

核データ評価システムとしての微視的シミュレーション

大西 明
北海道大学理学部物理

Microscopic Simulation of Nuclear Reaction as a Tool to Evaluate Nuclear Data

Akira OHNISHI
Dept. of Phys., Fac. of Sci.
Hokkaido Univ.

Abstract:

The utility of microscopic simulation methods is discussed in connection with the nuclear data evaluation. Some examples of their application are presented.

1. はじめに

NRDFにおける核データ活動は現在のところデータの採録と参照を目的としているが、一般には核データ活動のもう一つの柱として核データの評価がある。例えば 50 MeV 以下の中性子入射反応については、国内でも JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) と呼ばれる評価済み核データライブラリが存在し、原子炉の設計におけるベンチマークテストなどに利用されている [1]。こうした核データの評価は実用利用されるため、1% 以下といった非常に高い精度を要求される場合も多い。このため、その発展の歴史は原子核物理の立場から見ても非常に興味深い。例えば、最近公開された JENDL-3.2 では、

1. 重い原子核の共鳴に関しては、共鳴間の干渉を無視した Breit-Wigner 公式から多順位間の干渉を考慮に入れた Reich-Moore 公式の利用へと発展している、
2. $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ などの反応に関して、単純な蒸発模型による評価から、前平衡過程を考慮に入れた計算へと発展している、

といったように、低エネルギー領域での原子核物理学の発展と蓄積をふまえて、精度の良い核データの評価を行っている。

さて、これよりも高いエネルギー領域での荷電粒子反応に目を移してみよう。こうした反応のうち例えば (p, p') 反応を考えてみると、放出される陽子のエネルギー領域で分類して、弾性散乱、直接反応、準弾性散乱、前平衡過程、複合核過程、と様々な過程が現われる。これらの過程のうち、関与する自由度の少ない過程 — 弾性散乱、直接反応など — は、量子力学的・微視的な理解が進みつつある。特に陽子の弾性散乱についてはその光学ポテンシャルが広い範囲の標的核とエネルギー領域にたいして研究・蓄積されており、前述の低エネルギー中性子入射反応のような精度の高い評価をする段階には至りつつあるといえる。しかしながら関与する自由度が大きい熱的に非平衡な反応、つまり多自由度の動力学的な理解が必要な反応については未だにその反応機構についての議論が尽きていない。

こうした複雑な反応、特に重イオン反応などで最近しばしば用いられているのが Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) model [2] や Quantum Molecular Dynamics

(QMD) [3]などに代表される微視的なシミュレーションである。こうした模型では、平均場内での核子の運動と Pauli blocking を考慮した 2 体衝突を取り入れており、(半)古典的な近似のもとで多自由度の関与する反応の動力学的な記述を可能にしている。これらの微視的なシミュレーションの長所としては、

1. 平均場と 2 体衝突という低エネルギー・高エネルギーでそれぞれ重要となる 2 つの要素を取り入れており、広いエネルギー領域にわたる反応を記述できる、
2. 核子レベルからの微視的な記述であるため、多様な終状態の記述が可能である、
3. 反応機構についての仮定をおかないため、エネルギー・衝突径数による反応機構の移り変わりについて議論できる、

などの点があり、物理の面のみでなく核データの評価という立場から見ても、少なくとも一次近似の答えは与えてくれると期待できる。実際、中性子入射の反応でも放出される粒子のエネルギースペクトルの核データを評価する上で、前平衡過程・統計過程の前に核間カスケード模型(平均場、パウリ排他律の効果を無視した微視的シミュレーション)が用いられており、今後は平均場・パウリ排他律の効果をとり入れた理論の適用が期待されている。

さて、この報告ではこのような微視的なシミュレーションから得られる結果の例として、重イオン反応の全反応断面積と、ハイパー核の生成断面積についての最近の研究結果を紹介する。これらは、微視的なシミュレーションのうち、反対称化された波動関数に基づく Antisymmetrized Molecular Dynamics(AMD) [4]を用いたものである。こうした研究は微視的なシミュレーションの適用例のごく一部であり、より広い範囲での適用例は Ref. [2, 3, 4]を参照されたい。

2. 重イオン反応の全反応断面積

全反応断面積は、核反応における最も基本的な物理量の一つである。低エネルギー領域においては、その振る舞いはクーロン障壁と共鳴により支配されているが、フェルミエネルギーと同程度、あるいはそれ以上の入射エネルギー領域になると 2 核子衝突の積み重ねで説明でき、また、更に高いエネルギー領域では幾何学的な断面積で説明できることが知られている。例えば、原子核間の相対運動を直線運動と仮定し、2 核子衝突の積み重ねで反応を記述する Glauber model (の光学極限)は数 MeV/A から数 GeV/A までの非常に広範囲のエネルギー領域にわたってうまく実験値を再現する [5]。これらの事実は、微視的な理解の立場からすれば非常に不思議である。通常理解では低エネルギー領域での反応は平均場による記述が良いと考えられているが、これは 2 核子衝突がパウリの排他律によって禁止され平均自由行程が長くなることによる。つまり、平均場とパウリ排他律の効果は決して無視できないものであるにもかかわらず、これら無視した理論により説明できていることになるのである。

我々はこの問題を理解するため、AMD をもちいて全反応断面積にたいする平均場(この場合には核間相互作用)とパウリ排他律の効果を調べた [6]。まず、グラウバー模型の光学極限では、全反応断面積は次のように与えられる。

$$\sigma_{tot} = \int d^2b [1 - \exp(-\langle N_{coll} \rangle)] .$$

ここで $\langle N_{coll} \rangle$ は、衝突径数を与えた場合の 2 核子衝突回数の期待値である。グラウバー模型では原子核間の相対運動を直線であると仮定してこの期待値を計算するが、こ

ここでは AMD の与える核間相対運動の軌道上でパウリ排他律を考慮してこの期待値を求める。

結果を Fig.1 に示す。点線・実線は、それぞれ直線軌道・核間ポテンシャルを考慮した軌道のもとで 2 核子衝突を計算して得られた結果であり、それぞれについてパウリ排他律を考慮した場合、しなかった場合の 2 通りの結果を示している。通常のグラウバー模型の結果は直線軌道でパウリ排他律を考慮しない場合に対応している (上側の点線)。またここでの AMD による最終的な結果は、核間ポテンシャルとパウリ排他律を考慮したものであり、下側の実線で表されている。まず興味深いこととしては、パウリ排他律と核間ポテンシャルの効果は、低エネルギーでいずれも約 20% 程度あるが、 d と ${}^3\text{He}$ のときはほとんど両者が打ち消しあっていることがあげられる。このことは以前のグラウバー模型による研究で、お互いに打ち消しあうと”期待”され、無視されてきたことをより基本的な立場から示したことになる。しかしながら入射核が α の場合は例外であり、パウリ排他律の効果は核間ポテンシャルの効果より大きいことがわかり、原子核の個性が現われているといえる。

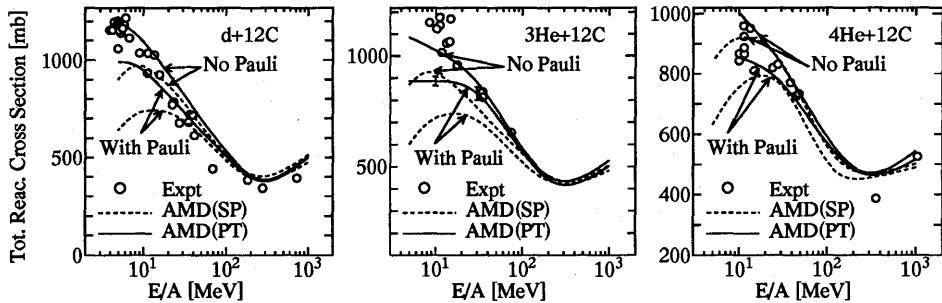


Fig.1 $d+{}^{12}\text{C}$, ${}^3\text{He}+{}^{12}\text{C}$, ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}$ 反応での全反応断面積.

この研究を核データの評価という立場から見た場合、まずグラウバー模型の成立する条件 — パウリ排他律と核間ポテンシャルの効果が広いエネルギー領域で打ち消しあうこと — をより基本的な立場から示した点、また、グラウバー模型の結果を基準にしてみた場合に反応による差異 (原子核の個性) の理由を示した点で評価できるだろう。

3. ハイパー破片の生成確率

ハイパー核の反応は、通常の原子核の研究から得られた知識がどこまで通用するか調べるための絶好の分野であろう。つまり通常核で用いられた理論をそのままの形で用いて、性質の異なる対象に外挿、あるいは予測することにより理論のより広い範囲での適用可能性 (一般性) を知ることが出来るからである。

現在までハイパー核の研究は、 (π, K) , (K, π) 反応などの離散的なスペクトルから知られる低励起状態の分光学が中心であり、通常核で成功を修めてきたクラスター理論、殻模型、直接反応理論がその適用範囲を広げ、その普遍性を示してきた。こうした理論

的研究では、より励起エネルギーの高い(終状態中間子の)連続スペクトルの領域は準弾性散乱でほぼ尽くされていると考えられてきたが、実験的にはこの領域においても多くのハイパー核が生成されていることが知られている。こうしたハイパー破片の生成はその反応過程が複雑であるため、微視的なシミュレーションを用いた研究が適していると期待される。

ここでは例として、 $^{12}\text{C}(\text{Stopped } K^-, \pi)$ 反応でのハイパー破片生成についての研究の結果を示そう [7]。この反応に AMD を適用するに当たり通常核の場合に加えて Λ, Σ 粒子などと核子の間の相互作用、衝突断面積が必要になる。これらについては可能な限り実験データをフィットしたものをを用い、枠組みとしては通常核で用いたものをそのまま用いて計算を行った。ハイパー破片の生成確率を Fig. 2 に示す。実線のヒストグラムは、AMD によるシミュレーションの後、統計崩壊過程を取り入れた計算結果である。実験データは現在のところ 1 点しかないが [8]、理論計算の結果がほぼデータを再現していることが分かる。後の実験により、ほかのハイパー破片の生成確率が測定されれば、この理論の枠組みがどの程度正しいか判断できる。

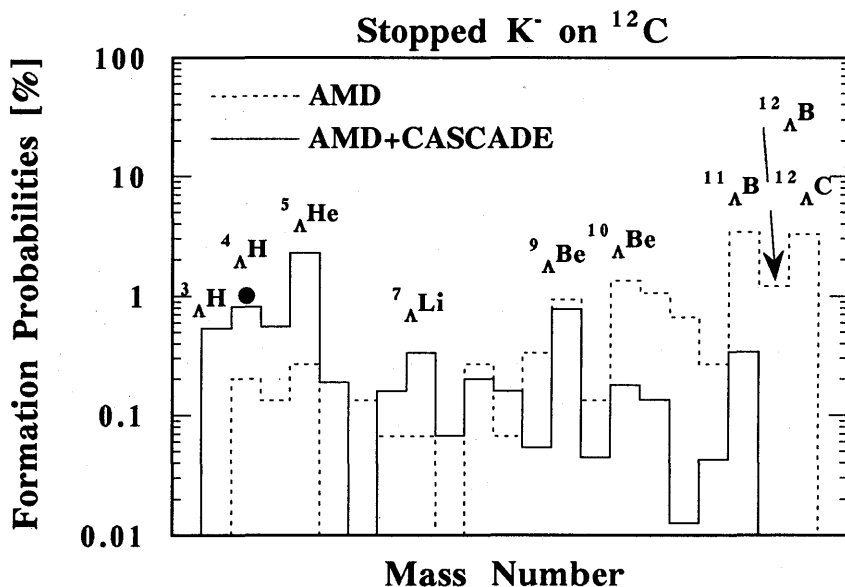


Fig.2 $^{12}\text{C}(\text{Stopped } K^-, \pi)$ 反応で生成されるハイパー核の静止 K^- 粒子あたりの生成確率. 実験データは, Ref. [8] からとった.

再び、核データの評価という立場から見た場合には、実験データが存在しないハイパー破片の生成確率をも得られる点は、こうした微視的な理論の大きな長所である。複雑な反応になればなるほど実験的には測定が困難な中間状態を経由する場合が多くなり、微視的なシミュレーションのような動力学的な理論がますます有効となるからである。(ただし、熱平衡が達成されるほど複雑な反応であれば、統計理論が有効であろう。)

4. まとめ

この報告では原子核反応における微視的なシミュレーションの役割とその適用例を示し、核データの評価との関連を多少なりとも述べたつもりである。より実用的な側面から見た微視的なシミュレーションによる核データの評価は比較的近年に始まったばかりである。例えば、日本原子力研究所の先端基礎科学研究センターハドロン輸送グループは、核反応における核破片生成 (Fragmentation) を統計的な面のみでなく非平衡効果までをとりいれてより微視的な立場から評価することを目的として作られた (というのが筆者の理解である)。これは、現在までの手法—核間カスケード、前平衡過程、統計過程—のうち、Fragmentation にまで至る過程の前二者を統一的に扱うために必要なことであろう。

この報告のうち、第2節は奈良寧氏 (北大理) との、第3節は奈良寧氏、原田融氏 (札幌学院大社会情報) との共同研究に基づくものである。この場を借りて両者に感謝の意を示したい。

- [1] 菊池康之, 核データニュース 47(1994), 2.
- [2] G.F.Bertsch and S.Das Gupta, *Phys. Rep.* **160** (1988), 189.
- [3] J.Aichelin, *Phys. Rep.* **202** (1991), 233;
T.Maruyama, A.Ohnishi and H.Horiuchi, *Phys. Rev.* **C42**(1990), 386; *ibid* **C45**(1992), 2355.
- [4] A.Ono, H.Horiuchi, T.Maruyama, and A.Ohnishi, *Prog. Theor. Phys.* **87** (1992), 1185; *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992), 2898; *Phys. Rev.* **C47** (1993) 2652.
- [5] Paul J.Karol, *Phys. Rev.* **C11**(1975), 1203;
R.M.DeVries and J.C.Peng, *Phys. Rev.* **C22**(1980), 1055;
S.K.Charagi and S.K.Gupta, *Phys. Rev.* **C41**(1990), 1610.
- [6] Y.Nara and A.Ohnishi, *Proc. of International School-Seminar '93: Hadrons and Nuclei from QCD*, 211, Japan-Russia, 1993 (World Scientific, Singapore, 1993).
- [7] Y.Nara, A.Ohnishi and T.Harada, *Oral presentation at the Int. Symp. on Frontiers of Nuclear Structure Physics*, Tokyo, Japan, 1994; *Contribution paper to the Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics*, Vancouver, Canada, 1994.
- [8] H. Tamura et al., *Phys. Rev.* **C40** (1989) R479, R483.