従来型の INC モデルで複合粒子生成をも計算できるように、モデルの改良を行なった。モデルの改良の結果、核子数 3 までの放出粒子に対して、実験値をこれまでよりも飛躍的に精度よく再現できることが判明した。しかしながら、 α 粒子に対しては、実験値を過小評価することもわかってきた。今後は、放出核子の種類を α 粒子、Li、Beなどのさらに重い粒子にまで拡張し、計算モデルを高度化していく必要がある。しかし、モデルを高度化するには、重い放出粒子に対する実験データが極めて少ないのが現状である。計算モデル構築のためには、荷電粒子生成に関する系統的な実験データを蓄積していくことが極めて重要である。

核反応による粒子や核種の生成量、エネルギースペクトルを正確に予測できる核反応モデルが実現すれば、原子力分野のみならず、医療、宇宙工学の分野にも貢献が期待されるが、その予測精度は十分ではないのが現状である。このような意味でも、この研究分野は未だに発展途上であり、今後の進展に期待が持てる分野である。

8. 最後に

冒頭で述べたとおり、平成 22 年度から著者は、日本原子力研究開発機構 核変換工学技術開発グループに所属することになり、ADS を用いた核変換処理技術の研究開発に従事することになった。学生時代の研究で培った知識や技術が今後の研究の架け橋になり、長寿命核廃棄物の核変換システム実現への一助となれば男子の本懐である。

謝辞

本研究は、著者が九州大学時代に博士課程研究として行ったものです。指導教員であられました魚住裕介准教授に深く感謝の意を申し上げます。また、著者は日本学術振興会 特別研究員 (DC2) として支援を受けましたこと、この場にて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] N. Metropolis, R. Bivins, and M. Storm, “Monte Carlo Calculations on Intranuclear Cascades. I. Low-Energy Studies”, Phys. Rev. **110**, 185 (1958).
- [2] K. Niita, S. Chiba, T. Maruyama, T. Maruyama, H. Takada, T. Fukahori, Y. Nakahara, and A. Iwamoto, “Analysis of the (N,xN) reactions by quantum molecular dynamics plus statistical

- decay model”, *Phys. Rev. C* **52**, 2620 (1995).
- [3] S. G. Mashnik, “Neutron-induced particle production in the cumulative and non cumulative regions at intermediate energies”, *Nucl. Phys.* **A568**, 703 (1994).
- [4] A. Boudard, J. Cugnon, S. Leray, and C. Volant, “A new model for production of fast light clusters in spallation reactions”, *Nucl. Phys.* **A740**, 195 (2004).
- [5] 岩元大樹、「核内カスケード模型への核子間相関の組み込み」、博士学位論文、九州大学 (2010)
- [6] T. Kin, F. Saiho, S. Hohara, K. Ikeda, K. Ichikawa, Y. Yamashita, M. Imamura, G. Wakabayashi, N. Ikeda, Y. Uozumi, M. Matoba, M. Nakano, and N. Koori, “Proton production cross sections for 300- and 392-MeV protons on carbon, aluminium, and niobium,” *Phys. Rev. C* **72**, 014606 (2005).
- [7] S. Furihata, K. Niita, S. Meigo, Y. Ikeda, and F. Maekawa, “The GEM code – A Simulation Program for the Evaporation and the Fission Process of an Excited Nucleus –,” *JAERI-Data/Code*, 2001-015 (2001).