

■ハドロン多体系の反応 —シミュレーションによる複雑現象の解明

ハドロン輸送研究グループ

■岩 本

昭 ■

Reactions of Hadronic Many-Body System —Simulation Study of Complex System

Akira IWAMOTO

Research Group for Hadron Transport Theory

A recent progress in theoretical study of nuclear reaction which was brought about by simulation of hadronic many-body system is given. Improvement of the model called "quantum molecular dynamics" which is being done in JAERI is discussed. The model calculations on some heavy- and light-ion reactions are shown and importance of simulation study in basic nuclear physics is described.

陽子・中性子やパイ中間子など、強い相互作用をする粒子を総称してハドロンと呼ぶ。ハドロン自身はクオーカーとグルオンより構成されている複合粒子であるため、ハドロン同士の間に働く強い相互作用は電磁的な力とくらべてはるかに複雑である。そのハドロンが数十、数百と集まつたものが原子核であるので、それがかなりやっかいな研究対象であることは容易に想像できるであろう。実際、本質的に複雑な現象、特に原子核同士の激しい衝突現象とか、逆に非常に低エネルギー衝突で量子多体系の性質があらわになる反応過程の場合には、直接反応、複合核反応等、今までに開発されてきた基本的な理論形式では十分な計算ができなかった。なぜならば、相互作用が複雑である以外それらの反応では、1) 系の自由度が大きくそれらをあらわに扱うことが困難である一方、物性物理で用いるような無限系の扱いは成立しない、2) 系が量子的なサイズであり表面の効果が重要で、非線形性が著しい、3) 反応時間が短いために定常状態を基にした理論やマルコフ近似が成立しない、等の性質を持つからであ

る。

最近、これらの困難のかなりの部分を一挙にクリア出来そうな理論形式が生まれつつある。これは分子動力学の考えに基づいた微視的シミュレーションの手法であり、QMD(量子分子動分学)法¹⁾及び関連した手法群を指す。ここでは原子核を構成する全陽子、全中性子の運動を連立して時間的に解いてゆく。特徴は複数のハドロンが自己無撞着的に結合して一体場を作りその結果クラスター(原子核)を自ら作ること、それと同時に一体場に含まれないハドロン・ハドロン散乱の効果を取り入れていることである。この点で古典的なカスケード計算とは本質的に違い、低エネルギーから高エネルギー反応、軽イオン反応から重イオン反応、またフラグメント放出が計算可能な枠組みとなりうる。

ここで一つの具体的な現象を見てみよう。図1に示すのは中・高エネルギー重イオン反応で古くから想定されている、『関与者-傍観者』反応と呼ばれる反応である。名前の由来は、二つの原子核の重なり合う部

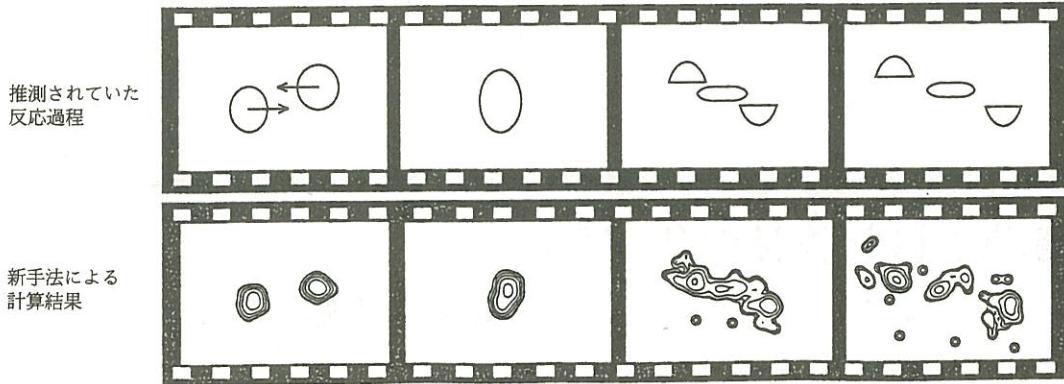


図1 〈関与者-傍観者〉反応の概念図(上)と、QMD模型による計算例。計算は核子当たり100MeVの入射エネルギーでの $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 反応に対して行った。

分は強く反応するが(関与者)，それ以外の部分はほとんど瞬間に千切れで自由に飛び去る(傍観者)という反応機構が定性的に想定されていたことによる。この反応過程を2つの ^{40}Ca の衝突の場合に適用し，QMD法により計算した結果が下の図に示されている。概念図の様な単純な反応でなしに，二つの原子核が非常に大きく複雑に変形して核子または種々のクラスターを放出していく様子が分かる。この関与者-傍観者反応を始めとするフラグメンテーション反応は未知の部分が多いが，分子動力学的手法によりその全貌が明らかになると期待される。

非常に低エネルギーでの重イオン反応でも，色々不思議な現象が存在する。例えば重イオン同士の核融合反応を考えてみよう。非常に重い重イオン同士の核融合断面積は，通常の核融合をうまく記述出来る模型計算に比べて，異常な減少を示す。このエキストラップッシュと呼ばれる現象は，超重核を重イオン反応により合成する場合の，もっとも大きな障害として立ちはだかるやっかいな現象である。しかしながらそのようなことが生じるかについては，今まで現象論以外は全く手付かずの状態である。これをQMDにより微視的・多体論的に説明できれば，ゆくゆくは超重核合成への新たな提言に結びつかぬとも限らない。

以上に，中・高エネルギーと低エネルギーの興味深い現象の例を述べたが，これらの問い合わせに決定的な回答を与えるためには，現在までに開発されたQMDコードでは不十分である。低いエネルギー現象やクラスター放出反応を正確に計算するためには，非常に良い基底状態の波動関数が不可欠である。我々は過去1年間の研究により，パウリ効果等の量子効果を取り入れる手法を開発し，また基礎にとる波束の幅を可変にする定式化を行った²⁾。この結果，非常に正確な基底

状態の波動関数を得る見通しが立った。例えば，図2に示すのはこの手法により得られた ^{12}C の基底状態の密度分布である。量子力学的效果として現れる3つのアルファー粒子構造がQMD模型により初めて再現できた。核子入射の核反応に対する研究も行っているが，QMDは自己無撞着な一体場が自然に入る枠組みであるため，特別な拡張を導入する前の模型でも特に後方角で著しい改善が得られる。この例が古典的カスケード模型との対応で，図3に与えられている³⁾。しかしより低エネルギー現象や準弾性散乱では量子効果が重要になり，より良い波動関数が是非とも必要となる。このため拡張されたQMDによる核子入射反応の研究が進行中である。

このように，我々のQMD模型に基づく研究は新しい結果をちらほら出しつつあるが，今後の研究において先に述べたような，フラグメンテーションの物理の解明，エキストラップッシュ現象の理解等，核反応のなかでも非常にエキゾチックで現在不可解であるとみなされている現象解明を目指してゆきたい。この研究を通して，今後今以上に重要な課題になるであろう，小

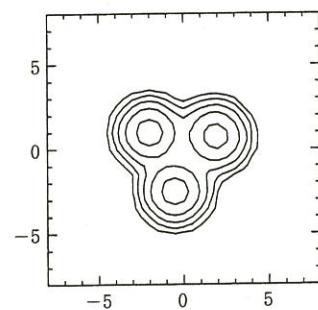


図2 ^{12}C の基底状態の密度分布を，拡張されたQMD模型により計算したもの。

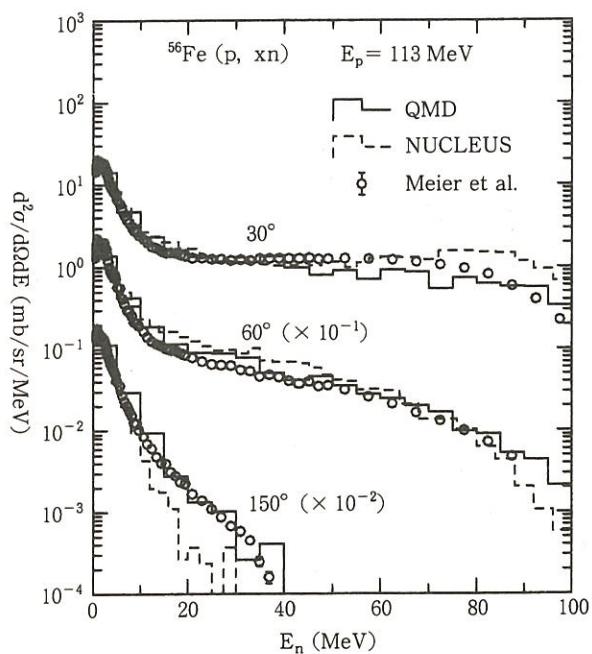


図 3 113MeV の入射エネルギー陽子を ^{56}Fe に
入射した際、放出される中性子の断面積
をその放出角度・放出エネルギー毎に示す。
QMD による計算値（実線）、古典的
カスケード模型による計算値（破線）を、
実験データ（白丸）と比較したもの。

数多体系の物理（核物理、マイクロクラスター物理、メゾスコピック系の物理等）に新たな視点を与えることが出来ると考えている。

参考文献

- 1) Aichelin, J., Phys. Rep. 202, 233 (1991) 及び引用文献.
- 2) Maruyama, T., Niita, K. and Iwamoto, A., Proc. Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanism, Varenna, Italy (1994) 印刷中.
- 3) Chiba, S., Fukahori, T., Takada, H., Maruyama, T., Niita, K. and Iwamoto, A., Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Gatlinburg, USA (1994) 印刷中.

