新研究グループの発足に際して

元素合成から原子核・ハドロン物性を探る

多体ハドロン系理論研究グループ　千葉　敏

我々の周囲には、様々な元素が存在し、それらが複雑に組合わされこの色彩豊かな世界が構成されている。それでは、これらの元素はいつ、どこで、どのようにして出来たのだろうか？宇宙に存在する元素の分布は、宇宙開闢以来繰り広げられてきた原子核とハドロンを巻き込んだ宇宙・天体現象が複雑に絡み合って決定されたものである。我々のグループは、宇宙に存在する元素の分布を宇宙からのメッセージと捉え、これらの元素の起源を探ること、すなわち元素合成の研究を通して、原子核・ハドロン、そして宇宙、銀河、星の進化についての知見を得ることを目的とする。元素合成にも様々な過程があることが知られているが、我々が主な対象とするのは、宇宙の始めに起こったビッグバン元素合成と、r-過程（rapid process、高速過程）と呼ばれる高温、高密度状態での元素合成過程である。

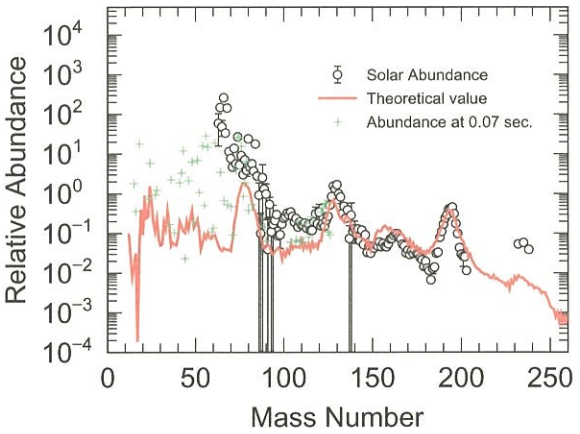
標準的な宇宙のモデルでは、宇宙は約140億年前にビッグバンによって始まったと考えられている。ビッグバン宇宙論によると、生まれたての宇宙は高温、高密度のため、クォーク、反クォークやグルーオン、ヒッグス粒子などが自由に飛び交い、重力、電磁力、弱い力、強い力は統一され同じ強さを持っていた。その後、宇宙の膨張とともに４つの相互作用の分岐が起こり、クォーク・ハドロン相転移により陽子、中性子、中間子などが作られた。さらに温度が下がると、陽子、中性子を種として重陽子やヘリウム、リチウム程度までの軽い元素が生成された。この時点でビッグバンから３分後である。その際のバリオンの組成はヘリウムが24%程度で残りのほとんどが水素であり、水素、ヘリウム、電子、輻射とニュートリノからなる我々の宇宙が形成された。それ以外の、現在宇宙に存在する様々な元素は、ビッグバンにより生成された水素とヘリウムを主成分とする星の中で様々なプロセスにより営々として作られたのである。その中でも、鉄より重い元素の約半分、特に原子力で重要なウランなどのアクチノイドの100%は、星の終末期に起こる爆発の際に、r-過程と呼ばれる、非常に中性子過剰な原子核を経由する中性子捕獲反応の連鎖によって生成されたと考えられている。

実は、星の終末期の様子は質量によって大きく異なる。質量が太陽の８倍以上の星は内部での核融合反応が鉄を形成するまで進行し、最終的に鉄の芯をもつタマネギ状の構造になる。そして、中心温度が数十億度近くになると、高エネルギー光子を吸収し、鉄がヘリウムと中性子に分解する反応が起こる。この反応は吸熱反応であるため、星の中心温度は一気に下がり、星はその外層を支えられずに重力崩壊を起こす。その時、外層部の温度は落下によって解放された重力エネルギーと中心核からのニュートリノ風で一気に上がり、暴走的な核反応が起こる。その結果、外層は爆発的に膨張、飛散して超新星爆発が起こる。この時、ニュートリノによって暖められた外層部で、r-過程が生起しアクチノイドに至る重い核が形成されたと考えられている。一方、芯は外層の落下により圧縮され、中性子星として残るかブラックホールとなる。中性子星は半径10kmほどの大きさだが、太陽の1.4倍程度の質量をもち、密度は水の1,000兆倍にも達する。r-過程は中性子星同士が衝突する際に起こるという考え等もあり、確定しているわけではないが、いずれにせよ、r-過程

とビッグバン元素合成は中性子星の周辺やビッグバン直後に起こるため、その環境は極限的なハドロン物質の性質によって決定されると言って良い。従ってこれらの元素合成過程を詳細に調べ、理論計算の結果を天体観測と比較することで、元素合成の起こった場所がどのような状況にあったか、そして、そのような環境を実現するハドロン物質、特に中性子星物質がどのようなものであるかを知りたい、というのが我々の研究目的の一つである。ハドロン物質については、最近非常に密度の高い星、クォーク星が見つかったとの報告もされており、クォーク・ハドロン物理の観点からもホットな話題である。我々は、高密度ハドロン物質の理論的研究を行い、中性子星内の中間子凝縮、バリオンの超流動やクォーク星の性質、それらにより規定される元素合成のサイトの物理条件を予測し、観測結果を説明できるハドロン多体系の性質解明を目指す。

r-過程は、その生起するサイトが完全には特定されていないとはいえ、高温、高中性子流束下の環境で原子核に中性子が急速に捕獲され、ほぼ中性子ドリップライン近傍の原子核種領域を通ってウラン、トリウムより重い元素が生成される過程であると考えられている。そして、最終的にはβ崩壊やβ遅延核分裂等を繰り返し安定核近傍の原子核が生成され、それが太陽系組成として観測される。このようなプロセスによって生成される核種の分布を理論的に計算するためには、膨大な量の原子核についての情報が必要とされる。具体的には原子核質量、励起準位構造、核反応率、α崩壊ー、β崩壊ー、核分裂崩壊率等である。計算の一例を観測値と比較したものを図に示す。このようにr-過程に関係する原子核の多くは半減期が極端に短いため、地上でその性質や核反応断面積を測定することはほぼ困難であり、これらの情報を得るには理論計算が不可欠である。従って我々のグループの他の目的の一つは、r-過程元素合成を精度良く理解するため、原子核の構造と反応についての理論研究を推進し、その結果を用いて元素合成計算を定量的に行うことである。

r-過程で重要な中性子反応断面積に関しては、原研を中心に原子力分野で40年以上に渡って精密に整備されてきた経験がある。核種こそ安定核及びその近傍とアクチノイド領域に限られるものの、要求される精度が非常に高く、そのために実験データベースの整備や理論計算手法の開発、データの積分的検証などが国際



図の説明：太陽系における核種の質量分布の測定値（○）と、II型超新星爆発で半径10km、太陽の倍の質量を持つ原始中性子星ができ、それが放出するニュートリノ風下で陽子、中性子と電子のスープからr-過程元素合成が起こると仮定した場合の計算値（赤線）の比較。十印はr-過程が終了する以前の中間状態における質量分布で、^{74}Cr、^{76}Feなどの中性子過剰核が多数生成されている。

的協力の下、精力的に行われて来た。原子力用のデータでは、熱中性子炉、高速炉、核融合炉などへの適用を可能とするため、エネルギー領域が10^{-5}eVから20MeVと広く、天体元素合成で必要とされる領域が完全にカバーされている。また、特定の質量領域に限らず、水素からアクチノイドまで広い範囲がカバーされている。しかしながら、原子力の今後の展開として重要な高燃焼度化や加速器による核変換処理、加速器駆動のエネルギー増幅器では、天然に存在しない原子核、すなわち不安定核に対する断面積が必要とされる。その点で、原子力用データの整備とr-過程用核データの整備には重要な共通点がある。核データ、すなわち原子核工学の研究者と原子核物理、天体物理の研究者を巻き込んだ協力体制を構築して、r-過程に関係する3,000核種とも言われる原子核の構造と反応率を、中性子入射反応を中心にして整備する予定である。このために、原研内の他グループ、さらには国立天文台等原研外のグループとも密接な連携の下、元素合成に関連する原子核物理と原子核データの研究を行っていく。

一方、最近の天体観測技術の著しい進歩により、宇宙が誕生してまもなく生まれたと考えられる古い星（金属欠乏星）の中に含まれる放射性原子核と安定核の存在量の比が観測可能になり、それを理論的に予測した初期値と比較することにより星の年齢の推定が可能となっている。^{14}Cを用いる考古学的推定と同様の、宇宙考古学とも言える方法である。このような原子核対（宇宙核年代計）の候補として、^{232}Th/Eu比、^{238}U/Eu

比、$^{187}Re/^{187}Os$比、$^{232}Th/^{238}U$等が考えられている。^{232}Thの半減期は140.5億年、^{238}Uは44.7億年、^{187}Reは435億年である。一方宇宙の年齢は約137億年と推定されているため、これらの原子核の半減期は古い星の年齢推定にちょうど良い値である。日本のすばる望遠鏡をはじめとする最近の大型望遠鏡は、銀河の端にある金属欠乏星中の元素分布や、特定の元素については同位体組成まで測定可能であり、このような宇宙考古学を可能にするようなデータが次々と生産されている。また、宇宙背景輻射の詳細観測によって宇宙論パラメータについてもかつて無いほど理解が進んできた。我々はこれらの観測結果と、元素合成研究で得られた結論を組み合わせることによって、銀河の中での星形成の歴史や銀河の進化、宇宙年齢などについての推定を行い、宇宙・天体物理における独自のメッセージの発信を行うことをグループの3番目の目的とする。

元素合成過程の研究は、原子核理論、ハドロン多体論、核データ、宇宙・天体物理という広範な分野にまたがる知識が必要とされるが、異分野の研究者の協力によりユニークな成果を産出できる可能性を秘めたテーマである。当グループは、広く原研内外のグループと協力し、元素合成に関連する原子核・ハドロン理論に立脚した活動を行うことで当該分野における研究の進展をめざし、さらにそれらを総合し、広く宇宙・天体現象についての独自の理解を行うことを目的とする。