

第 7 回原子核と宇宙国際会議 (NIC7) 報告

東京大学大学院理学系研究科原子核科学研究センター (CNS)

久保野 茂

kubono@cns.s.u-tokyo.ac.jp

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺 幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

第 7 回原子核と宇宙国際会議 (NIC7) は、ヨーロッパで始まった宇宙核物理 (Nuclear Astrophysics) の主要な国際会議である。第 1 回目は、1990 年にオーストリアで開かれ、その後 2 年毎に開催されてきた。1996 年から全世界の会議となり、第 4 回目は米国ノートルダム大学で開催された。今回は、アジアで初めての同会議で、第 7 回目である。この会議は、原子核から宇宙を議論する宇宙核物理の会議であるが、伝統的に関連する天体観測や宇宙論、宇宙物理、原子核物理、素粒子物理等を広く扱い、宇宙の進化と諸現象に迫ることを主眼としている。

会議は、2002 年 7 月 8 日～12 日の 5 日にわたり、山梨県富士吉田市のホテルハイランドリゾートで行われた。22 カ国から約 100 名の参加者があり、国内参加者とあわせて、200 名を少し超える参加者があった (図 1 参照)。会期は、台風の 1 日を除けば好天にめぐまれた (図 2 参照)。東京大学大学院理学系研究科原子核科学研究センター (CNS) と理化学研究所加速器研究施設 (RIBF) の共催 (組織委員長 ; 久保野 茂)、天文台の後援で開催された。

本会議は、宇宙核物理の会議であるが、関連する天文観測や実験・理論を基に、宇宙の進化と諸現象について議論した。最初の Introductory Talk では、最近のこの分野での主要な進展、特に大質量星の進化及び関連する鍵の核反応研究の現状が報告された。続いて、次の 11 課題のセッションが議論された。

- (1) ビッグバン元素合成
- (2) 各種観測と元素組成比
- (3) 弱い相互作用とニュートリノ
- (4) 星の中の元素合成と核反応断面積
- (5) s-過程と中性子捕獲反応



図1 NIC7 会議風景

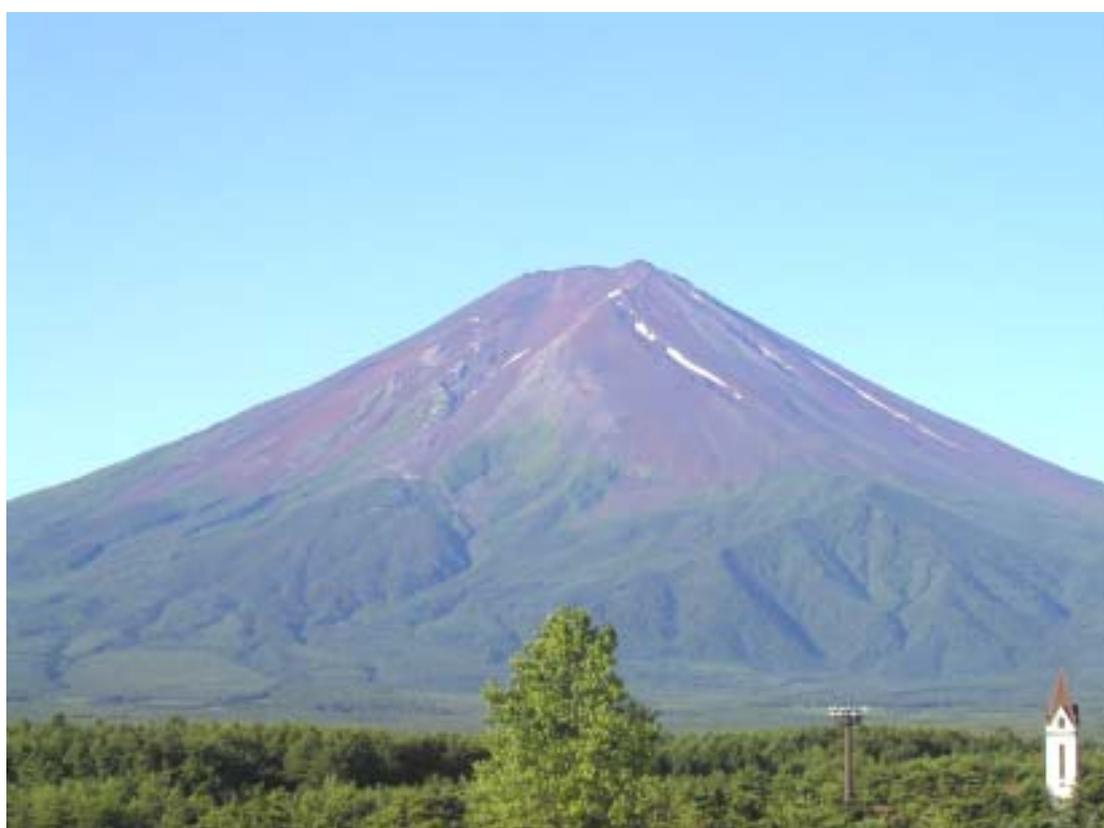


図2 好天に恵まれた朝の紫富士（寺西 高氏撮影）

- (6) 爆発的過程と中性子欠損核
- (7) 爆発的過程と中性子過剰核
- (8) 宇宙の化学進化と年代学
- (9) 高密度物質と状態方程式
- (10) 宇宙核物理の核データ
- (11) 観測と実験の新しい展望

本会議の概要は、次の通りである。観測からは、宇宙背景輻射の揺らぎの高精度観測、大型望遠鏡による同位元素観測が新たに可能になった報告などがあり、核物理の役割が更に重要であることが認識された。また、ハロー星など非常に古い星で、r-過程や s-過程のみからなる重元素を持つ星が観測され、星の進化の理解に重要な情報をもたらした。一方、原子核物理からは、本格的な高品質 RI ビーム施設が稼動に入り、超新星などの爆発的現象における元素合成過程を直接シミュレーションする実験が可能となり、新星の重要核反応についての研究報告があった。また、原子核理論では、大規模殻模型計算などが可能となり、超新星爆発過程の μ -過程を含む精度の高い議論が可能となってきた。太陽ニュートリノ問題では、カナダのサドベリニュートリノ観測所 (SNO) から太陽ニュートリノ振動の観測結果が報告され、問題の重要な部分が矛盾無く理解できる可能性がでてきた。大質量星の進化の問題では、超新星模型を 3 次元で扱い、ジェットなどを取り込んだより現実的な模型などが報告された。また、最近の一連の観測から、ストレンジクォーク星が存在する可能性が報告され、高密度物質研究の重要性も認識された。

本会議の収録は、Nucl. Phys. A から出版される予定である。今回は、日本からの発表研究が約 1/3 と多きな比重を占めたにもかかわらず、内容的に非常に高かったので、日本の研究活動が広く知れ渡る一助になったものと思われる。また、本会議は、研究分野が多岐にわたるので、異なる分野の協力関係を作る好機となった。本会議の 1 つの重要なポイントは、若手の育成であるが、特に今回は、ポスター論文にも 3 分の講演時間が与えられ、若手研究者の発表練習場にもなると同時に、会議が盛り上がった。国内外を問わず、多数の若手研究者や大学院生が参加し、同分野の国際交流を深めたことは、これからの発展に大きな寄与をもたらすものと思われる。

尚、会議の様子と講演の内容は、<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/nic7/> でみる事ができる。
本稿では、以下主な 6 点に絞って報告する。第 7 章は、渡辺によるものである。

2. 同位元素の観測

天文学では、元素の観測が宇宙の進化や諸現象の解明に重要であることが良く知られているが、近年の観測では、更に同位元素の同定が可能となってきている。衛星での核ガンマ線の観測や、SUBARU などの大型高性能望遠鏡によるアイソトープシフトの観測

から、同位元素比が求められるようになってきた。例えば、江戸時代に爆発が観測されたカシオペア A の超新星残骸からの ^{44}Ti 放射性同位元素の崩壊に伴う核ガンマ線 (^{44}Ca の第 1 励起状態の崩壊の γ 線) 観測が報告されている。これは、超新星爆発時に ^{44}Ti あるいはその親核が大量に合成されたことを示している。したがって、単に元素と言うだけでなく、核図表の上で原子核を特定する事になるので、この生成に関わる核反応を知ることが可能となる。また、超新星残骸までの距離がわかれば、 ^{44}Ti の量が定量化されることから、超新星時の ^{44}Ti の生成量が判る。これらは、超新星模型への非常に強い制限を与えることになる。

したがって、核ガンマ線の観測では、比較的長寿命の放射性同位元素の観測を対象として探査が続いている。 ^{44}Ti のほかに ^{26}Al が既に観測されているが、その生成源は、良く判っておらず、興味深い問題である。一方、 ^{22}Na などは、新星などで合成される可能性があり、その探査が進んでいるが、未だ観測に成功していない。また、既に知られている隕石のプレソーラグレイン (太陽系前隕石) 中の同位体異常問題も、同種の観測と考えられる。

更に、興味深い結果が 2 つ報告された。一つは、古い種族の星の観測で、金属量が非常に少ないにもかかわらず、ほぼ太陽系の r-過程元素組成を純粋に持つような星や、同じ金属欠乏星でほぼ s-過程元素組成のみを持つ星の観測が報告された。ここで、金属量が少ないと言うことは、非常に古い星であることを意味する。これらは、重元素合成過程と星の進化を考えるうえで、非常に示唆的である。

また、新しい観測結果として、ストレンジクォーク星の候補が観測されたという報告である。コンパクトな星としては、これまで白色矮星や中性子星が知られている。中性子星が直径約 10 km 程度と考えられているが、ストレンジクォーク星は、核子ではなくクォーク物質からなる事から、よりコンパクトな直径 7~8 km のオブジェクトと考えられている。しかし、観測における星の大気の問題などから、確定的な結論は得られていない。RHIC の高エネルギー重イオン衝突実験とあいまって、高密度物質研究の重要性が再認識された。

3. 原子核実験室の研究

元素の合成過程はとりもなおさず原子核反応であるので、宇宙での元素合成過程の研究は、問題のサイトの温度領域 (正確にはガモフエネルギー領域; 荷電粒子間の核反応率が、非常に低いエネルギー領域では、トンネル効果とそのサイトのマックスウエル・ボルツマン分布で定まる。このオプティマム温度域を指す) で核反応を再現して調べることが最も直接的である。新星や超新星などの高温高密度下の元素合成過程は、急速に核反応の連鎖が起こることから、不安定な同位元素を含む核反応が主となる。これらの研究を行うべく、低エネルギーの高品質の RI ビーム施設 (ISOL + 後段加速型) が新ルー

バン大学の先駆的な施設に続き、ORNL や TRIUMF で稼動を始めている。また、飛行分離型ではあるが、低エネルギー生成法を用いた東大原子核科学研究センター（CNS）の施設 CRIB など近年完成した。

これらの施設では、不安定な同位元素の天体核反応の研究が始まっている。軽い陽子過剰核の RI ビームを用いた実験が主に行われている。例えば、TRIUMF の ^{21}Na ビームを使った $^{21}\text{Na}(p,\gamma)^{21}\text{Mg}$ 反応や ORNL の ^{17}F ビームを使った $^{17}\text{F}(p,\alpha)^{21}\text{Mg}$ 反応、更には CNS の $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反応の研究などである。また、CERN では、高エネルギー核破砕反応からの中性子線を宇宙核反応の研究に使う n-TOF プロジェクトが稼動に入った。

直接法のもう一つの新しい方法は、周回する電子ビームにレーザー光を照射したとき後方散乱で得られる光子は、エネルギーの揃ったガンマ線エネルギーを有する。この光子を使うことで、陽子や α の捕獲反応の逆反応を調べることができる。この方法を使って、超新星の r-過程で重要視されている $\alpha(\alpha n,\gamma)^9\text{Be}$ 反応の逆過程が調べられた。今後、光子ビーム強度が増すと、宇宙核物理研究の有力な方法となるであろう。中高エネルギー重イオンのクーロン分解法と違って、実光子であるので、きれいな測定となる。

間接的な方法として、漸近係数法（ANC）が、中高エネルギーの分解反応にも使える可能性が示された。

r-過程の研究では、問題の中性子過剰核の生成方法と基本的パラメータである質量や半減期を決める実験研究があげられる。近年、高エネルギーU ビームのクーロン核分裂反応から大量の中性子過剰核が効率よく得られることが知られているが、それらの核種を実験蓄積リングに入れることで、質量や寿命が高精度で決定できることが示された。これらの研究は、理化学研究所の RIBF 計画が完成すると本格的に研究が進むことが期待されている。

宇宙の元素合成過程の研究は、核図表のほぼ全面に渡る問題であるので、これまでの種々の核分光手法が間接的方法の重要な手段と考えられる。

4. 太陽ニュートリノ問題

太陽は星の典型的な 1 つとして、進化の過程を研究する格好の材料であり、太陽ニュートリノ問題は、まさにこの問題である。特に、星の進化に伴う核反応の役割を明らかにすることが重要である。太陽質量程度の星の主系列段階では、基本的に pp チェーンが水素燃焼過程の主要な過程となる。pp チェーンのシナリオによれば、水素からヘリウムが主に合成され、小さな分岐として ^7Be や ^8B が合成されると考えられる。これらの核種は、太陽の中心部で合成されるので、唯一その崩壊に伴うニュートリノが我々にその情報を運んでくれる。観測されたニュートリノ強度が予想の約半分しかないというニュートリノ問題は、新しい段階にきた。スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測の報告の他に、SNO から有意のニュートリノ振動（ニュートリノが地球の検出器に届くまで

に他種のニュートリノに変わること)の存在が報告され、問題の大きな部分が解決したようである。しかし、 ${}^7\text{Be}$ や ${}^8\text{B}$ 合成の核反応の S-因子 (宇宙物理的 S 因子; 断面積からトンネル効果などの主要なエネルギー依存性を因子として除いたもの) のデータは大きな誤差を含み、かつガモフエネルギー領域でデータが無いので、太陽模型の検証には、更なる実験的検討が不可欠である。また、太陽模型の精度があがれば、ニュートリノミクシングについての情報が得られる可能性がある。

5. 原子核理論の進展

特に新星や超新星などの爆発的核合成過程は、多くの未だ良く判っていない原子核を巻き込んだ連鎖核反応と考えられる。ここで、実験的研究が非常に困難な過程は、理論による評価を用いざるを得ない。例えば、弱い相互作用による核反応や励起状態を標的とする核反応過程である。理論の進展では、大規模殻模型計算が可能となり、超新星初期のニュートリノ過程の問題で、ガモフテラー遷移強度の精度の高い評価を可能としている。また、QRPA などを使うことで、中性子過剰核の準位密度や質量を計算し、r-過程の理論計算精度が高められた。もちろん、実験的な検証を増やすことで、理論の精度を高める必要がある。

6. 超新星の理論

重力崩壊型の超新星 (I 型の超新星) 模型は、ニュートリノ相互作用やニュートリノ加熱のメカニズムを取り入れることが非常に重要であることが判ってきた。特に、ニュートリノ加熱による α 過程は、r-過程のサイトと考えられ、その元素合成は、一旦陽子と α 粒子のプラズマとなり、ヘリウムから始まると考えられるようになってきた。したがって r-過程は、軽い中性子過剰核を巻き込みながら重元素を合成してゆくものと考えられる。つまり、鉄より軽い中性子過剰核の研究も r-過程研究に重要であることが認識されるようになった。

I 型の超新星の模型は、非球対称の 3 次元の取り扱いに、ジェットを取り込んだ模型などが報告された。また、従来の II 型の超新星より 1 桁ほど大きな運動エネルギー 10^{52} erg を開放するハイパーノヴァについて、チャンドラセカール質量限界の白色矮星の核爆発型の模型などが議論された。

銀河の化学進化は、星の元素合成と太陽組成の間をつなぐ重要な問題であると同時に、宇宙年代学の精度を高めるためにユニークな位置をしめている。第一章で述べたように、金属が非常に少ないにもかかわらず、ほぼ重核領域で r-過程元素組成のみの分布や s-過程元素組成のみの分布を持つ星が観測されている。これらの解析が進められているが、星の進化の初期についての新しい知見が得られる可能性がある。また、宇宙年代学の研究には r-過程や s-過程の研究の他に、宇宙の年齢に匹敵する長寿命核種や、多価イオンの束

縛状態ベータ崩壊核種の研究なども重要となる。

7. 宇宙核物理の核データ (渡辺)

NIC7 のテーマである「宇宙核物理」は、昨年つくばで開催された核データ国際会議 (ND2001) でも主要なトピックの 1 つ (Nuclear Data relevant to Astrophysics and Frontier Nuclear Physics) として取り上げられており、初日に行なわれた M.S. Smith 氏 (ORNL) による印象的な基調講演を記憶されている方も多いことと思う。また、今年度から、シグマ委員会の中にも千葉氏 (原研) をリーダーとする天体核 WG が立ち上がり、核データコミュニティの間でも関心が高まっている分野である。この分野には門外漢である筆者 (渡辺) は、国内での NIC7 開催ということもあり、宇宙核物理研究の最前線の様子を知るために、参加することにした。以下、核データコミュニティの 1 人として、興味を引いた内容をいくつか取り上げて報告する。

星内部や超新星爆発での元素合成過程を研究するためには、膨大な数の不安定核が関与した核反応のネットワークを構築し、核反応率や崩壊率を入力情報として生成される元素分布を計算する。基本的には、中性子を媒介とする原子炉内での核燃焼計算と同じである。宇宙での元素合成では、中性子以外に陽子や α 粒子、光子が関与する反応も重要となり、膨大な核データ (核反応と核構造) を必要とする。対象となる主な核反応は、エネルギー領域が数 100keV 以下で、 (n,γ) , (p,γ) , (α,γ) , (α,p) , (γ,n) , (γ,p) 反応などである。

この分野の核データのニーズ・特徴は、不安定核 (中性子過剰核や陽子過剰核) である。従って、実験データは非常に乏しく、従来の核データ評価で採用されてきた経験式や現象論的なアプローチにはおのずと限界がある。S. Goriely 氏 (ブリュッセル自由大) は、reliability の観点から微視的な理論計算 (基底状態の性質、準位構造・準位密度、光学ポテンシャル等) の重要性を強調した。微視的な光学ポテンシャル (JLMB) や QRPA 計算による γ 強度関数を用いた統計モデルによる中性子捕獲断面積計算を行い、中性子過剰核では、光学ポテンシャルのアイソベクター項が非常に大きな影響を与えることを示した。微視的な理論の適用というのは、この分野のみならず、核データ評価一般に言える今後の理論計算の方向性を示していると思う。

個々の核反応率の不確定性が元素合成の最終結果に与える影響に対する誤差解析に関する報告もあった。M.S. Smith 氏ら (ORNL) は、Monte Carlo 法による誤差解析法を開発し、反応間の相関や重要な反応の同定結果を示した。核データの精度検証のための誤差解析は原子力 (核) 工学の世界ではよく行なわれており、その関連性に興味を持った。なお、彼らの共同研究者の 1 人に D.L. Smith 氏 (ANL) が加わっており、核データ分野での経験が応用されている例ではないかと思った次第である。

実験においても興味深い発表がいくつもあった。新しい物理量を測定するためには、新しい実験技術の開発が不可欠である。国内外での RI ビーム施設を使った多くの実験成

果が報告された。国内開催もあり、理研や東大 CNS からの報告が目立った。RI ビーム以外の新しいプローブとして、宇都宮氏（甲南大）による単色レーザーコンプトン光を利用した (γ, n) 反応測定 ($^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180\text{m}}\text{Ta}$) の報告が興味を引いた。核データコミュニティの中でも、原田氏（サイクル機構）が本手法を光核反応断面積測定に応用した実績がある。核データ研究を魅力あるものにしていくには、今後、RI ビームも含め新しいプローブの使用した断面積測定法を開発していくことも望まれるところであろう。核データ関連では、CERN で進められている n-TOF プロジェクトの現状について、F. Käppeler 氏により報告があった。強固な遮蔽体（鉄 3.2m とコンクリート 10m）を導入すること、1MeV 以下のバックグラウンド中性子を 1/10 ~ 1/20 に減らすことに成功し、2002 年 3 月より、Sm, Pb, Mg 同位体の (n, γ) 測定が開始されたとのことである。ご存知のように、n-TOF では ADS 関連の核データ収集も計画されており、今後の動向が注目される。

ここ数年、筆者は、元素合成に必要なエネルギーよりかなり高いエネルギーの領域である 20MeV 以上の核データ研究を行っている。高エネルギー粒子入射核破碎反応では数多くの不安定核が生成され、それらが放射性崩壊を繰り返し、残留核の質量・電荷分布を形成する。重い核から軽い核への核変換（核図表では、右上から左下へ）の流れであり、元素合成とは逆のプロセス（いわば、“下向きの核変換”）である。講演を聞きながら、計算に必要な不安定核の原子核情報（質量、半減期、準位密度など）には共通点が多いことを再認識した。宇宙核物理分野で得られた不安定核の知見を高エネルギー核データ評価にもフィードバックしていければと思った次第である。

宇宙核物理に関しては素人の筆者としては、総じて、どの講演もとても新鮮に感じた。富士の裾野から、宇宙で繰り返される星の一生のドラマに想いを馳せながら、フェムトワールドの原子核物理がいかに広大な宇宙に深く関係しているかについて考える、何とも楽しい 5 日間であった。核データコミュニティが、これまでに蓄積してきた経験を生かして、今後、この夢のある新しい分野にも貢献していく道を開拓していきたいものである。