



5.13 光核反応による重元素合成過程

Nucleosynthesis by photodisintegrations

○早川 岳人、静岡 俊行、梶野 敏貴
 Takehito HAYAKAWA, Toshiyuki SHIZUMA, Toshitaka KAJINO*
 原研関西研 光量子科学研究センター
 *国立天文台

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,
 Japan Atomic Energy Research Institute
 *National Astronomical Observatory

重元素の起源を知ることは、銀河系、生命、文明の起源を知る上で極めて重要である。ヨウ素、亜鉛などの原子は生命に欠かせない重元素であり、文明の発達という観点からは、半導体製造に必要な希土類、エネルギーとして不可欠なウラン、トリウムなどがある。これらの重元素が無ければ現在の文明は存在しえなかった。このように、重元素の起源を知ることは生命、文明の源の一つを知ることに他ならない。その一方で、近年の天体観測によって銀河系の周辺部の存在する球状星団には重元素が非常に少なく、銀河系の中心部付近では巨大ブラックホールに代表されるように天体活動が極めて激しいことが判明してきた。すなわち、銀河系の周辺部では重元素が不足しており、中心部付近では重元素が存在しているが激しい天体活動のために、我々のような文明を持つ生命の発生が困難であることが判ってきた。ちょうど地球の公転軌道の位置が適切でなければ、水が液体で存在せず生命が発生できなかった点に類似している。このように、どのような過程で重元素が生成されたのかを知ることは太陽系の起源を知る以上に興味深い。

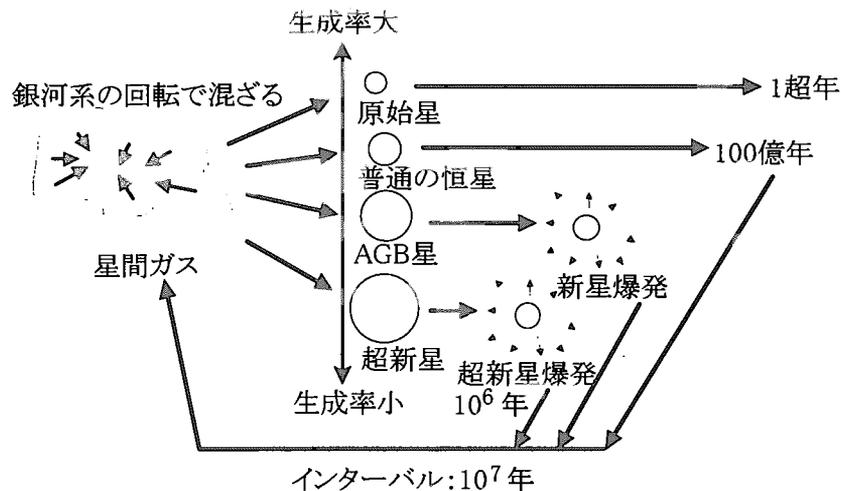


図1、恒星の生成と消滅のサイクル

重元素は、元素の種類によって様々な恒星の中の様々な環境で生成される。また、恒星を構成する元素の種類と量は恒星の性質、恒星内部の核反応を決める。恒星内部の元素合成過程によって生成された元素は新星爆発、超新星爆発等によって銀河系内の宇宙空間に放出される。様々な恒星から放出された元素は、希薄なガスとなって漂い、銀河系の回転によって

互いに混ざり合う。そして、そのような星間物質の中から次世代の恒星が生成され、さらに次のサイクルの恒星を構成する新しい元素を生成する(図1参照)。このような過去の複雑なサイクルを繰り返してきた星間物質から、我々の太陽系が生成された。そのため、太陽系を恒星する元素は、銀河系における過去の元素合成の集大成であると言える。元素の含有量は過去の恒星の分布、性質、環境を解き明かす鍵となる。既に述べたように銀河系の中で重元素の分布が一様でないということは、銀河系の化学的進化と重元素の関係が密接に絡んでいることを示している。重元素の起源を知ることは恒星の進化だけでなく銀河系の化学的進化を解明することに他ならない。

光の原子核の相互作用、すなわち光核反応によって原子核を変換することが可能である。このような反応は、天然においても発生したと考えられる。太陽系に存在する重元素の約99%はs過程と呼ばれるAGB星などで起きていると考えられるゆっくりした中性子捕獲反応と、r過程と呼ばれる超新星爆発で発生すると考えられる急速な中性子捕獲反応で生成されたと考えられている。その一方で、陽子過剰領域側には中性子捕獲反応では生成できないp核と呼ばれる安定核が存在している。このp核を生成する元素合成反応をp過程と呼ぶ[1]。このp核の起源は、本質的な核反応、その核反応が発生する宇宙における環境などが全く確定しておらず、過去50年間にわたって議論されてきた。その中で以下のような過程がp過程として提案された。中性子星のX線バーストやブラックホール周辺部のディスクで発生すると提案されている急速な陽子捕獲反応による過程(rp過程)の冷却後のベータ崩壊による生成[2]、O0白色わい星等が考えられる、既に存在している重元素をベースにしたゆっくりした陽子捕獲[3]、超新星爆発の初期段階のコアの爆縮に伴って発生するニュートリノ風によるニュートリノ過程[4]、大質量星の末期の超新星爆発等の膨大な光が発生する環境下での光核反応[5]等である。このように、p過程の本質の解明は、重元素の起源を知るという問題において非常に重要である。

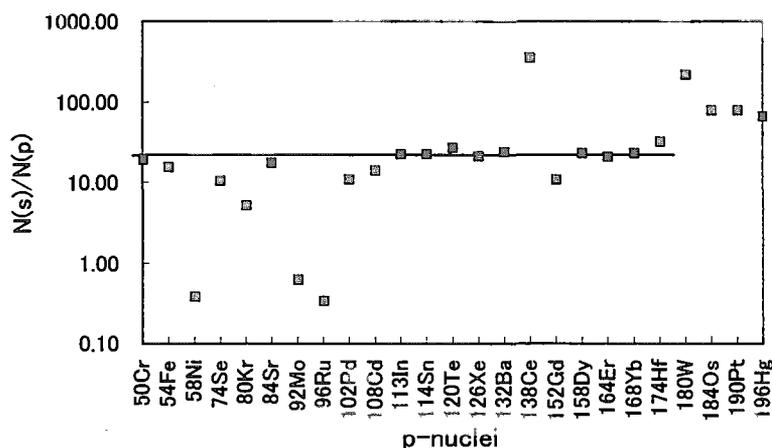


図2 s核とp核の同位体比。広い質量領域で比が一定である。

ここでは、p核が光核反応で生成された可能性を探るために、太陽系の元素存在比の解析

を行った。p 核のほとんどは陽子過剰領域側に存在する孤立した安定同位体である。そのような p 核に対して、中性子数が 2 個多い安定同位体が存在しており、多くのケースで純 s 核である。純 s 核とは、どの同位体のほとんどが s 過程で生成された原子核である。そのような 2 つの安定同位体の同位体比をプロットした結果、今まで全く知られていなかった p 過程と s 過程の元素の存在比にある経験則があることを発見した(図 2 参照)。広い質量領域にわたって同位体間に強い相関があることは、p 核が既に存在していた s 核から中性子を 2 個剥ぎ取る (γ, n) 光核反応で生成されたことを強く示す。すなわち、これまで様々なモデルによる計算が成されてきたが、この経験則は p 過程の本質が、超新星爆発時の光核反応によるものであるとする最初の客観的な観察による証拠であると言える。問題となるのは、いくつかの大きな平均値からのずれである。これらのずれは定性的に、本質的な説明をすることが可能である。まず、大きな 2 つのピークである Ce と W においては、その 2 つの同位体の内 s 核が純 s 核でなく、r 過程による寄与が大きく混ざっているためである。これらの核においては、r 過程の後のベータ崩壊に対してシールドする安定核が存在していない。このような重い領域では r 過程の寄与があれば、それは s 過程の寄与の数倍から 10 倍以上である。Mo と Ru は大きな谷を形成しているが、これらの s 核は実は p 過程の寄与が非常に大きい。これらが s 過程の主な生成経路から外れているためである。Ni では、 ^{58}Ni が非常に大きな同位体比を持つ。Ni 以下の軽い核は通常、複雑な Si-burning 過程や、 α 過程で生成されると考えられている。そのため、本来はこのレンジの外に置かれるべき原子核である。

一方、原子核宇宙時計とは、その元素合成過程が何時発生したか知ることによって銀河系の進化を探求する重要な手段である。しかし、p 過程には今まで銀河系の年齢に対して適切な原子核宇宙時計が全く知られていなかった。経験則を応用することで、銀河年齢に対して有効な p 過程の唯一つの原子核宇宙時計を提案した。

p 核と呼ばれる重元素の起源が、超新星爆発等の膨大な光が発生する環境下での、既に存在していた s 核から光核反応で生成されたことを強く示す最初の観察事実の基づく証拠である経験則を発見した。また、この経験則の応用によって p 過程の長寿命を持つ唯一つの原子核宇宙時計を提案した。

参考文献

- [1] E. M. Burbidge, Rev. Mod. Phys. 29, 548 (1957).
- [2] H. Schatz, Phys. Rev. Lett. 86, 3471 (2001).
- [3] S. Goriely, Astron. Astrophys. 383, L27 (2002).
- [4] A. Heger, Proceedings of Nuclei in Cosmos VII, Fujiyoshida, Japan, 2002, in press.
- [5] M. Rayet, Astrophys. 298, 517 (1995).