

太陽系元素の起源と ^{26}Al

和南城 伸也¹

1. 生きた化石, ^{26}Al

太陽や地球, そして我々の体を作る元素はいつどこからやってきたのだろうか. よく知られているように, ビッグ・バンで作られた水素やヘリウムなどの軽元素を除く大部分の元素は, 超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれたものである. それでは, 超新星爆発さえあれば我々の住んでいる太陽系を作るための材料がそろうのであろうか? 答えは否である. 事態はそれほど単純ではないのだ. 我々の太陽系は, 実に様々な要因がからみあってできあがったものなのである. 本論文では, 隕石化学やガンマ線天文学において重要な役割を果たしている放射性元素 ^{26}Al の合成を軸として, 新星爆発や超新星爆発, AGB星における最新の元素合成のモデル計算と, 最近の隕石の分析結果との関係から, この謎に迫っていく(私は現在新星爆発における元素合成の計算を行っている最中なので, 新星爆発を中心に話しを進めていくことにする).

^{26}Al は約100万年で ^{26}Mg にベータ崩壊する放射性元素であり, 地球上には天然に存在しない(安定核は ^{27}Al のみ). それでは, なぜ存在すらしていない元素を問題にしなければならないのか? 実は, この放射性元素は我々の太陽系の母体となった原始太陽系星雲のガス中に存在していたのらしいのだ. なぜそんなことがわかるのか? それは, 天が我々に授けてくれた贈り物, すなわち隕石を分

析した結果明らかになったことである.

隕石の中でも, 特に, 炭素質コンドライトとよばれる隕石(コンドルールとよばれる丸い粒を含む)は, 太陽系が形成されて以来, 一度も溶けた形跡がない. つまり, 太陽系が作られたときの元素組成をそっくりそのまま記憶している「化石」であると考えられている(これに対して, 他の隕石や地球を作る岩石などは, 太陽系が形成されてから少なくとも一度は溶けたことがあり, 太陽系形成時

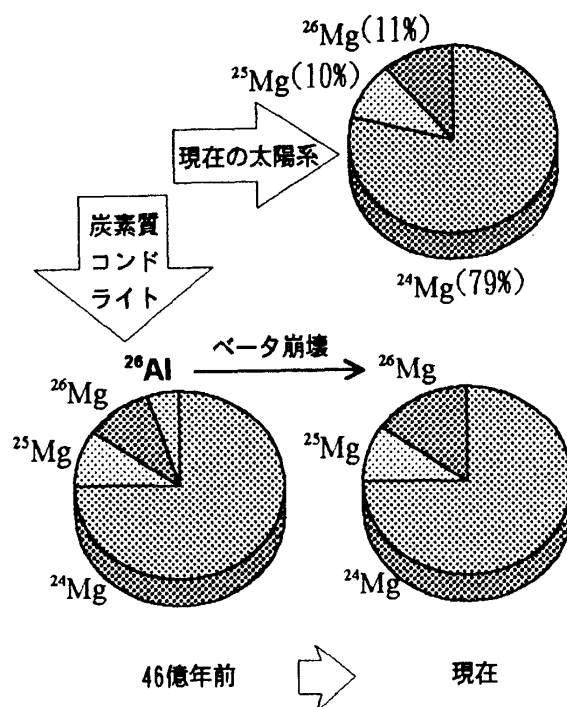


図1 同位体異常がおこるわけ

¹ 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

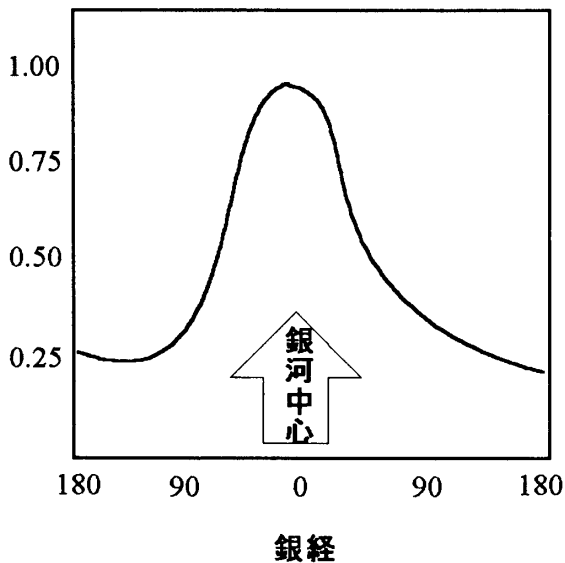


図2 銀河系内における ^{26}Al の強度分布

の記憶はきれいさっぱり失われている)。さて、この炭素質コンドライト隕石を分析してみると、マグネシウムの2つの同位体の存在度が、他の隕石や地球岩石のそれとは微妙に異なるのである(通常は、同位体の存在比はいかなる隕石や鉱物、岩石などでもほぼ同じ値を示す)。その原因は、放射性元素 ^{26}Al にあると考えられる。すなわち、まずアルミニウムとして鉱物を作る結晶にとりこまれた後、 ^{26}Mg にベータ崩壊したために ^{24}Mg に対する ^{26}Mg の割合が大きくなったのである(図1)。こうして、少なくとも太陽系が形成された約46億年前には ^{26}Al が存在していたことがほぼ確実になった。ところが、この元素は現在もなお存在していたのである。いったいどこに？ それは我々の銀河系全体に、である。

80年代初頭に打ち上げられたガンマ線天文衛星は、 ^{26}Al のベータ崩壊に伴う核ガンマ線の検出に成功した[2]。そして、その検出量から、現在我々の銀河系には太陽質量の約3倍もの ^{26}Al が存在していることが明らかになったのである(図2)。この事実は、我々の銀河系では、少なくとも太陽系が形成された約46億年前から現在に至るまで、おそ

らく定常的に ^{26}Al が生成され続けてきたであろうことを予想させる。もしそうならば、太陽系形成時の ^{26}Al の生成源をつきとめるには、現在の銀河系を探索すればよいということになる(ただし、銀河系全体や太陽系周辺での元素合成の様子が、46億年前から現在までほとんど変わっていないものと仮定する)。すなわち、放射性元素 ^{26}Al は、太古の昔(隕石化学)と現在(ガンマ線天文学)を結びつける、まさに「生きた化石」なのだ。そこで、まずは現在の銀河系で合成されている ^{26}Al に目を向けてみよう。

2. ^{26}Al 合成の現場

恒星の内部では核融合反応によって様々な元素が作られるが、それが何らかの原因によって星間空間にばらまかれることがない限り、太陽系を作る原材料にはなり得ない。元素をばらまく手段としては、新星爆発、超新星爆発などの爆発現象、またはAGB星の質量放出などが考えられる。以下では、これらの天体現象に伴う主な元素合成と、 ^{26}Al の生成について述べていく。

2.1 新星爆発

新星爆発は、一方の星が白色矮星であるような近接連星系で起こる現象である(図3)。伴星(主として赤色矮星)から流出した水素ガスが白色矮星の表面に降り積もると、地球上の約100万倍もの極めて強い重力のためにガスは極度に圧縮され、温度が上昇し、やがて核反応の暴走に至る。その結果、表面に降り積もった水素ガスは大爆発を起し、星間空間へ吹き飛ばされる。これが新星爆発である。爆発は白色矮星の表面で起こるために、爆発後も白色矮星はほとんど無傷のまま残る。その後、再び伴星から水素ガスが表面に降り積もり、爆発を繰り返すことになる。中には約10年おきに爆発するもの(再帰新星)も見つかっているが、爆

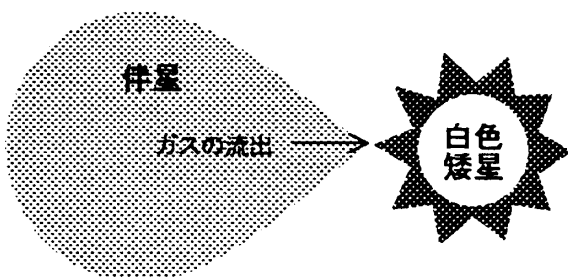


図3 新星爆発

発のくり返し周期は白色矮星表面への質量降着率によって異なり、通常は百年以上である。

上に述べたように、新星爆発は白色矮星の表面に積もった水素ガスが爆発を起こす、巨大な水素爆弾のようなものである。しかし、新星爆発では水爆とは異なり、爆発をより激しくする、炭素、酸素、ネオン、マグネシウムなどの起爆剤が仕込んである。それらは白色矮星を構成する主要元素であり、その表面で水素ガスと混ざりあったものである。従って、新星爆発ではこれらの起爆剤を種とした陽子捕獲反応によって、元素合成が行われる。ここで、新星爆発には2つのタイプがあることを説明しておかねばならない。

一つは、その主成分が ^{12}C と ^{16}O であるCO白色矮星(太陽質量の約1.1倍以下)が起こす新星爆発である。近接連星系において、太陽質量の約8倍以下の星が核燃料を使い果たしてその一生を終えると、このような白色矮星になる。この場合、起爆剤となるのは ^{12}C と ^{16}O であるが、これらの元素から陽子捕獲反応によってナトリウムやアルミニウムなどの金属元素を合成するためには、約4億度以上の温度が必要となる。しかし、このタイプの新星爆発では爆発のピークにおける温度はせいぜ

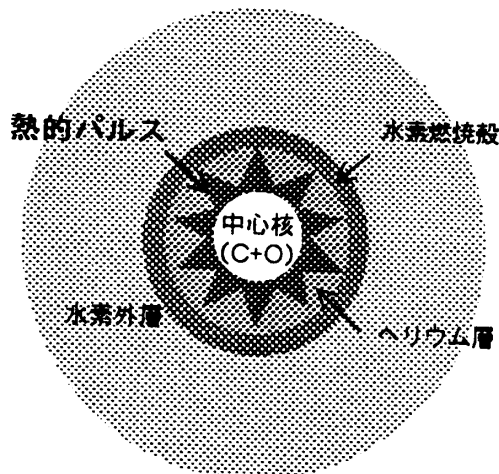


図4 AGB星における熱的パルス

い2億程度なので、炭素、窒素、酸素を中心とした核反応にとどまり、 ^{26}Al はほとんど作られない。

そしてもう一つのタイプは、その主成分が ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg であるONeMg白色矮星(太陽質量の約1.1~1.4倍)が起こす新星爆発である。近接連星系で太陽質量の約8倍~10倍の星が進化の終焉をむかえると、このような白色矮星になる。このタイプの新星爆発は、その爆発物質中にネオンを多く含むことから、ネオン新星とよばれている。さて、ネオン新星では起爆剤として ^{24}Mg を豊富に含んでいるので、CO白色矮星の場合に比べると ^{26}Al は比較的容易に合成される。従って、以下ではこのネオン新星(ONeMg白色矮星が起こす新星爆発)での元素合成に話題をしぼる。ちなみに、最近の新星観測の結果によると、新星全体に対するネオン新星の占める割合は25%程度である。

さて、このONeMg白色矮星がおこす新星爆発では、CO白色矮星に比べて質量が大きいために表面に降り積もった水素ガスは極めて高温、高密度に圧縮され、爆発のピークでは、そのガスの温度は2億度~4億度にも達する。そのために、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg を起爆剤とした急激な陽子捕獲反応が

起こり、陽子過剰な元素が次々と合成される(図5)。これはrp過程 (rapid proton capture process)と呼ばれる核反応過程であるが、陽子過剰核の核反応率の測定が極めて困難であるために、いまだにわかっていないことが多い[3]。

rp過程の特徴は、温度が十分に高ければ(約2億度以上)陽子捕獲反応は非常に速やかに起こるために、ベータ崩壊の寿命によって核反応の流れが制限されることである(これをベータ制限という)。つまり、 ^{14}O 、 ^{15}O 、 ^{22}Mg 、 ^{26}Si などの元素が信号機の役目を果たしているわけである(図5参照)。従って、必然的に核反応の流れはこれらの元素のところでよどみ、結果的に爆発後のガスにはこれらの崩壊物質、 ^{14}N 、 ^{15}N 、そして放射性元素 ^{22}Na (平均寿命約4年)、 ^{26}Al (平均寿命約100万年)などが多く含まれることになる。このため、以下に示すように新星爆発によって合成される元素の同位体比に

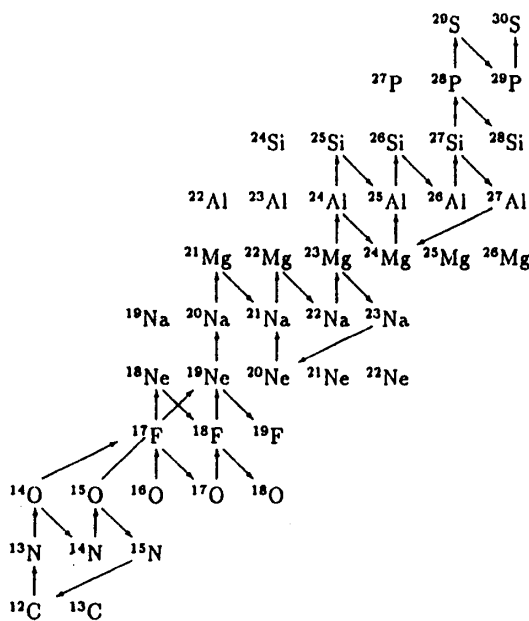


図5 rp過程における主な核反応経路

は、太陽系元素における値と大きく異なるものがある。いくつかある。これは、後で述べるように隕石中の星間塵の起源を論じる上で、重要な手がかりとなる。

新星爆発では爆発ガスの対流平衡がよい近似で成り立っていると考えられるので、解析的なモデルが有効である[4]。私の行った、半解析的な新星爆発のモデルを用いた(ネオン新星における)元素合成の計算[1]では、特徴的な同位体比(質量比)は、温度や密度による違いはあるものの、おおざっぱに $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \sim 1$ 、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} \sim 1$ 、 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O} \sim 1$ 程度と、太陽系元素の同位体組成比とはきわだって異なる値を示した(太陽系では $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \sim 80$ 、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} \sim 250$ 、 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O} \sim 2500$ 程度)。また、ONeMg白色矮星の質量が大きい場合は、爆発のピーク温度が3~4億度にもなるために、極めて安定で核反応を起こしにくい ^{20}Ne さえもほとんど燃えつきてしまう。その結果、放射性元素 ^{22}Na が大量に合成され、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Na} = 0.6 \sim 0.00006$ にもなる。このような新星爆発は、後に述べるように非常に極端な同位体異常(Ne-E)を引き起こす原因になると考えられる。

さて、放射性元素 ^{26}Al はどうか。上に述べたように、爆発前のガスに含まれている ^{24}Mg から始まる核反応の流れはベータ制限によって ^{26}Si のところでよどむので、その崩壊元素である ^{26}Al は容易に合成される。 ^{26}Al はベータ制限によって安定的に作られるので、白色矮星の質量や、その表面に積もった水素ガスの質量などの、モデルの初期条件による依存性はあまり大きくはない(ただし、比較的質量の大きいONeMg白色矮星が起こす新星爆発ではガスの温度が非常に高くなるので、作られた ^{26}Al は壊れやすくなり、いくぶん減少する)。モデル計算の結果によると、新星爆発(ネオン新星)が我々の銀河系に加える ^{26}Al の総質量は、太陽質量の1~6倍程度である[1]。これは、ガンマ線の

観測結果から得られている値(太陽質量の約3倍)とほぼ合致する。従って、ONeMg白色矮星が起こす新星爆発は、 ^{26}Al の非常に有力な起源である。

また、モデル計算によれば、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.1 \sim 10$ 程度である。この同位体比の値は、後で隕石中の星間塵の起源を議論する際に必要になる。

2.2 超新星爆発

大質量星は、その進化の最終段階で超新星爆発を起こす。このとき、爆発的炭素燃焼によって ^{26}Al が合成される。しかし、その爆発時における物質混合のメカニズムがまだはっきりわかっていないので、モデル計算による不確定性が大きい。最近のモデル計算の結果から見積もられた、超新星爆発が我々の銀河系に加える ^{26}Al の総質量の上限値は、太陽質量の1.4倍程度である[5]。これは新星爆発のモデル計算による値をやや下回るが、銀河系に存在する ^{26}Al の有力な起源になり得る。また、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.0004 \sim 0.002$ 程度である。

超新星爆発では、その中心核付近で中性子の強

いフラックスが生じ、急激な中性子捕獲反応(r過程)によって、中性子過剰な重元素が合成されると考えられている(図6)。従って、超新星爆発から作られる星間塵の中には、r過程元素(中性子過剰な重元素)が豊富に含まれていると考えられる。

2.3 AGB星

晩年をむかえた星は、主系列をはなれ、赤色巨星へと進化する。特にその一生を終えるときが近づくと、その中心には炭素と酸素からなる核、そのまわりに薄く積もったヘリウム層をもち、それを巨大な水素ガスが包みこむような構造へと進化する。そして、その中心核の表面に積もったヘリウムガスは、小規模な爆発現象をくり返し起こすようになる(図4)。これは熱的パルスとよばれる現象で、新星爆発に非常によく似ている(ただし、この場合は水素爆弾ではなく、ヘリウム爆弾(?)である)。このような、進化の最終段階にある赤色巨星を、特にAGB星という。この熱的パルスによって、AGB星の内部で大規模な対流が生じるので、

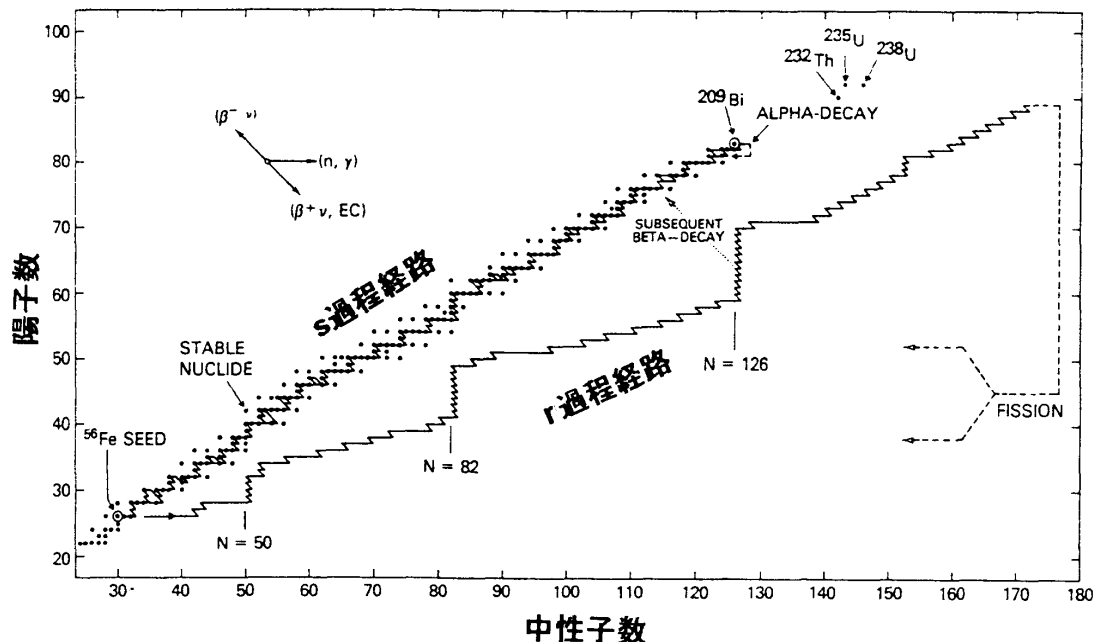


図6 s過程, r過程における主な核反応経路。
C.E.Rolfs and W.S.Rodny, "Cauldrons in the Cosmos",
The University of Chicago Press (1988)より引用。

そこで作られた元素は水素外層へと運ばれる。そして同時にその表面では大規模な質量放出が起り、合成された元素は星間空間へばらまかれることになる。

AGB星ではこのような熱的パルスにおいて作られたマグネシウムを種として、ヘリウム層の外側の水素燃焼核で、陽子捕獲反応によって ^{26}Al が合成されると考えられている。しかし、新星爆発におけるガスの温度(2億度以上)に比べるとこの水素燃焼核の温度はかなり低く(5千万度程度)、爆発的な陽子捕獲反応は起こらない。 ^{26}Al はMgAlサイクルとよばれる核反応過程において、ゆっくりと合成される。新星爆発ではベータ制限によってたまった ^{26}Si の崩壊によって安定的に ^{26}Al が作られるが、AGB星では ^{26}Mg の陽子捕獲反応によって ^{26}Al が合成されるため、その合成量はガスの温度に対する依存性が高く、モデル計算による不確定性は大きい。最近のモデル計算の結果[6]によると、AGB星が我々の銀河系に加える ^{26}Al の総質量の上限値は、太陽質量の10分の1程度である。従って、AGB星が銀河系に存在する ^{26}Al の主要な起源であるとは考えにくい。また、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.0015$ 程度である。

AGB星の熱的パルスでは、遅い中性子捕獲反応(s過程)によって、安定核ラインに沿った重元素が合成されると考えられている(図6)。従って、質量放出によって星間空間へばらまかれガスから作られた星間塵には、s過程元素が豊富に含まれていると考えられる。また、放出ガスには炭素が豊富に含まれ、 $\text{C/O} > 1$ となっているもの(炭素星とよばれる)が観測で見つかっている。

3. 隕石をてがかりとして

以前は ^{26}Al が超新星爆発で合成されたに違いないと信じられていた時代があった。そう考えると、

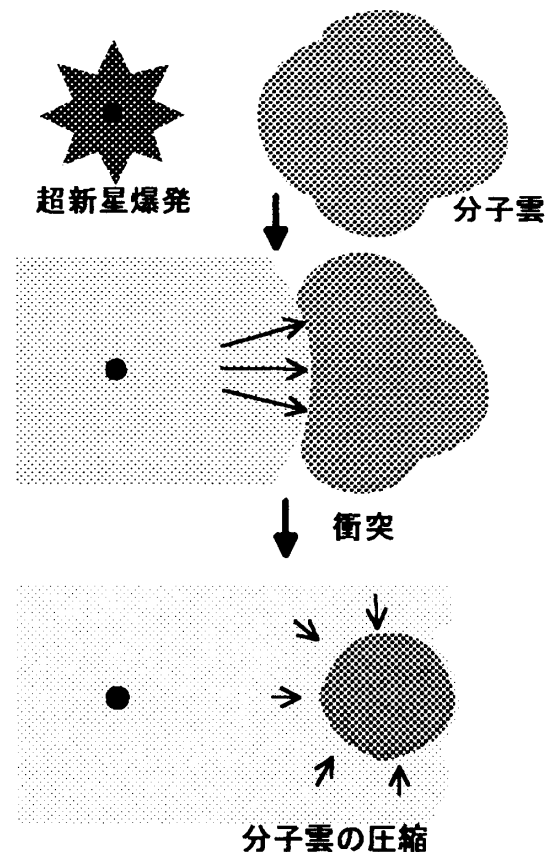


図7 超新星爆発が原始太陽系星雲を形成するプロセス。野本陽代, 野本憲一, “超新星1987Aに挑む”より引用。

実に見事な太陽系形成のシナリオができ上がるのである。そのシナリオとは、次のようなものである。

約46億年前、我々の太陽系の母体となる分子雲ガスの近くで、大質量星が超新星爆発を起こした。その残骸物質はすさまじい勢いで広がり始め、あっという間に分子雲ガスを飲みこんでしまった。そのとき、分子雲ガスはその衝撃波によって強く圧縮され、原始太陽系星雲を形成するに至った(図7)。同時に、超新星爆発で合成された元素も(もちろん ^{26}Al も)、いくらか混じりこんだ。

このように、超新星爆発だけで太陽系の形成のメカニズム、そして隕石の同位体異常を引き起こした ^{26}Al の起源までが説明できてしまうというのは非常に魅力的ではあるが、このシナリオはすぐ

に次のような困難にぶつかった。

3章で述べたように、超新星爆発のモデル計算の結果では、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.0004 \sim 0.002$ である。一方、炭素質コンドライト隕石の分析から得られている値は $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.00005$ 程度である。これは、もし原始太陽系星雲のガスがほぼ均一に混じりあっていたらとすれば、太陽系物質中の少なくとも2.5%以上の物質は超新星の残骸物質であることになる。これはやや大きすぎる値で、現実的ではないように思われる。

では、超新星爆発だけではなく、新星爆発やAGB星などの寄与もあったと考えればよい、ということになるであろう。しかし、最近までの隕石の化学分析は、鉱物単位、すなわち粒子の集合体を単位としてのみ可能であったので、その結果はそれぞれの粒子のもつ値の平均値にすぎなかった。従って、それらの粒子の起源を特定することはほとんど不可能であり、ごく定性的な議論しかできなかった。それでは、モデル計算によって得られた、個々の天体で合成された元素組成と、隕石の分析結果を直接比較する方法はないのだろうか？ 実はここ数年の間にそれが可能になったのである。

次の3つの粒子、ダイヤモンド、シリコンカーバイド(SiC)、グラファイトは化学的に極めて安定であるので、イオンプローブによって隕石を化学的に溶解することにより、これらの粒子を一粒一粒抽出することが可能となった[7]。従って、これらの粒子を分析することはそれぞれの天体から放出されたガスから作られた星間塵を直接分析することに等しく、個々の天体におけるモデル計算の結果と直接比較することが可能である。以下では、Mg 同位体異常が認められるSiC、グラファイト[8]について、超新星爆発、新星爆発、AGB星による元素合成の計算結果と比較検討をしていく。

3.1 SiC

SiCは直径0.2～10 μm 程度の粒子であり、研磨剤にも使われているように、非常に硬い物質である。ところで、このSiCの起源はAGB星、そのなかでも炭素星が最有力候補である。なぜなら、新星爆発、超新星爆発、炭素星を除くAGB星から放出されるガスには、一般に炭素に比べて酸素が豊富に存在するため($\text{C}/\text{O} < 1$)、炭素はまず化合しやすい酸素から結合し始め、SiCが形成される前に炭素が枯渇してしまうからである。2章で述べたように、炭素星はその名のとおり放出ガス中に炭素を多く含む($\text{C}/\text{O} > 1$)ので、酸素が使いはたされた後も炭素が残り、その結果SiCが作られる。さらに、SiCはs過程元素の様相を示すXeの同位体異常(Xe-Sとよばれる)を含むという事実からも、SiCがAGB星起源であることを裏づけている。

SiC粒子に含まれているMgの同位体比の測定から、この星間塵が形成されたときのAlの同位体比は $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.0004 \sim 0.02$ であることがわかっている。2章で述べたように、AGB星のモデル計算によれば $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.0015$ であり、これはSiC粒子の測定値の範囲内におさまっている。測定値に大きなばらつきがあるのは、AGB星の水素外層において、ガスが十分に混ざりあっていない、あるいは熱的パルスそれぞれの段階における元素合成の結果を反映しているのかもしれない。

2章で触れたように、AGB星が現在の銀河系に存在する ^{26}Al 、あるいは太陽系形成時に存在していた ^{26}Al の起源である可能性は極めて低い。しかし、上に述べたことから、AGB星でも ^{26}Al が実際に合成されていることは間違いないであろう。

3.2 グラファイト

グラファイトは直径0.2～10 μm 程度の粒子であり、星間空間で形成されたと思われる丸い粒子には、炭素とネオンの著しい同位体異常が認められる。

Mgの同位体比の分析結果より、星間空間でグラファイトが形成されたときのAlの同位体比は $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.004 \sim 0.1$ であることがわかった。これはSiCの値と比べると、かなり大きな値である。これは、超新星爆発やAGB星のモデル計算による値を大きく上回る。しかし、新星爆発での値($^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 0.1 \sim 10$)はいくぶん下回っている。では、いったいこのグラファイトはどこからやってきたのだろうか？

ここで、Al以外の元素の同位体比について調べてみよう。図8に示したように、グラファイトの炭素同位体比の分布は、そのピークの位置からおおまかに4つのグループに分かれる。これは、グラファイトには複数の起源があるということの意味しているのであろう。このうち、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の比が特に高いものは、グループ2($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 20 \sim 60$)と

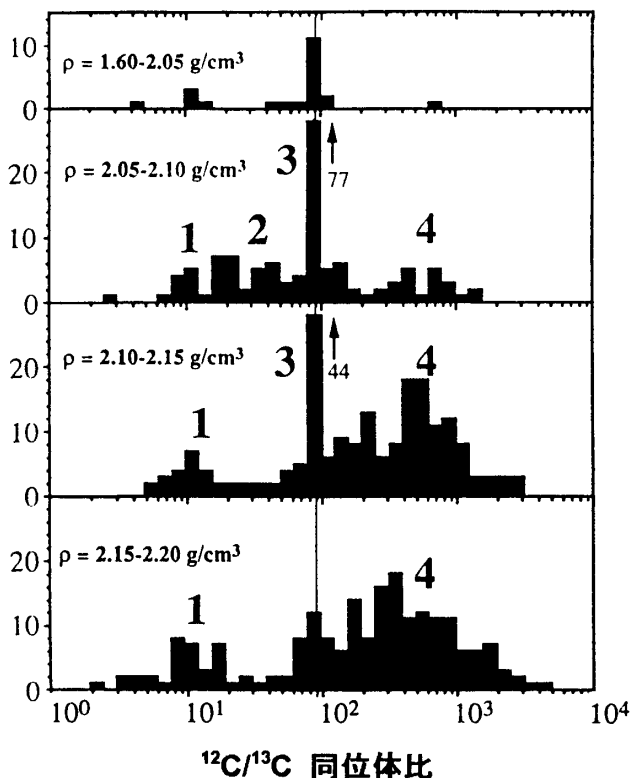


図8 2つのグラファイト粒子のC同位体比のヒストグラム。ピークの位置から4つのグループに分かれる。中心の線は太陽系における同位体比。

グループ3($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 90$)に属する粒子である。グループ3は太陽系元素における値とほぼ同じ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$)であり、グループ2の値はそれよりいくぶん小さい。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の値が太陽系元素に比べて大きいのは新星爆発による元素合成の特徴であるが、その値はこれとは大きく異なる(新星爆発では $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 1$ 程度)。このことから、次のようなことが考えられないだろうか。もし伴星がAGB星であれば、これらの星間塵は新星爆発で作られたものではなく、AGB星で作られたと考えられる。そして、そのAGB星から放出された星間塵に新星爆発によって合成された元素が植え付けられたのである、と。その結果として、新星爆発のモデル計算の結果に比べて $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ や $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の値が小さい星間塵が形成されたのではないだろうか。ネオン新星は爆発物質中に酸素を豊富に含むため、星間塵を作るのは難しいと言われている(炭素が酸素と結合してほとんど分子ガスになってしまうため)。しかし、AGB星で作られたと考えれば、新星爆発で星間塵が作られなくてもいいわけである。

グループ1($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$)の中には、Ne-Eとよばれる極めて異常なネオンの同位体比($^{20}\text{Ne} / ^{22}\text{Ne} = 0.01$ 程度)をもつものが見つかっている(Eはextraordinaryの意)。これは、太陽系元素の同位体比の実に千分の一にもなる。このような極端な同位体比を示すのは、その粒子にはほとんど ^{20}Ne が存在せず、ほぼ純粋な ^{22}Ne が含まれているためであると考えられる。このような状況は、rp過程による元素合成の結果、すなわち新星爆発によるものしか考えられない。2章で述べたように、比較的質量の大きいONeMg白色矮星が起こす新星爆発では、 ^{20}Ne はほとんど燃えつきてしまい、ベータ制限によって貯えられた ^{22}Mg の崩壊によって放射性元素 ^{22}Na (平均寿命約4年)が大量に合成される。そして、 ^{22}Na を含む星間塵(グラファイト)が形

成された後でこれがベータ崩壊して ^{22}Ne になり、ほぼ純粋な ^{22}Ne をもつグラファイトができあがると考えられる。2章で述べたように、質量の大きいONeMg白色矮星が起こす新星爆発では $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.6 \sim 0.00006$ にもなるので、先に述べたようにその星間塵がAGB星で形成され、後で新星爆発からのガスがうめこまれたものであるとしても、かなり純度の高い ^{22}Ne を含む星間塵が形成されると考えられる。

以上により、分析されているグラファイトの少なくともその一部は新星爆発を起源にもつ可能性が高い。そして、原始太陽系星雲に含まれる ^{26}Al の少なくともその一部は、新星爆発が起源であると異なる。

4. 太陽系元素はどこから来たか？

太陽系を作る元素の大部分が超新星爆発、またはAGB星によって合成されたものであることは間違いないであろうが、隕石、特にグラファイトの分析結果は、新星爆発も重要な元素の起源の一つであることを物語っている。

2章に述べたように、現在の銀河系に存在する ^{26}Al の起源としては新星爆発が最も有力である(超新星爆発も有力ではあるが)。従って、もし太陽系が形成された約46億年前から現在に至るまで定常的に ^{26}Al が生成され続けてきたとすれば、太陽系形成時に存在し、Mg同位体異常の原因となった ^{26}Al の起源も同様に新星爆発である可能性が高い。

そして、3章で述べたグラファイトの分析値は、原始太陽系星雲に含まれていた ^{26}Al の一部は確かに新星爆発からやって来たことをうかがわせる。そして、グラファイト粒子における $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値は、先に述べた炭素質コンドライト隕石の平均値を大きく上回っている。このことから、新星爆発はこの ^{26}Al の起源として、最有力候補であると

いえるだろう。

SiC粒子の分析値は、AGB星でも ^{26}Al が合成されているに違いないことを示している。しかし、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値がグラファイトに比べて小さいこと、そしてAGB星における元素合成のモデル計算の結果から、AGB星が ^{26}Al の主要な起源である可能性は薄いであろう。

では、超新星爆発はどうか？3章で見たように、Mgの異常を含む粒子の中で、超新星から来たとはっきりいえるようなものは全くない(ダイヤモンドの粒子は超新星が起源であると考えられているが、Mgの異常を含まない)。それでは、先に述べたような、超新星爆発が引き金となって太陽系が形成されたというシナリオは幻想に過ぎないのであるか？実は、そうともいえないのである。SiC粒子の中には、グレインXとよばれる得体の知れない粒子が5つほど見つかっている[9]。グレインXの起源はまだよくわかっていないが、他のSiC粒子のようにAGB星が起源であるとは考えにくく、超新星爆発が起源である可能性が高いと考えられている。そして、この粒子は異常に高い $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値(=0.1~0.6)をもつのである。この粒子の起源が超新星であれば(その数の少なさから考えれば ^{26}Al の主要な起源であるとは言いがたいが)、太陽系形成のきっかけが超新星爆発であるかどうかを判定するための重要な手がかりとなるであろう。いずれにしても、現在分析可能な星間塵はダイヤモンド、SiC、グラファイトだけであるので、これらの分析結果だけから判断を下すのは早計であろう。イオンプローブによって溶かされてしまった大部分の星間塵の中に、もっと重要な情報が含まれているのかもしれない。

「生きた化石」、放射性元素 ^{26}Al をてがかりとしてここまで太陽系元素の起源を探ってきたが、様々な要素が実に複雑にからみあっていることが

わかるであろう。つい最近までは、太陽系元素の起源についてはごく定性的な議論しかできなかったが、ここに来て、隕石化学の技術上の進歩によってそれぞれの粒子の起源を個別に特定することが可能となってきた。また、それによって超新星爆発、新星爆発、AGB星などにおける元素合成のモデルは厳しい制限を受けることになろう。また、最近の短寿命核ビームを用いた原子核実験などにより、今まではよくわかっていなかった不安定核を含む原子核反応率が次々と明らかになり、rp過程やr過程など、不安定核を中心とした核反応過程を含む元素合成の計算も、格段に信頼性が高まってきている。60年代に始まる歴史の古い、隕石化学と天体核物理学の境界分野(隕石天体核物理学とでもよぶべきか)は、今まさに「精密科学」の時代へ突入しつつあり、今後の発展が実に楽しみな分野である。

参考文献

- [1] 和南城伸也, 1993: 新星における爆発的要素合成, 東京大学大学院修士論文
- [2] Mahoney, W. A., Ling, J. C., Wheaton, W. A., and Jacobson, A. S., 1984: HEAO 3 Discovery of ^{26}Al in the Interstellar Medium, *Astrophys. J.* **286**, 578-585
- [3] Wallace, R. K., and Woosley, S. E., 1981: Explosive Hydrogen Burning, *Astrophys. J. Suppl.* **45**, 389
- [4] Fujimoto, M. Y., 1982: A Theory of Hydrogen Shell Flashes on Accreting White Dwarfs, *Astrophys. J.* **257**, 752-766.
- [5] Prantzos, N., 1992: Radioactive ^{26}Al from Massive Stars, *Astrophys. J. Lett.* *in press*.
- [6] Forestini, M., Paulas, G. and Arnould, M., 1991: On the Production of ^{26}Al in AGB Stars, *Astron. Astrophys.* **252**, 597-604.
- [7] 甘利幸子, 1992: イオンプローブによる星間塵の同位体比測定, 地質ニュース 450, 53-58.
- [8] Anders, E. and Zinner E., 1993: Interstellar Grains in Primitive Meteorites, *Meteoritics* submitted.
- [9] Amari, S., Hoppe, P., Zinner, E., and Lewis, R. S., 1992: Interstellar SiC with Unusual Isotopic Compositions, *Astrophys. J. Lett.* **394**, 43-36.