

## WG 活動紹介(II)

# 天体核データ評価ワーキンググループ

日本原子力研究所 多体ハドロン系理論研究グループ

千葉 敏

sachiba@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

## 1. 背景

良く知られているように、ビッグバン直後時における宇宙の元素分布は、標準的な模型では水素 (76%)、ヘリウム (24%) とわずかな Li があるのみで、それより重い元素は、その後形成された星や宇宙線によって様々なプロセスにより作られたと考えられている。特に、鉄より重い元素のほとんどは中性子捕獲反応が中心となるプロセス、すなわち s-過程と r-過程によって形成された。その中でも r-過程は高温、高密度、高中性子束で中性子捕獲の時間スケールが  $\beta$  崩壊の時間スケールよりも小さい環境で起こる過程である。そのため非常に中性子過剰な核が関与するため、多くの不安定核についての情報が必要とされる。r-過程は、鉄より重い元素の約半分を生成するが、また、原子力で重要な U や Th を 100% 生成する。しかし、r-過程がどこで起きるかは現在でも論争の対象であり、現在の理解では、II 型超新星爆発におけるホットバブル領域、というのが主流な考え方である。これらの元素合成過程が理解されれば、最近の天体観測の進歩により銀河のハローにある古い星（金属欠乏星）中の元素分布の測定が可能となっているので、これらの星に含まれる r-過程元素の存在比からそれらが形成されてからの時間を推定することができる。それにより星形成や銀河の進化の歴史、宇宙年齢についての推定が行われる。

一方 s-及び r-過程は中性子捕獲過程であり、原子炉用に作成された核データライブラリーや計算手法を適用できるなど、多くの点で原子力技術と深い関連を有している。しかし、r-過程では中性子ドリップラインに至る中性子過剰核（その多くは存在すら確認されていない）が関与するため、その断面積を推定するには理論計算が不可欠となる。中性子過剰核については、近年の原子核実験技術の進歩によって知見が蓄積され、理論的理解も進んで来たので、それらの成果を利用することができる。また、超新星爆発についても、現実的な核物質の状態方程式を用いた一般相対論的流体シミュレーションによる理解が進んでいる。その結果、超新星爆発のシミュレーションと 3000 核種以上の関与する数万反応を含む full reaction network を組み合わせた計算が可能になっているが、その入力として、核データが不可欠である。

従来、核データと天体物理コミュニティは相互に依存せず、独自にライブラリーを作ってきたが、最近は両者の理解が進み、協力関係が構築されつつある。つくばで開催

された核データ国際会議(ND2001)における Topics 3 の盛況ぶりを見てもそれは伺える。また核データコミュニティとしてもチャレンジングな領域であり、低エネルギー核データの新たな応用分野を開拓することで活性化が期待できる。

## 2. メンバーと活動の概要

当初、メンバーは千葉の他に、梶野敏貴氏(国立天文台)、橘孝博氏(早稲田)、大崎敏郎氏(東工大)、渡辺幸信氏(九大)、河野俊彦氏(九大)、市原晃氏(原研)の計7名でスタートしたが、河野氏の海外赴任に伴い一時は6名となった。この時私は落ち込んでWGを解散しようと思ったほどである。しかし捨てる神あれば拾う神ありで、今年度から小浦寛之氏が原研職員となり、当WGのメンバーとなったおかげで現在は再び7名の体制である。とは言え、もともと本WGの発案と活動にあたっては河野氏の貢献が大きく、現在でも協力関係があるとは言え、その損失は大きい。分担としては梶野氏が天体物理的観点からの助言、橘氏、小浦氏が核構造・崩壊データ関係、それ以外のメンバーが核反応率関係の整備を行うことになっている。

ところで、本WGでは元素合成に必要な核データの整備を目的とするが、その種類は多岐に亘っている。しかも性質のわからない多くの核種が対象となるため、核構造と核反応が密接にリンクした形での活動が必要となるという意味で、他のWGと異なる性質を有している。このために核構造・崩壊関係のメンバーと核反応関係のメンバーが混在している。大きなポリシーとしては国内で提案された質量公式(KUTY00, KTUY03)をベースにして様々なデータを整備することを大原則にしているが、それ以外については手探り状態である。具体的にどのようなデータを考えているかと言うと、核構造・崩壊データ関係では、原子核質量の他に、 $\beta$ 崩壊半減期、 $\alpha$ 崩壊半減期、自発核分裂半減期、核分裂による質量収率、核反応関係では $(n,\gamma)$ 反応を中心とする核反応率である。核反応率はエネルギーの関数としてではなくマックスウエル分布で平均した断面積が必要であるため、1keVから数MeV程度まで断面積を計算し、それをさまざまな温度で平均する。

図1に示すセグレチャート上に典型的な $r$ -過程の経路と、核データの見地から見た領域分けが示されている。この中で最も大きな領域を占めるのが中重核領域で、ここでは核反応率の計算に核データでも馴染み深い統計模型を使用することができる。従ってこの領域での問題は、統計模型に用いるパラメータ、すなわち光学模型ポテンシャル、準位密度、準位構造、ガンマ線強度関数などをいかに推定するかということに帰着する。一方、それより重い重・超重核領域でも統計模型を使用することができるが、この領域では核分裂が起こるのでさらに特別な配慮が必要である。また、軽い領域では原子核の構造、反応にクラスターの様相が深く現れており、小数多体・クラスター描像による取り扱いが必要である。現在、我々はこのすべての領域について活動しているが、一番取り扱いが困難なのが軽い核の領域である。実は、軽核領域のデータはビッグバン元素合成や核融合炉開発などで重要であるにも関わらず核データとしての取り組みは最も遅れており、理論的取り扱いが確立すれば核データとしての意義は大きい。

核構造・崩壊データ関係の活動は小浦、橘岡氏を中心に行われている。 $\beta$  崩壊については KUTY の質量と整合的に大局的理論を用いて数千核種の崩壊率がすでに計算された。今後は質量模型を元に  $\alpha$  崩壊、自発核分裂の半減期を計算し、核分裂収率については核データセンターの片倉氏の系統式を用いてネットワークコードに取り込めるようにする予定である。

中重核～重・超重核領域の反応率関係は河野氏の作成した統計模型計算コード CoH を中心に、核反応模型パラメータデータとして RIPL-2 などとリンクするシステムを作って計算の自動化が進んでいる。我々の取り組みは基本的に従来の核データのやり方を踏襲、すなわち現象論的な手法を採用している。従って光学ポテンシャルは、現状では最も適用性の高いと考えられる Koning-Delaroche のものを採用し、ガンマ線強度関数は RIPL-2 を用いている。一方で Ignatyuk 型の準位密度パラメータを、KUTY 質量模型から得られる対エネルギーと殻補正エネルギーを用いて新たな推定を行い、きれいな系統式を得たのでそれを用いることにした。また未知核種の基底状態のスピン・パリティは Nilsson-Strutinski 法で推定してそれをデータベース化した。これらを統合して図 2 に示す計算システムを構築中である。この部分については河野氏が中心であり、そのために純国産の活動であると言えない点が悩みの種でもある。

軽い核の領域では東京理科大学のグループと共同で小数多体クラスター模型による研究を進めている所であるが、この部分についてはまだ表だった成果が出ていないので紹介は差し控える。

この他、光学模型部分については将来的には原研と Minsk グループが以前より共同で開発して来たチャンネル結合模型コード OPTMAN に置き換えて、KUTY 質量模型が予測する不安定核の変形を考慮した計算に置き換えたいと考えている。また、核データセンターの中川氏と共に JENDL-3.2 や JENDL-3.3 からマックスウエル平均断面積を計算して、元素合成の計算にすでに用いられている様々なデータベースと比較するなどの、従来の活動とリンクした地道な活動も行っている。さらに、s-過程の計算でメタステーブル状態を生成する中性子捕獲過程やそこからの中性子捕獲、励起状態からの中性子捕獲などが重要であることが分かっている。これについては時間さえかければ我々の持っているツールで計算が可能なので、何らかの結果を出したいと考えている。

### 3. 最後に

我々は元素合成用核データをバルクな形で整備することを目的としているので、個々の反応、特に中性子過剰核領域での荷電粒子反応についてはあまり注意して研究成果をウオッチしているとは言い難い。その面で重要な成果を見落としているなどのご指摘があれば是非ご教示いただきたい。また、r-過程で重要なニュートリノ・原子核反応などについては我々がやるのが最適とは思えないので対象とはしない予定である。

元素合成に必要な核データは多岐に亘っているので、WG では毎回メンバー以外の専門家を招聘して核分裂収率の理論計算、小数多体核反応理論、ビッグバン元素合成などに

ついてのお話を伺ってきた。これらは核データのコミュニティ全体にとっても興味深いものではないかと思っている。また、扱うデータの多様性から本 WG のメンバーのみで全部をカバーできないのは明白であるので、今後もシグマ委員会内外の専門家のお力添えを必要とする。ご理解とご協力をいただければ幸いである。興味のある方々の参加はいつでも歓迎である。

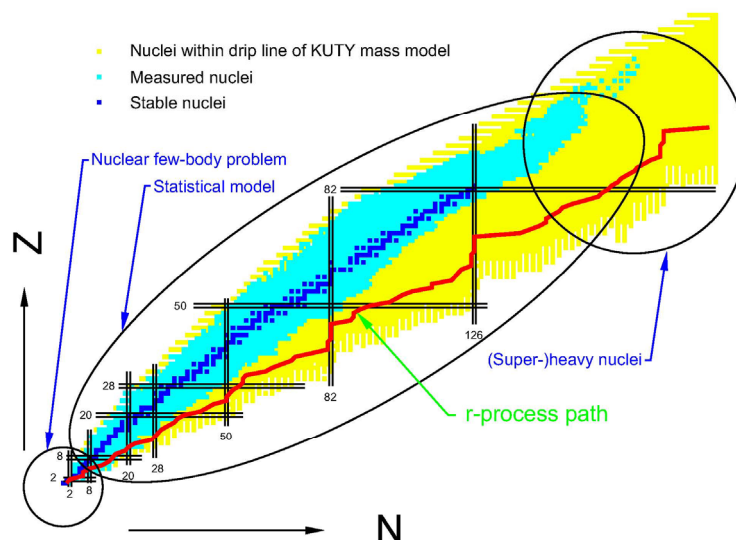


図 1 r-過程の経路と核データ計算の観点から見た領域分け

## Hauser-Feshbach-Moldauer Calculation

### Program CoH

- Spherical optical model
  - The global parameterization is adequate for cross section calculation of unstable nuclides.
  - Koning-Delaroche Global Potential for  $n$  and  $p$
  - Lemos' Potential for  $\alpha$ -particle (Questionable)
  - CoH also contains some potentials for D, T, and  $^3\text{He}$ .
- Hauser-Feshbach model, Width fluctuation by Moldauer
- Particle induced process ( $n, pX$ ), ( $\alpha, nX$ ), etc.
- Neutron capture,  $E_1$  transition

### Special Database

- KUTY00, KTUY03
- reaction  $Q$ -values
- ground state  $J\pi$

### System

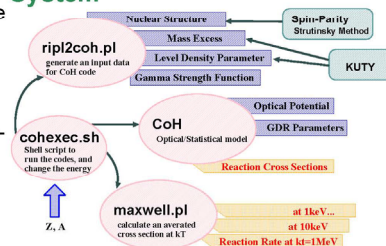


図 2 統計模型計算コードシステムの概要 (河野氏の OHP より抜粋)