

会議のトピックス(I)

核反応の時間発展ダイナミクスの解明に向けて

九州大学
理学研究院
湊 太志

minato.futoshi.009@kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

原子核反応の理解は目覚ましい進歩を続けているが、核反応後の原子核の振る舞いについては未知の部分が多い。その総合的な理解に至るには、入射粒子と標的核が短時間に相互作用する直接過程に加えて、前平衡過程から複合核過程へ発展していく反応ダイナミクスを理解することが重要である。近年、ニュートリノ観測や医療用加速器の設計、半導体ソフトウェアの評価でもこのような総合的な核反応過程の理解の重要性が指摘されており、次代の核物理の重要テーマになりつつある。このような核反応の時間発展ダイナミクスを理解するため、理研の仁科加速器科学研究センターでは逆運動学を用いた直接反応の実験が行われており、不安定核物理を中心に世界をリードする成果を生み出している。加えて、逆運動学手法を用いる観測では、前平衡過程や複合核過程を経て生成された娘核が直接検出できることから、実験で得られる核物理学的知見はより多いと考えられる。この取り組みは理論と実験の両輪による協力が欠かせない。

このような背景のもと、国内の関連する研究者間で知見を集約し議論を行うことを目的に、2024年9月25, 26日に理化学研究所の仁科加速器科学研究センターにおいて「核反応の時間発展ダイナミクスの解明に向けて」という研究会を開催した。本稿では、その研究会の内容について簡単に紹介する。ちなみに、会議の参加登録者数は69名で、講演者は20名（1名欠席）であった。

2. 会議の概要

原子核の性質を調べる実験は、端的に述べると、粒子を原子核に入射させ、散乱された粒子を検出することで、間接的に標的の性質を探るものである。これだけ聞くと、単純であるような気もするが、標的となっている原子核が複雑極まりない有限多体系であることを忘れてはいけない。検出器で得られた結果を分析するためには、原子核構造に何らかのモデルを導入し、入射粒子との間で起きた反応を近似せねばならない。このた

め、実験の分析から得られる結果は常にそのモデルに応じた性質を反映したものとなる。たとえば非弾性散乱を歪曲波ボルン近似（DWBA）で分析する場合、原子核の励起エネルギーとその変形パラメータを仮定するが、このモデルの枠内では標的核内の核子がどのような振る舞いをしたかという情報まで得ることは難しい。たとえ数値計算のリソースを最大限に利用した微視的モデルを用いたとしても、反応初期の段階から複合核に至るまでの標的核の様子を詳細に記述することは難しいであろう。

このようなことから、核データの断面積評価では、原子核反応を大きく 3 つの段階に分けて考えることで問題を単純化し、評価データ開発が進められてきた。3 つの段階に対応するものが直接過程、前平衡過程、複合核過程と呼ばれるものである。これらの違いは、反応が進行するタイムスケールと理解するのが容易である。直接過程は、入射粒子が標的核と数回反応する過程、前平衡過程はさらに複数回反応する過程、複合核過程は反応がさらに進行し全ての核内核子が同程度のエネルギーを持っている状態に対応する。しかし、必ずしも入射粒子がずっと標的核内に居座るわけではないので、前平衡過程と複合核過程の区別に関しては、運び込まれたエネルギーが原子核内でどこまで散逸したかで区別されるべきであろう。核反応断面積の計算は、これら 3 つの段階に基づく理論モデルで計算された結果の和で表される。核データ評価では、直接過程には DWBA やチャネル結合法、前平衡過程には二成分励起子モデル、複合核過程では Hauser-Feshbach 統計モデルなどが使用されている。このような大胆な枠組みの分割にも関わらず、これまでの核反応モデルは実験値をうまく説明することができており、核データは実用化されているのである。



図 1 現地参加者の集合写真

しかし、実験値を説明することができるという事実とは別に、厳密な思想の元では、3つの反応過程は分けられるものではなく、互いにスムーズに接続しているべきである。直接過程から前平衡過程、そして複合核へ進む過程を理論的に説明しようという試みとして、いわゆる KKM (Kawai, Kerman, and McVoy) モデルや Gaussian Orthogonal Ensemble (GOE) を用いたランダム行列理論など、前平衡過程では FKK (Feshbach, Kerman, Koonin) モデルや TUL (Tamura, Udagawa, Lenske) モデルなどがある。このような先駆的な試みがあるにもかかわらず、それを発展させようという研究は、近年では縮小してしまったように思える。今と昔で興味となる物理対象が研究者間で変わってしまったためかもしれない。または、現象論的な前平衡過程モデルである二成分励起子モデルがかなりの成功を収めたため、微視的な理解を深めようというモチベーションが下がってしまったためかもしれない。その理由は定かではないが、現象論モデルである二成分励起子モデルだけでは説明することが難しい実験データが当然のことながら見つかりはじめ、3つの反応ステージを統一的に理解しようという試みがふたたび興り始めている。

放置されかけた反応ダイナミクスの問題であったが、核反応と類似する別の研究対象から同じ問題にぶつかり、異なる角度からその解決に取り組んできた研究者が国内に数多くいることが最近になって分かってきた。こうした経緯から、お互いに持っている課題やこれまで培ってきた科学的知見を合わせることで、課題の解決策と総合的な知見を構築できるのではないかと、という発想に至ったのが、この研究会を開催することにした主な理由である。

本研究会の講演プログラムは以下に紹介する。

- 河野俊彦 (LANL) 「Spin and parity dependence of statistical de-excitation of compound nucleus and decay width distribution」
- 緒方一介 (九大) 「直接過程と複合核過程に理解の橋を架けよう」
- 早戸良成 (東大) 「ニュートリノ観測におけるニュートリノ原子核反応の重要性」
- 民井淳 (阪大) 「軽核の光核反応と巨大双極子共鳴の崩壊測定」
- 川瀬頌一郎 (九大) 「ミューオン原子核捕獲反応からの粒子放出」
- 中山梓介 (JAEA) 「核データ評価分野における時間発展ダイナミクスの重要性」
- 小野章 (東北大) 「AMD による核反応シミュレーションの課題」
- 小川達彦 (JAEA) 「JQMD モデルによる重イオン核反応シミュレーションの現状と展望」
- 木村真明 (理研) 「Toward nucleon(s) knockout reaction study using AMD wave function」
- 宇都野穰 (JAEA) 「大規模殻模型計算による遷移強度分布：手法と応用例」
- 竹下隼人 (清水建設) 「巨大双極子共鳴領域における中性子生成に関する理論的

アプローチ」

- 佐波俊哉 (KEK) 「巨大共鳴エネルギー近傍の偏光ガンマ線入射反応からの光中性子のエネルギースペクトル測定」
- 中里健一郎 (九大) 「ニュートリノ原子核反応と超新星ニュートリノ」
- 堀内渉 (大阪公大) 「軽い原子核の電弱応答とニュートリノ反応」
- 坂口聡志 (九州大) 「超重元素合成のための重イオン核融合反応の研究」
- 有友嘉浩 (近畿大) 「流体力学的性質に支配される融合・分裂ダイナミクス」
- 関澤一之 (東工大) 「時間依存平均場理論で探る核反応の時間発展ダイナミクス」
- 阿久津良介 (KEK) 「ニュートリノ事象予測高度化のための逆運動学実験」
- 水野るり恵 (東大) 「ミューオン原子核捕獲反応後の残留核分岐比測定」
- 梶野康宏 (立教大) 「逆運動学を用いた電気双極子状態の崩壊測定」
- 湊太志 (九大) Closing

ご覧いただければ分かるように、核反応とそのシミュレーション計算だけではなく、核分裂やミューオン、ニュートリノ、光核反応、核データ研究、超重元素合成など、幅広い研究テーマにわたる講演でプログラムが編成された。また、核反応の時間発展の理解には、核構造の知見も必要であり、それに関連した講演もプログラムに編成した。講演内容は幅広いテーマに拡大したにも関わらず、会議を通して核反応や原子核の崩壊の時間発展という共通のテーマで議論の焦点はほとんどぶれていなかったと思う。このことは、それぞれの講演者が、それぞれ違った物理対象を研究しているにも関わらず、図らずして似たような核反応の問題にぶつかり、認識していたということである。

この研究会を通して明らかになったことの一つは、断面積はよく説明することができていても、粒子放出や残留核分布という点では、理論モデルに改善すべき余地があることである。さらにもう一つの収穫は、一見遠く離れた分野に思われるニュートリノ系の研究者が原子核物理研究者に多くの期待を寄せていることが分かったことである。こういった話題について、参加者間で活発な議論がなされたということを書き残しておきたい。ちなみにこの研究会では、大学、研究機関、民間企業と、国内外の広い範囲にわたって講演者が構成された点についても特筆したい。この点についても、参加者から好意的な意見が寄せられた。

3. おわりに

最初は関係者のみしか集まらないのではないかと考えていたが、ふたを開いてみると予想以上の参加者が集まり、議論闊達な中で会議を終えることができた。核反応のダイナミクスの総合的な理解には、まだまだ残されている課題がある。核データ評価では、直接過程には DWBA やチャンネル結合法、前平衡過程には二成分励起子モデル、複合核過

程では Hauser-Feshbach 統計モデルが使用されているが、これらの枠組みをさらに発展させる余地は多いに残されている。この問題を解決することは核物理分野だけではなく、核データ分野へのブレークスルーにつながる可能性があるということを、会議を通して感じることができた。引き続き、関係各所と連携した研究が継続できることを期待したい。願わくは、第2回の研究会を開催できたらと思う。

本研究会は、原子力学会シグマ調査専門委員会から後援を、JST ERATO TOMOE プロジェクトと高エネルギー加速器研究機構から協賛をいただいた。また運営委員として民井さん、大津さん、緒方さん、阿久津さん、中島さん、渡辺さんにも会議の迅速な運営にご尽力いただいた。ここで改めて感謝をしたい。