



The 2016 R-Matrix Workshop on Methods and Applications 参加報告

日本原子力研究開発機構
核データ研究グループ
国枝 賢
kunieda.satoshi@jaea.go.jp

1. はじめに

米国 JINA-CEE (The Joint Institute for Nuclear Astrophysics - Center for the Evolution of the Elements) が主催する R 行列理論に関わるワークショップ「The 2016 R-Matrix Workshop on Methods and Applications」(場所: 米国・サンタフェ、期間: 平成 28 年 6 月 27 日~7 月 1 日) に参加した。このワークショップは R 行列理論に関するこれまでの知見や最近の成果を整理し、研究者間で課題点を共有することを目的に企画された。会議には各国から宇宙核物理や原子核物理、核データを研究している専門家や大学院生 50 名程度の参加があった。その殆どは米国および欧州諸国からの参加であったが、その内 3 割程度は天体核物理学を学ぶ大学院生であり、この分野における活気を感じた。なお、アジアからの参加は中国から 1 名、そして日本からは筆者のみであった。

2. R 行列理論とその応用

会議の概要を報告する前に、核反応における R 行列理論とその応用について簡単に述べておく。R 行列理論とは、中性子+原子核等の核反応を境界条件に基づいて量子力学的に記述し、散乱行列 (S 行列) を取得する枠組みである。計算を行うためには、まず原子核内部と外部の境界を定義するチャンネル半径および核内外の波動関数を滑らかに繋ぐための対数微分値、要するに境界条件が必要である。そして複合核のエネルギー固有値とスピン・パリティ、さらに個々のチャンネルに対する換算振幅幅が必要である。ここで、当然のことながら“チャンネル”は角運動量やチャンネルスピンによって定義される。また、換算振幅幅はざっくりいえばその名の通り、個々のチャンネルの波動関数の“振幅”で定義される。このように R 行列理論は原子核や核反応の描像を“モデル化”したものではなく、“枠組み”としては量子力学そのものである。なお、筆者が一つ気になっているのは、

非共鳴項に関してである。例えば、核反応における最も大きな非共鳴項は“形の弾性散乱（ポテンシャル散乱）”であるが、実際に観測される弾性散乱断面積は共鳴と非共鳴項の干渉として現れる（荷電粒子反応の場合はさらにクーロン散乱との干渉も考慮する必要がある）。これら非共鳴項の記述には“モデル”が必要であり、標準的な R 行列理論では形の弾性散乱の位相差計算に剛体球モデルが用いられている。以上のように、 R 行列は核反応を記述する有用な枠組みである。ただし、非共鳴項に対してはモデルや仮定が必要であり、その扱いに関しては幾つかのアプローチがあるようだ。

R 行列理論は共鳴領域における断面積測定データの内外挿や核データ評価に応用されている。例えば天体物理学で重要となる核反応（CNO サイクルや PP チェイン等の元素合成過程で重要な荷電粒子反応）は閾値近傍であることが多く、断面積が非常に小さいために測定が難しい。その際に R 行列理論は測定可能なエネルギー領域から閾値近傍へ外挿するための一つの手段となる。また、中性子核データの評価においては測定データの解析に用いられる。また、 S 行列を取得する枠組みであるため、角度微分断面積の評価や予測計算を行うことも可能である。ただし、中重核に対して捕獲断面積の計算を厳密に行うとなるとチャンネル数が膨大になるため、現実的には Reich-Moore 等の近似を導入せざるを得ない状況がある。

3. ワークショップの概要

ワークショップ初日は、米国ローレンスリバモア研究所の I. Thompson 氏による R 行列理論入門と題するレクチャーから始まった。私が彼と初めて会ったのは今年の IAEA の会合の時であったが、私は恥ずかしながらその時まで彼が R 行列に関わっていることを知らなかった。FRESCO コードの開発者として知られているように、チャンネル結合光学模型計算のイメージが強かったせいである。そもそも考えてみれば R 行列は言わば“モデルの無い”チャンネル結合計算の枠組みである。彼は散乱理論一般の専門家だったのかとようやく判った。スライドを使わずに事前に配布したノートとホワイトボードを使った講義であった。筆者も大学時代を思い出しつつ、核反応理論（というか散乱理論）の基本に立ち返ることができた。米国内の大学院生が多く参加しており、活発に質問を行っていた。続いて、ロスアラモス研究所の G. Hale 氏により R 行列理論の歴史について説明があった。Wigner 氏による標準的理論の提唱に始まり、境界条件の扱い方を簡略化した計算手法、殻模型等と併用したアプローチ、3 体反応へのチャレンジ等の話があった。内容はあまり掴めなかったが、Wigner 本人との何やら面白いエピソードに触れており、会場の笑いを誘っていた。一見、講演の内容は R 行列の変遷のように受け止められがちであるが、Wigner の理論は今日でも太い幹としての位置は揺るがず、以後の研究成果は貴重な知見ではあるがむしろ枝葉的な役割を果たしていると言って良い。また、各国の計算コードの紹介がなされた。米国では目的に応じて EDA、SAMMY、AZURE2、FRESCO 等複数のコードが開発されている。例えば EDA はロスアラモス研究所で開発されたコー

ドである。近似の無い手法が用いられており軽核断面積の評価に有用である（例えば IAEA 標準核データの評価で数十年の実績を有している）。AZURE2 は天体核物理の分野で良く用いられている（荷電粒子反応測定データに対する詳細な解析ができるようだ）。欧州では中性子共鳴解析コード REFIT が有名であるが、より拡張性の高い CONRAD の開発がすすめられている。中国においては RAC コードが知られているが、近年若手が新たなコードの開発を始めている。なお、私のコード AMUR に関しても、日本が開発中のコードとして紹介された。

研究発表における主な内容は下記の通りであった。

- ① 宇宙における元素合成初期過程の解明に必要な核反応断面積の推定
- ② 核構造モデルや平均場モデルとの連携による断面積の予測計算手法
- ③ 核工学のための中性子核データ評価計算手法

JINA-CEE がワークショップを主催しているためか、①に関する内容が半数を占めていた。天体核物理学における R 行列理論の役割は、軽原子核に対する陽子（または α 粒子）入射の断面積を、測定困難な閾エネルギー近傍（CNO サイクルや PP チェイン等の元素合成過程で重要な領域）まで外挿することである。断面積測定及び理論解析に関する発表が多くあったが、その中で特筆すべきは、米国ノートルダム大学のコード AZURE2 が半ば標準的に用いられていることである。これは例えば、サンプルの厚さによる粒子エネルギーの減衰効果を考慮できる等、荷電粒子反応に対して詳細な解析アプローチが可能であるためである。しかし、測定データの共分散が考慮できない等の弱点があり、各国の解析コードは一長一短の性格があるのだと改めて感じた。②のテーマは、出張者がワークショップに参加する以前から関心を持っていた内容であった。低エネルギー核反応に現れる共鳴は原子核の複雑な内部構造に起因しているため、理論のみから予測計算を行うことは難しいというのが現在の通説である。正確な断面積データを導くためには測定データが必要であり、R 行列理論は測定データの内外挿や補完・補正等を行う役割を担う。発表ではリチウム等の軽い原子核に対して核構造模型（殻模型やクラスター模型、第一原理計算等）と R 行列理論を組み合わせた共鳴断面積の予測計算手法および計算結果が紹介された。測定データのピーク位置や共鳴の強さを定性的には説明できているものの、核データ評価に適用できる程度の正確な予測計算は現状困難な様子であった。会場から「今後計算精度が上がれば何人の実験屋が職を失うでしょうか？」との質問があり笑いを誘っていたが、仮に核構造模型が今後飛躍的に進展すれば、将来、理論のみから難測定核種等の核データを導くことが可能になる世の中が来るかもしれない。また、光学模型等の平均場理論を用いた非共鳴項の計算手法および結果が数件紹介された。実際に観測される断面積は共鳴・非共鳴項の干渉として現れることに注意されたい。③に関しては SAMMY や REFIT コードを用いた中性子断面積の評価計算例が示された（また、筆者は AMUR の開発状況について発表した）。これらのコードの特徴は、データが測定された環境に計算結果をできるだけ近づけるための補正機能が充実している点である。測定施設毎に

Resolution function 等が最適化されており、断面積の測定研究と一体となって開発が進められてきたのだと感じた。なお、両コード共に中性子反応に特化していたが、最近 SAMMY コードでは荷電粒子入射反応も扱えるようになったようである。

おわりに

会議終了後にロスアラモス国立研究所を訪問し、核反応理論や軽原子核に対する核データ評価手法に関して議論を行った。河野俊彦氏との議論では、非共鳴項の扱い方や光学模型との関連について有益な知見や文献等を得ることができた。また、G. Hale 及び M. Paris 両氏とは、角度分布測定データを解析する際に必要な絶対値規格化パラメーターの与え方等々について意見交換を行った。さらに、G. Hale 氏は偏極分解能の計算の一般化手法について出張者のために特別に講義をして下さり、理論に対する理解を更に深めることができた。



ワークショップの様子