

## 会議のトピックス(VII)

# 8th International Symposium on Nuclei in the Cosmos

## (NIC8) 報告

大阪大学 核物理研究センター

嶋 達志

shima@rcnp.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

標記国際シンポジウムが2004年7月19日から24日まで、カナダ・バンクーバー（写真1）にてカナダ国立素粒子原子核研究所（TRIUMF）の主催で開催された。本シンポジウムは、宇宙・天体物理分野と原子核・素粒子物理分野の観測、理論、実験研究者が集まり、宇宙における元素の起源と、元素合成の場となる宇宙・天体のダイナミクスについて議論を行なうことを主旨としており、宇宙核物理、天体核物理の分野におけるもっとも重要な会議のひとつとして、1990年のウィーンでの第1回以来、2年ごとに開かれている。今回は2002年の富士吉田での第7回に続く第8回であり、バンクーバーのダウンタウンにあるCoast Plaza Hotelにて開催された（写真2）。28ヶ国から266名が参加し、日本からは34名が出席した。講演70件、ポスター139件の合計209件の発表が行なわれた。研究領域別では、恒星の観測22件、恒星の進化・元素合成に関する理論66件、原子核実験68件、原子核理論26件、ビッグバン元素合成関連8件、宇宙線の観測及び理論8件、隕石及び地球上の試料に関する分析6件、核データベース関連5件であった。会議では、以下のようなタイトルのセッションが設けられた。

- (1) 大質量星と重力崩壊型超新星
- (2) 原子核実験と核反応断面積
- (3) 同位体の合成機構と観測
- (4) 定常的恒星内核燃焼と原子核反応
- (5) Ia型超新星、ガンマ線バースト、X線バースト
- (6) s過程、銀河の化学進化
- (7) r過程、p過程
- (8) 太陽、新星の物理
- (9) ビッグバン元素合成



写真1 バンクーバー市街風景



写真2 会議場となった Coast Plaza Hotel (Denman Street 沿い)

以下、議論の主な内容をテーマ別にまとめる。

## (1) 天体観測・宇宙線観測

近年、Keck、VLT、Subaru などに代表される大口径望遠鏡と高性能分光器を組み合わせた観測によって、重元素量が極めて少ない星の元素量分析や同位体比分析が可能となった。たとえば Subaru では、初期銀河における軽元素合成に関連して重要な  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  同位体比や、AGB 星 (Asymptotic Giant Branch stars) における s 過程元素合成のモデル検証に有用な  ${}^{151}\text{Eu}/{}^{153}\text{Eu}$  同位体比の観測に成功しており、報告があった。また、U、Th の同位体比を利用した宇宙核年代測定の可能性が議論された。II 型、Ib 型、Ic 型の超新星について、観測から得られたスペクトル及びその時間変化の特徴が解説され、爆発の非対称度やガンマ線バーストとの相関が論じられた。一方、銀河系の中での最も古い種族の恒星の観測から求められた[C/N]比が、AGB 星の理論的モデルの予想に反して大きく、今のところ解釈が困難であるという問題が指摘された。宇宙からの核ガンマ線観測に関しては、Compton 衛星による超新星起因の  ${}^{56}\text{Co}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{44}\text{Ti}$ 、 ${}^{26}\text{Al}$  の観測や、大質量星で生成された長寿命核によるガンマ線検出、Ge 検出器を搭載した INTEGRAL 衛星 (2002 年に運用開始) による銀河中心からの消滅ガンマ線、 ${}^{26}\text{Al}$  ガンマ線の観測などの結果が報告された。

## (2) 超新星・恒星の理論

超新星のモデルに関しては、3 次元シミュレーションの精度が向上し、対流、自転、磁場、非対称爆発等の効果を考慮した理論計算が可能となった。それらの計算結果をもとに、最近の観測との比較が議論された。また、重力崩壊の際に生じる大量のニュートリノによる核反応の影響が詳しく調べられ、特に中性カレントによる非弾性散乱の寄与が検討された。ニュートリノによる核反応は、r 過程元素合成及び  ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$  の生成にも重要な役割を担っており、具体的な元素合成の計算結果が示された。また、現在の天体物理学においてトピックスのひとつとなっているガンマ線バーストの正体について、光学的には Ic 型超新星のイベントと符合していることから、Ic 型超新星と密接な関連があることが指摘され、そのモデルとして大質量重力縮退星 (collapsar) モデル、超強磁場ミリ秒パルサー (magnetar) モデル、極新星 (hyper nova) モデル等の検討が行なわれた。

一方、恒星内 s 過程元素合成について、中性子源となる( $\alpha, n$ )反応の寄与が複数のグループによって検討され報告された。質量数 90 以上のいわゆる “main component” は、低質量 (太陽質量の 3 倍程度まで) の AGB 星で合成されると考えられている。AGB 星は熱力学的に不安定であり、大規模な脈動・対流によって、外層の水素がヘリウム燃焼領域に混入される。この際ヘリウム燃焼領域中の  ${}^{12}\text{C}$  が  ${}^{12}\text{C}(p, \gamma){}^{13}\text{N}(\beta^+){}^{13}\text{C}$  の連鎖反応を起こし、生成された  ${}^{13}\text{C}$  が起こす( $\alpha, n$ )反応が主たる中性子源であろうと推測されていた。ところが

最新の理論計算によれば、上記の連鎖反応はあまり起こらず、むしろ中質量～大質量星における s 過程と同様、 $^{14}\text{N}(\alpha,\gamma)^{18}\text{F}(\beta^+)^{18}\text{O}(\alpha,\gamma)^{22}\text{Ne}$  で作られる  $^{22}\text{Ne}$  の  $(\alpha,n)$  反応が主要な中性子源として働いている可能性が高いことが判明した。この結果は、前述の古い恒星における [C/N] 比の観測結果とも整合しており、低質量 AGB 星の構造及び s 過程の機構に関して再検討が必要と思われる。ところが、 $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$  反応の断面積データは、1993 年の Stuttgart グループによる測定以降、新しい測定がなされておらず、しかも元素合成において重要な重心系エネルギー 700keV 以下では上限値しか与えられていない。s 過程の定量的議論のためには低エネルギー領域での高精度な断面積測定が望まれる。

### (3) 原子核実験

宇宙や恒星内部において元素合成や熱エネルギー発生に寄与する原子核反応は、反応エネルギーが低く断面積が小さいことに加えて、不安定核や希少同位元素による反応のデータも必要とされているため、それらを地上の実験で測定することは原子核実験におけるチャレンジである。このため世界のさまざまな研究グループがそれぞれ独自の工夫を凝らし、測定対象の拡大と精度の向上を図っている。ヘリウム燃焼期においてもっとも重要な役割を果たす  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  反応の断面積については、現在もっとも低い反応エネルギーでのデータを発表している Stuttgart グループに加えて、LUNA、TRIUMF、阪大-東工大共同、九大、Karlsruhe の各グループが、パルス  $\alpha$  ビームと即発  $\gamma$  線検出法の組み合わせや反跳  $^{16}\text{O}$  イオン分析法等の新しいテクニックを用いたプロジェクトをスタートさせ、予備的な測定結果あるいは研究の進捗状況を報告した。ここ 1~2 年のうちに、重心系エネルギー ~1MeV より上の領域で E1、E2、カスケードそれぞれの遷移に対して従来よりも高い精度の断面積データが提供される見通しである。CNO サイクル及び I 型超新星における rp 過程で重要な  $^{17}\text{O}(\text{p},\gamma)^{18}\text{F}$ 、 $^{17}\text{O}(\text{p},\alpha)^{14}\text{N}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\text{p},\gamma)^{23}\text{Na}$  等の反応や、p 過程に関連する  $(\alpha,\gamma)$  反応、 $(\text{p},\gamma)$  反応に対しては、mA オーダーの大電流ビームを用いた断面積の精密測定が行われている。また、TRIUMF、ORNL、RIKEN、CNS、MSU 等、世界各地の不安定核ビーム施設が本格的に稼動を始め、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{12,13}\text{N}$ 、 $^{14}\text{O}$ 、 $^{17,18}\text{F}$ 、 $^{18,19}\text{Ne}$ 、 $^{21}\text{Na}$ 、 $^{22,23}\text{Mg}$ 、 $^{25,26}\text{Al}$ 、 $^{26}\text{Si}$ 、 $^{33}\text{Ar}$  等、主に超新星爆発や X 線バーストに関与する反応の断面積測定が報告された。その他、イオンビーム入射による核子移行反応を利用した実験方法 (Torojan-horse method、asymptotic-normalization-constant method、等) も開発が進み、直接測定との比較から方法の妥当性がチェックされつつある。

中性子による核反応については、CERN の核破砕中性子源を用いた n\_TOF 計画の現状が報告された。これまでに、 $^{24,25,26}\text{Mg}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{90-95,96}\text{Zr}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{139}\text{La}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{151}\text{Sm}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{186,187,188}\text{Os}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{204,206-208}\text{Pb}(\text{n},\gamma)$ 、 $^{209}\text{Bi}(\text{n},\gamma)$  についての測定が完了している。Os 同位体の核反応断面積は、いわゆる Re/Os 宇宙核時計において重要な入力パラメータであり、阪大-東工大グループが進めている  $^7\text{Li}(\text{p},\text{n})^7\text{Be}$  中性子源を用いた非弾性散乱測定実験や、原研-ダルムシュ

タット工科大グループが産総研で行なっているレーザー逆コンプトンガンマ線源による $^{188}\text{Os}(\gamma, n)$ 断面積測定も報告された。

#### (4) 原子核理論、核反応データベース

宇宙・天体における元素合成過程を解き明かす上で必要となる低エネルギー核反応に関する情報は、断面積が極めて小さく、標的核が不安定核である場合が多いため、信頼できる理論によるサポートが不可欠である。一方、それらの理論の精密化は、原子核物理自体のテーマとしても本質的に重要である。今回は、超新星爆発の際に重要な電子捕獲、ニュートリノ核散乱、 $r$ 過程における中性子ドリップライン近傍の核の直接中性子捕獲、同じく  $r$ 過程において重要な中重核の準位密度のスピンのパリティ依存性、等の研究が紹介された。

また、個々の核反応率データの不定性が元素合成計算に与える誤差が系統的に評価され、それに対応して NACRE、REACLIB 等の天体核データベースが更新されつつある。さらに、ここ数年のうちに不安定核や中性子による核反応のデータが充実してくることが見込まれるため、それらを活用するための国際協力による核データベースの構築が提案された。具体的な方針として

- ・ 評価方法の共通化
- ・ 評価／推奨データの整備
- ・ 定期的な再評価の実施
- ・ 天体物理／核実験／核理論のグループ間の協力・連絡の徹底

が掲げられた。

#### (5) ビッグバン元素合成と宇宙論

現在のビッグバン元素合成理論には、

- ・  $^4\text{He}$ 、 $\text{D}$ 、 $^3\text{He}$  及び  $^7\text{Li}$  の存在量の観測値を同時に矛盾なく説明できるバリオン数密度のパラメータ範囲が存在しない
- ・ 宇宙背景放射の非等方性の観測 (WMAP 等) によって独立に決められたバリオン数密度を用いると、最も精度のよい  $^4\text{He}$  存在量の観測値を再現できない

という問題点があり、現在、活発な議論が行なわれている。本会議でも、ダークエネルギー、宇宙初期の磁場、ブレーン時空などを仮定した理論的試みが発表された。また元素合成に関わる反応の中で、 $p(n, \gamma)d$ 、 $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ 、 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  に関する核反応率データの精度向上が求められた。なお、会議の本編では触れられなかったが、今年 4 月の国際会議 “Conference on Precision Measurements with Slow Neutrons” (NIST 主催) で

PNPI-JINR-ILL の共同チームが発表した新しい中性子寿命 ( $\{878.5 \pm 0.7(\text{stat.}) \pm 0.3(\text{syst.})\}$  秒、従来の世界平均値よりも約 7 秒短い) によって元素合成の計算結果が変更を受ける可能性があり、検討を要することなどがインフォーマルに議論された。

## (6) 隕石、地上サンプルの分析

隕石の同位体分析の分野では、NanoSIMS や AMS 等の高感度イオン質量分析技術を駆使することによって、太陽系形成以前の微粒子試料 (プレソーラー・グレイン) に含まれる  $^{26}\text{Al}$ 、 $\text{Si}$  同位体、 $\text{Os}$  同位体の存在量 (存在比) の分析精度が向上しており、それらを用いての超新星、AGB 星における元素合成及び隕石試料の起源に関する研究成果が報告された。また、中央太平洋の深海底から採取された鉄鉱石中の  $^{60}\text{Fe}$  含有量の年代変化を分析し、太陽系から 20~80 パーセクの距離で、約 280 万年前に超新星爆発が起こったことを推定する研究が紹介され、大変注目された。

その他、25 日 (土) には TRIUMF 研究所の天体核実験用 RI ビーム施設 ISAC の見学会が行なわれ、DRAGON (反跳核質量分析器、写真 3)、TUDA (重イオン検出器アレイ) 等の実験装置が紹介された。

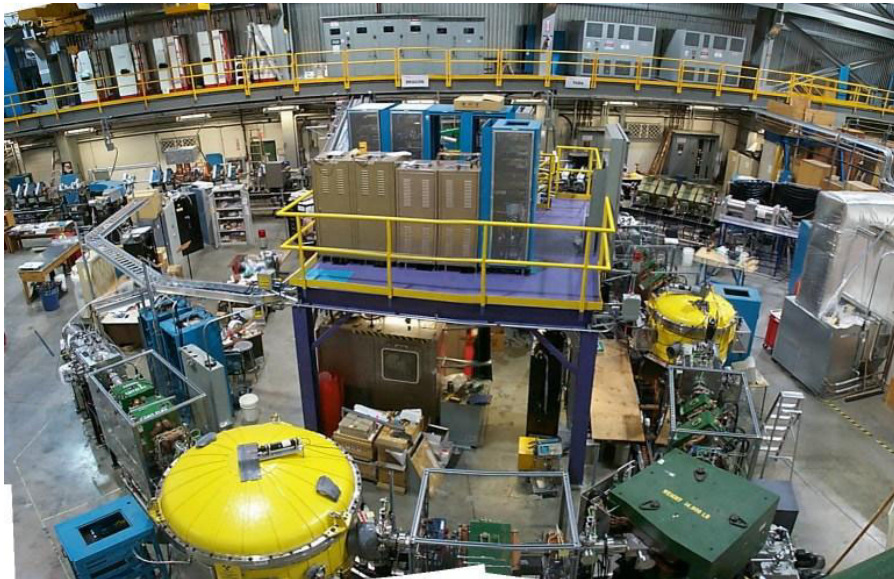


写真 3 反跳核質量分析器 DRAGON

以上、NIC8 シンポジウムの内容を簡単に紹介した。次回は 2 年後の 2006 年夏に、ジュネーブで開催される予定である。不安定核データを活用した  $r$  過程元素合成の計算、ビッグバン元素合成と宇宙背景放射の観測との比較、ニュートリノ核非弾性散乱過程を考慮した超新星爆発のモデル、 $s$  過程の中性子源の問題等、数々の重要な課題についての研

究の進展が楽しみである。



写真4 NIC8 参加者集合写真