

# ハドロン多体系とシミュレーション



ハドロン輸送研究グループ ■ 岩本 昭 ■

## 1. はじめに

我々のハドロン輸送研究グループは、「微視的シミュレーションによるハドロン輸送の研究」というテーマ名の下に平成5年4月に、原研先端基礎研究センターの第一期スタートのグループの一つとして発足した。発足当時は職員3名、専門研究員1名の陣容で、全員原子核物理の理論的研究に従事した。グループの目標としては、当時その有効性が確かめられつつあった微視的なシミュレーションによる原子核の構造及び反応の研究を、独自の観点から推進する事を掲げた。伊達センター長を迎えて先端基礎研究センターが正式にスタートした時点で、センター長より全てのグループはあくまで基礎研究を集中して行うとの指導方針が示された。当初は従来の原研的な予算獲得のための慣用語（必ず何か実用的な研究に結びつけないとお金をつかない）との落差に戸惑いがあり、“計算コードの作成”という表現が原因で1枚か2枚かのイエローカードをセンター長から頂いた。そのため当時はグループの存続を危惧すべき状態もあったが、それをかろうじて乗り越え、基本方針として、低エネルギー現象にも有効な程に精密な微視的シミュレーションモデルを構築して、それをを用いて新現象の解明を目指すこととした。

## 2. 研究の経過

当初の目標として、軽イオン反応及び重イオン反応どちらへも共通に使い、また広いエネルギー領域に通

して使える信頼性の高いシミュレーションコードを構築することとした。モデルとして量子分子動力学法（QMD法）を採用して、膨大な数値実験の結果前述した条件を満たすパラメータセットを確定するに至った<sup>1)</sup>。このモデルでは、核物質の満たす様々な制限条件や、相対論の要請を出来るだけ満たすような工夫がなされ、入射エネルギーが数十MeVから数GeV、軽い核から重い核までの非常に広い条件下で予言力を持つモデルに仕上がった。これを用いて行った研究は、従来QMD法によるきちんとした解析がなされていなかった軽イオン反応での前平衡過程ないしは多段階過程と呼ばれる、単純な直接過程と複合核過程の中間に位置して従来の原子核理論での扱いが最も困難な部分を主な対象とした。この結果、従来のシミュレーションモデルで扱うカスケード過程と前平衡過程の2者を含めた反応過程を、QMDモデルが再現可能であることを示すことが出来た。ここを出発点として、QMDモデルと統計崩壊モデルを結合したモデルを構築して、軽イオン反応のうち動学的であり且つ非常に複雑な反応の反応機構に関する幾つかの問題を解決した。この軽イオン反応に関しては、他のモデルと比較しても我々のモデルがその記述の正確さと計算の容易さにおいて、際だって良い結果を与えている。この研究の一例として図1に示したのは入射エネルギーが160MeVの陽子がジルコニウム標的核に入射した場合に、放出される陽子のエネルギー毎の角分布を示したもので、実線で示したQMDの計算値は黒丸の実験値を非常に良く再現している<sup>2)</sup>。この様に、なんらパラメータを調節せずに、複雑な多段階過程の断面積を合わせることは今までの

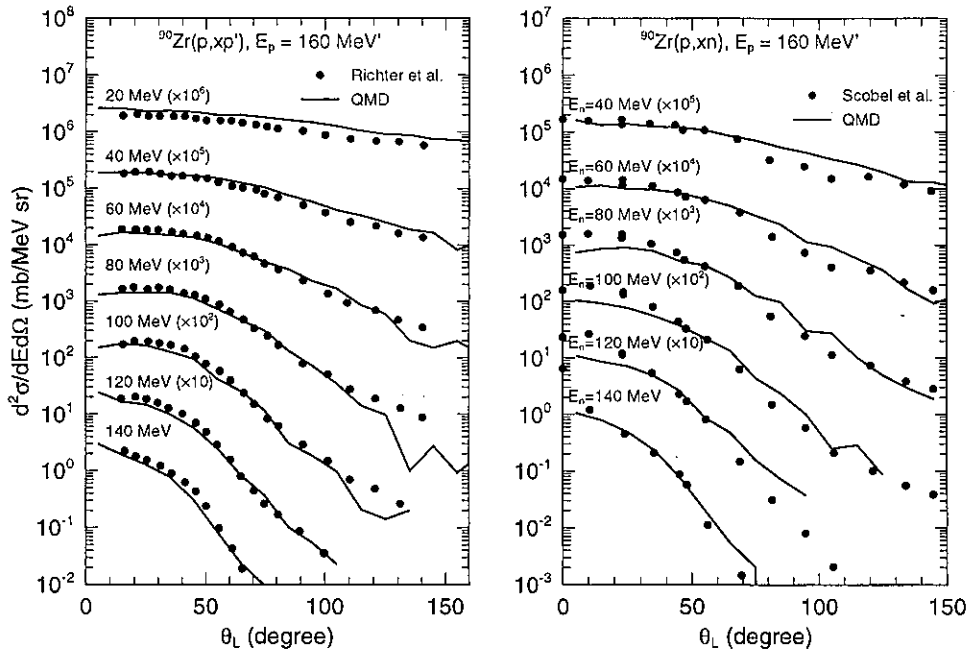


図1 入射エネルギーが160MeVの陽子がジルコニウム標的核に入射した場合に、放出された陽子の放出エネルギー毎の角分布を示す。

模型では考えられなかった。

前述のQMD模型はいわゆる標準的な模型であったが、これを拡張する研究も当初から現在に至るまで続けられた。この観点で特に成果が得られたのは、EQMD模型と名付けた模型の開発で、量子力学効果によるパトリポテンシャルを導入するほか、基底にとるガウス波束の幅をも力学変数とする模型であり、その徹底的な性質の解明は原研グループにより初めて行われた<sup>3)</sup>。模型の拡張の観点では、更に高いエネルギーへの拡張も行われ、RQMD模型による重イオン反応計算コードに関する改良や多数の共鳴状態を導入する計算コードの拡張を行い、それぞれ重イオン反応の解析研究に用いた。更に高いエネルギーへの展開は、QGP(クオーク・グルオンプラズマ)状態の探索に絡んで重要な課題であり、この領域の物理を研究すべくクオークの自由度に基づいたシミュレーションコードの開発をここ1年間に渡り行い、第一段階のコードを完成させることが出来た。

研究対象としては、軽イオン入射前平衡過程の研究が一段落する頃から核反応でのフラグメンテーションの研究を開始した。軽イオン入射の場合にはある条件が満たされると、標的核の中心に穴が空くといった現

象が計算で見つかり“金環食”原子核と名付けられた<sup>4)</sup>。一方非常に重い重イオン同士の衝突の結果生じるフラグメンテーションの計算からは実験値の多重度を説明することが困難である事が分かり、更なる模型の拡張の必要性が認識された。

このフラグメンテーションの計算とほぼ同時期より、ブラソフ方程式を基にした自発核分裂及びサブバリアー核融合の研究を開始した。これはいわゆるトンネル過程を多体論的にシミュレーションで計算するという非常に大胆な試みであり、それ故にまだ厳密には定式化できていない部分を含む模型である。特に核分裂に関しては難しい点も多かったが、計算結果は自発核分裂の過程を目に見える形で提示している。サブバリアー核融合の計算に於いては融合する2核の間の核子交換流の重要性を指摘するなど、重い核の量子トンネル過程を初めて計算した点で意義あろうと考える<sup>5)</sup>。このほか、シミュレーション計算はまだされていないが、より現象論的な模型で超重核合成に関する変形核同士の組み合わせを提案して<sup>6)</sup>、原研の実験グループによるこの現象の研究が始まった。

ごく最近になって成果がまとめられたものとして、中性子星表面の核物質の存在形態に関する研究があ

る<sup>7)</sup>。これはパウリポテンシャルと運動量依存力を導入した QMD 模型によって飽和密度以下の核物質の計算をしたところ、一様な核物質ではなくて不均一にクラスター化された核物質がエネルギー最低状態として得られた。この現象は中性子星表面での状態として予想されていたものに対応することが認識され、精力的な計算を行いこの現象を追求した。その結果、以前行われた簡単な模型での予言を定性的には再現するが、一方水玉状態の核物質から円柱状態の核物質への相転移付近では両者が混じったような状態が得られる等、新しい事実が幾つか見つかった。図 2 に示したのは標準核物質密度の 10% の密度で、質量数に対する陽子数が 19.5% (左図) 及び 39.1% (右図) にした場合の構造変化を示す。陽子の数が少ないときにはバラバラでガス状であったものが、陽子数が増えるに連れて原子核状のものが生成されることが示されている。一方、ここまで為された我々の計算も幾つかの限界を含んでおり、将来更に大規模な計算が必要となることも強く認識された。これらのことに鑑みて、このテーマを中心に第 2 期の先端基礎研究センターの新テーマを立ち上げる運びとなり、現在「極限条件におけるハドロン科学の研究」のテーマで研究が継続されつつある。

### 3. おわりに

基礎研究センターに関する感想を一言で言うと、理論グループが独立して基礎研究に集中出来た、初めての貴重で楽しい 5 年間であった。

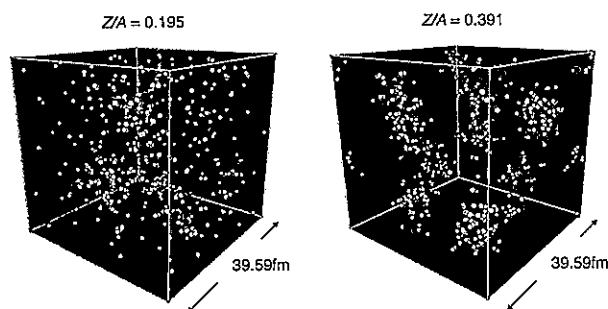


図 2 標準核物質密度の 10% の密度での核物質の基底状態を、全質量数に対する陽子数が 19.5% (左図) と 39.1% (右図) の場合につき示したものの。

### 参考文献

- 1) K. Niita, S. Chiba, T. Maruyama(敏), T. Maruyama(智), H. Takada, T. Fukahori, Y. Nakahara and A. Iwamoto, Phys. Rev. C52 (1995) pp. 2620-2635.
- 2) S. Chiba, M. B. Chadwick, K. Niita, T. Maruyama(敏), T. Maruyama(智) and A. Iwamoto, Phys. Rev. C53 (1996) pp. 1824-1832.
- 3) T. Maruyama(敏), K. Niita and A. Iwamoto, Phys. Rev. C53 (1996) pp. 297-304.
- 4) T. Maruyama(智), 基礎科学ノート Vol.3, No.2 (1996) pp. 22-24
- 5) A. Iwamoto, 基礎科学ノート Vol.5, No.1 (1998) pp. 10-13.
- 6) A. Iwamoto, P. Moller, J. R. Nix and H. Sagawa, Nucl. Phys. A596 (1996) pp. 329-354.
- 7) T. Maruyama(敏), K. Niita, K. Oyamatsu T. Maruyama(智), S. Chiba and A. Iwamoto, Phys. Rev. C57 (1998) pp. 655-665.