

低温度星の分光學—宇宙の物質進化をたどる

辻 隆

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

最近の多くの星の化学分析により、ビッグバンによる水素、ヘリウム、リチウムをみの初期宇宙から、今日見る 100 種に達する化学元素と数 100 種にのぼるそれらの同位元素を含む多彩な宇宙にいたる元素レベルでの物質進化の解明が進みつつある。低温度星の分光学はこのような宇宙の化学分析の重要な一環を担っているが、さらにこれらの星の大気・外層に於ける多様な物理・化学過程と、それに伴う分子からダストの形成に至る分子レベルでの物質進化の解明に進みつつある。

1. はじめに

19 世紀中頃、キルヒホッフとブンゼンにより天体化学分析の方法としての天体分光学の基礎が確立された。当時の観測装置では天体の精密な化学分析はなお困難であったが、その後の分光学の発展により今世紀初頭には恒星スペクトル分類、続いて 1930 年代には恒星大気理論の基礎が確立された。これらにより、遠方にある恒星、星雲を含めて全宇宙の化学元素組成はかなり一様であると考えられるに至った。しかし、1950 年代に知られた少数の星の化学分析から星によっては特定の元素が異常に多いこと、また、バーデにより明かにされた種族 II に属する金属線の弱い星（準矮星）では、その鉄組成が太陽のその 1/10 から 1/100 であることなどが明かにされた。このような結果は当時としては大きな驚きであったが、やがてこれらの元素は宇宙の初めに一度に創られたのではなくその後の宇宙進化の過程で星の内部の核反応で創られたとする考えに発展していく契機の一つとなった。1950 年代後半には、これらに加えて隕石などから得られた原始太陽系の化学組成や原子核物理学の知見を総合して、星内部での元素合成

の理論が大成された。

一方、その後今世紀後半の 40 年間にわたり星の化学分析は着実に進歩し、今日までに高分散スペクトルにより化学組成の解析が行われた星の数は数千個に達する。このような星の化学分析の結果は、我々の宇宙に関する最も重要な一次観測資料の一つであり、宇宙の物質進化を理解する上で極めて重要な事実を数多く含んでいる。特に最近の 10 年間で光学領域では CCD などの高感度検出器により高い精度が得られるようになったこと、また、赤外線、ミリ波領域はもとより紫外線、X 線、 γ 線を含めた多波長領域における高分解能分光観測が可能になったことなどにより、いまや天体分光学の創始者達が抱いた遠大な構想—全宇宙の化学分析—が、ようやく高い信頼性をもって現実のものとなりつつある（表紙写真参照）。

2. 未進化の低温度星—元素創成の記録

質量が太陽質量よりも小さい星は進化が遅く、宇宙初期に生まれた星もなお未進化の晩期型星として生き残っている。これらの星も中心では核反応が進んでいるがその反応生成物は星の表面には届かない。従って、観測されるこれらの星の表面化学組成はこれらの星が生まれた時点での宇宙の化学組成をそのまま保存していると考えられる。

Takashi Tsuji: Spectroscopy of Cool Stars—Probing the Evolution of Matter in the Universe

このような星としてはさまざまな年齢のF, G, K, M型の主系列星や種族IIの準矮星がある。前節で述べた化学分析が行われた数千個の星のなかにはこのような星も数百個含まれている。ここではこれらの解析の詳細に立ち入る余裕はないが、重要ないくつかの結果を簡単にまとめておこう。

まず、図1にはこれらの星の化学分析から得られた鉄(Fe)組成で代表される金属量を横軸にとり、それにたいして他の元素組成がどのように進化してきたかを縦軸に示してある。ここで、横、縦軸共に現在最も正確な化学組成が知られている天体—原始太陽系—の値で規格化してある。この原始太陽系組成は、今後簡単のため太陽系組成と呼ぶことにするが、約50億年前に銀河系ディスクが到達した物質進化の姿を示すものと考えられる。また、横軸の金属量は一般的には時間とともに増大してきたと考えられるが、また同時に宇宙

の場所によっても異なっている。従って、ここでは鉄組成で代表される金属量を単に宇宙の物質進化の度合を示すパラメーターと考えることにする。図1でヘリウム(^4He)組成はさまざまな観測からの推論を含むが、宇宙初期からすでに太陽系組成に近い値であったことはほぼ確かである。次に、リチウム(^7Li)は鉄組成が太陽系組成の1/1000程度で宇宙が未進化の時代にすでに太陽系組成の1/10程度が存在していたことが、銀河形成初期に生まれたと思われる古い星で直接観測された。これはビッグバン宇宙論の予想を明確に実証した重要な結果である。

次に図1で明かなことは酸素(^{16}O)及びマグネシウム(^{24}Mg)、珪素(^{28}Si)、硫黄(^{32}S)などの α 核(質量数が4の整数倍の原子核)が初めは鉄よりも早いピッチで増加していることである。即ち、鉄組成が太陽系組成の1/1000程度の時これらの

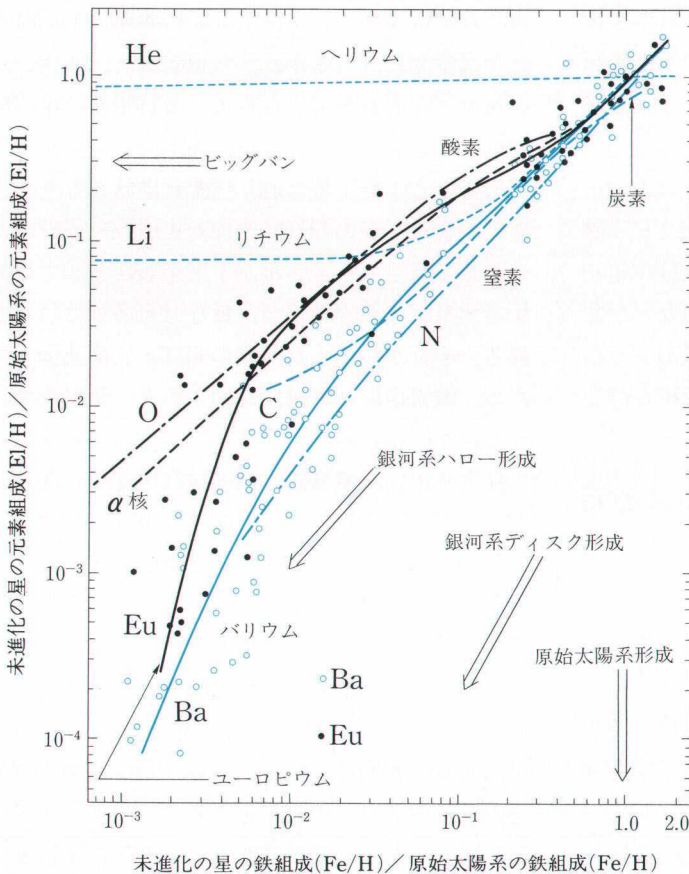


図1 横軸の鉄組成 (=Fe/H) で代表される物質進化に応じて、縦軸に各元素の組成 (=E/H) がどのように進化したかを示す。但し、横、縦軸共に原始太陽系の組成に対する相対値で示されている。これは、古い星を含む多数の星(その表面化学組成が誕生時の星間物質の化学組成を保存しているさまざまな年齢の主として未進化の星)の化学分析から得られた結果を数個の元素について模式的に示したものである(α 核= ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{40}Ca 等)。バリウム(Ba)及びユーロピウム(Eu)については、平均的傾向を各々青及び黒の実線で模式的に示すと同時に、個々の星の結果も各々青丸及び黒丸で示してある。これらの点のばらつきが分光解析の誤差によるのか、または実際の分散を示すのかを明かにするには、さらに解析精度の向上と化学分析の方法論の進歩に待たなければならない。しかし、異なる元素はかなり違った進化をしてきたことは確かであり、ここに示した以外の元素も含めて、これら様々の年齢の星の元素組成は宇宙進化の最も実証的な記録となっている。

元素はすでに太陽系組成の1/300程度にまで増えていた。しかし、鉄組成が太陽系組成の1/10程度まで進化した頃には酸素などの α 核の進化は鉄などに較べて相対的には遅くなったことが分かる。これに反して、炭素(^{12}C)、窒素(^{14}N)などはほぼ鉄と同じ割合で増加し、酸素などとはかなり異なった進化をしてきたことが分かる。次に鉄よりも重い元素の例としてバリウム(Ba)とユーロピウム(Eu)が示してあるが、これらの元素の進化は最初は遅く、鉄組成が太陽系組成の1/100前後に達した時点で急激に進化している。

宇宙における元素の進化は、図1に示された以前はどうであっただろうか？ 今日までに金属量が太陽系組成の 10^{-4} 以下の星も数個知られている。もしも標準的なビッグバンモデルが正しいとすると、これらを含めて今までに観測された星は少量でも金属(炭素より重い元素は全て金属と言う)を含んでいるので宇宙で最初に生まれた天体ではない。これらの星に金属元素を供給した天体は何であったのだろうか？ これについては、最初の金属元素は、種族IIの最初の大質量星でできたとする説、種族IIIの天体とでも呼ぶべき未知の大質量天体で創られたとする説、さらにはビッグバンに於てバリオン分布が非一様となれば宇宙初期の火の玉である程度合成されるとの説などがある。この問題の解決には、さらに金属量の少ない星の探査を行い、それら古い星の化学分析を詳しく行うことが重要な手がかりとなるであろう。

3. 進化の進んだ低温度星一星による元素合成

前節で見たように、今日の宇宙を構成する様々の化学元素は100億年のタイムスケールでそれぞれ異なる進化をとげてきたことが観測から具体的に明かにされたが、これは現代分光学の偉大な成果の一つである。次の問題はこれらの各元素がどのような星で何時創られたかを具体的に解明し、ひいてはこれにもとずき宇宙進化の実証的な解明

を行うことである。まず、図1でHe, Liはビッグバンでできたとしても、Liは銀河系ディスクが形成された頃から原始太陽系ができた頃までに1桁も増大している。Liも他の元素と同じくある程度銀河進化の過程でも創られたとすれば、何処でできたのであろうか？ または、Liはビッグバンですでに多量に創られたが、化学分析の標本となった古い星ではその後破壊されて1/10程に減ってしまったと言う可能性も否定できない。この場合、標準ビッグバンモデルとの整合性が問題となる。これらの問題の解明を目指して、ビッグバンで創られた可能性もあるベリリウム(Be)、ボロン(B)などの化学分析が古い星で進められている。

図1でビッグバンの後、宇宙において最初に多量に創られたのは酸素及びその他の α 核元素であるが、これらは進化の早い大質量星内部の高温高圧下で次々に核融合反応で合成され、II型超新星として爆発することにより宇宙進化の早い時期に宇宙空間にばら蒔かれ、今日観測される古い星の材料となったと考えられる。大質量星の中心部では鉄なども合成されるが、大部分は超新星爆発時にできる中性子星に取り込まれてしまうため、次に生まれる星のO/Fe比は大きい。その後、これより若干質量の小さい星がI型超新星として爆発すると星全体が吹き飛び、鉄なども多量に放出される。それから生まれる星のO/Fe比は減少するため、酸素組成と鉄組成は図1のように進化することが理解される。

鉄より重い元素は鉄の原子核に中性子が次々に加わることにより容易に合成される。この際、できた原子核がベータ崩壊すると原子番号が一つ大きい原子核ができるが、もしも中性子が多量に供給されるとベータ崩壊をする前に次の中性子が合体し中性子過剰の原子核が形成される。後者はr過程とよばれ超新星などで起きるとされているが、前者はs過程と呼ばれ赤色巨星など中小質量星の進化の進んだ段階で起きることが知られている。図1でEuはごく初期を除き酸素や α 核とほ

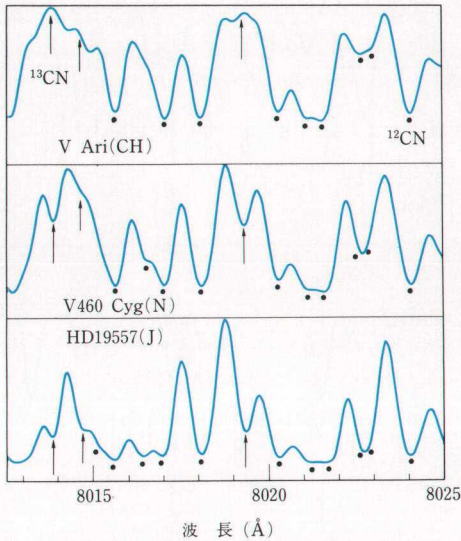


図2 CCDによる炭素星の ^{12}C N (・で示す) 及び ^{13}C N (矢印で示す)のスペクトル。ハロー種族の炭素星(CH星)の中には ^{13}C Nは見えないくらい弱く $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が 10^3 程度のものもある(上図: V Ari)が、種族Iの炭素星(N型星)では ^{13}C Nは明瞭に同定され、この例では $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は40の程度である(中図: V466 Cyg)。また、炭素星のなかには ^{13}C Nが極めて強くJ型星と分類されている炭素星があるが、その中には、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比がCNサイクルの平衡値4以下のもの(下図: HD19557)も知られている(岡山天体物理観測所クーデ分光器による観測)。

ば同じパターンを示すが、これはEuがr過程元素であり大質量星で創られたことを裏づける。一方、同じ重元素でもBaなどのs過程元素は、やはり宇宙進化のある段階で急激に増大しているが、Euとは異なるパターンを示している。これは中小質量星におけるs過程の寄与と考えられる。

太陽質量以上その数倍までの中小質量星は水素が燃えてヘリウム中心核が形成されると主系列を離れ、赤色巨星に進化する。ここでは、大規模な表面对流層が発達するため水素燃焼(CNOサイクル)の灰が表面に運ばれ、 ^{12}C が減少し、 ^{13}C 、 ^{14}N 、 ^{17}O などが増大する。しかし、この後は中心でHeが燃えだし、やがてその灰である ^{12}C 及び ^{16}O の中心核が形成され、Heがその外側の殻で燃

え出すと星は漸近枝巨星列(AGB)星としてさらに複雑な進化を示す。例えば、AGB段階でヘリウム殻燃焼が熱的に不安定となり、その燃えかすである ^{12}C が上にあるヘリウム層に吹き上げられ、一方外層は急激な膨張により温度がさがり水素殻燃焼が止まるので表面对流層が下にさがってヘリウム層にある ^{12}C を汲み上げる。一方、AGB星の外層には ^{12}C が汲み上げられると同時に表面から質量放出が起こっており、この2つの過程の兼ね合いによりある時点で $\text{C} > \text{O}$ となれば炭素星が生まれ、また外層の質量が十分大きい場合には $\text{O} > \text{C}$ のまま惑星状星雲まで進化することになる。さらに、質量が比較的大きいAGB星では対流層の底の温度が数千万度以上となる熱い対流層が形成され、新たに汲み上げられた ^{12}C も巻き込んだCNOサイクルが再び起きる可能性もある。

このようなAGB星の複雑な内部進化に伴う元素合成もスペクトル解析から観測的検証が進みつつある。例えば、上に述べたように炭素星で ^{12}C が多量に汲み上げられると赤色巨星段階で増大した ^{13}C は薄められ $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は増大することが予想される。このことは多くの炭素星で実際に確かめられている。さらに、ハロー種族の炭素星であるCH星では ^{12}C は非常に増大しているにも拘らず ^{13}C はほとんど存在しないものが見いだされ(図2)、質量放出の進んだ段階で ^{12}C が汲み上げられ $\text{C} > \text{O}$ の炭素星が誕生すると共に ^{13}C が大幅に薄められた結果と考えられる。これらのCH星は金属量が少ないが、s過程元素は異常に多いことが知られている。図1でBaなどのs過程元素はすでに銀河系ディスク形成前に十分創られているが、我が銀河系のハロー形成期に多数存在した炭素星の残骸と思われるCH星は、正にこのような時期に重元素生成に寄与した天体であろう。

さらに、フーリエ変換分光(FTS)による赤外高分解能分光観測によりAGB星の化学分析には著しい進歩が達成された。例えば、 $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ の解析から $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ が決定され(図3)、

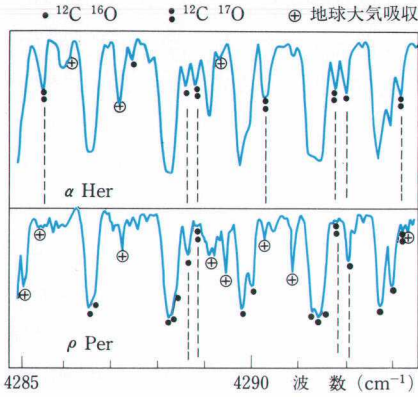


図3 FTS (フーリエ変換分光) による晩期M型巨星のCO分子の赤外スペクトル。 $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ の線が強い星では $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ は200程度(上図: α Her), 弱い星では $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ は1000以上である(下図: ρ Per). 原始太陽系では $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}=2625$ であり, M型巨星では ^{17}O が大幅に増えている(キットピーク天文台フーリエ分光器による観測).

M型巨星では進化モデルの予想どおり $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ が著しく減少(^{17}O が増大)しているが, 炭素星では $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ と同様に再び増大していることが明かにされた。しかし, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の場合と違って赤色巨星から炭素星にかけて ^{16}O が多量に増大することは考え難く, また ^{17}O が有効に破壊される機構も知られていない。このように $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 比がなぜ増大するかは説明されず, 炭素星の内部進化や元素合成に関してあらたな問題が提起されている。

一方, 最近4ミクロン領域のSiOスペクトルの解析(図4)から $^{28}\text{Si}/^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ 比が明かにされ, 晩期M型巨星のなかには原始太陽系に較べて ^{29}Si , ^{30}Si が ^{28}Si に相対的に50%程度増大しているものが見いだされた。これらの星におけるシリコン同位体はこれらの星自身における核反応による可能性は少く, むしろこれらの星の誕生時の星間ガスの組成を示していると考えられる。このような星間ガスのシリコン同位体組成は大質量星による核反応で決定されたと考えられるので, M型巨星のスペクトル解析から1世代前の大質量星における元素合成を解明することも可能であろう。

また, 高分解能赤外スペクトルによりCO, CN,

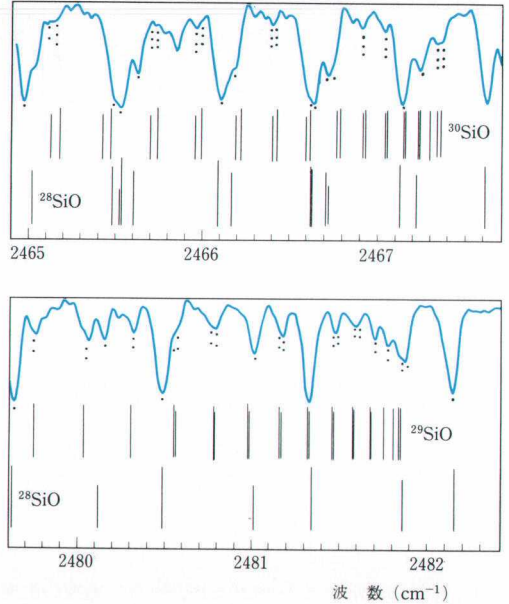


図4 晩期M型巨星 R Lyr の赤外4ミクロン領域にあるSiO分子のスペクトル(分解能 1.5×10^5). ^{28}SiO のほか, ^{29}SiO , ^{30}SiO などの同位体分子によるスペクトル線が明瞭に同定され, シリコン同位体比の決定が可能となった(キットピーク天文台フーリエ分光器による観測).

NH, OHなどの分子線から同位体組成比のみならずC, N, O組成も決定されている(図5)。これから, 赤色巨星列にある早期M型巨星からAGB段階にある晩期M型巨星にかけては炭素組成は減少していることが明かとなった。これらの星では ^{13}C , ^{17}O 等は著しい増大を示しており, 先に述べた熱い対流層によるCNOサイクルの効果を反映している可能性がある。この場合, ^{14}N が多量にできるはずであるが, これは図1で窒素が何処で創られたかにも関連する。しかし, これら酸素過多のAGB星においてN組成が著しく増大しているか否かは現在まだ明かではない。一方, $\text{M} \rightarrow \text{MS} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{SC} \rightarrow \text{C}$ 型星と逆に炭素組成が増大する進化系列の存在も確かめられた。このようなAGB星は多量の質量放出を行って惑星状星雲に進化すると考えられているが, 惑星状星雲の約1/3は酸素過多, 約2/3は炭素過多で, これは丁度

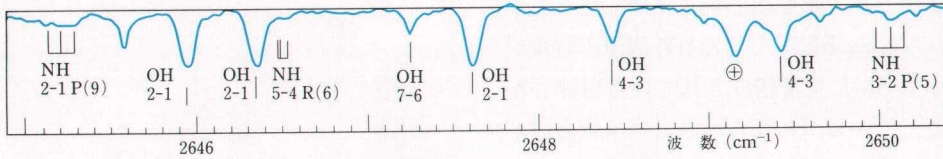


図5 晩期M型巨星 α Her の赤外3ミクロン領域のスペクトル。ここに同定されるNH, OHの振動回転遷移のほか, CO, CNなどを併せて, CNO組成が求められる(キットピーク天文台フーリエ分光器による観測)。

炭素が減少する系列と増大する系列に示される2元的なAGB星の進化に対応している。

4. 星の質量放出一星間物質の化学進化

このような赤色巨星やAGB星からの質量放出はOB型超巨星や超新星爆発によるそれと共に、恒星による元素合成の生成物を星間空間に還元する最も重要な過程でもある。最近、ミリ波領域における分子分光により、星間雲の同位体組成比が明らかにされ、上に述べた星における元素合成と銀河系スケールでの化学進化の関連が明かにされつつある。表1に示すように、50億年前の銀河ディスクが到達した物質進化の状態を示す原始太陽系、現在の銀河ディスクの星間ガス、銀河中心の分子雲の順に $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ などは系統的な変化を示す。これは丁度次に示されている赤色巨星、炭素星などからの質量放出により星間ガスの同位元素組成比が進化したものとして一応理解される。ここで、銀河系中心領域はすでに星間ガスが極めて少ないことから分かるように、銀河ディスクに較べて物質進化が進んでいると考

えられる。しかし、銀河系中心領域の $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 比は赤色巨星などの寄与だけでは説明されず、他のプロセスが必要であることが示唆される。

また、シリコン同位体に関する情報は現在まだ少ないが、宇宙線粒子を直接調べることによって ^{29}Si , ^{30}Si は ^{28}Si に相対的に50%程度増大していることが知られている。このようなシリコン同位体組成比は銀河進化における大質量星の寄与を明かにする上で重要であるが、今後さらに他の同位体も含めて研究を進めることが望まれる。

5. 超金属過剰星—宇宙の物質進化は何処まで進むか？

前節で見たように、銀河系中心領域は銀河ディスクよりも物質進化が進んでいると考えることができるが、最近では銀河系バルジには鉄組成が太陽組成の10倍にも達する赤色巨星が多数存在すると言われている。既に、1960年代末に太陽近傍の多数の星のスペクトル線強度が精密に測定され、一部の晩期型星で金属線が異常に強いことが見いだされている。これらの星は太陽より金属量

表1 進化の進んだ星及び星間ガスの同位体組成比

	原始太陽系 (50億年前の銀河ディスク)	太陽近傍の分子雲 (現在の銀河ディスク)	銀河中心の分子雲 (現在最も物質進化が進んだ領域)	赤色巨星 (O>C)	N型炭素星 (O>C)	赤外炭素星 (IRC+10216)
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	90	57±4	24±1	4-25	20-100	44±3
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	272	>400	1000	—	—	5000±500
$^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$	2625	2460±750	890±370	160-1100	550-4100	840±200
$^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$	499	675±200	250±100	400-700	700-2400	1260±300
$^{18}\text{O}/^{17}\text{O}$	5.26	3.65±0.15	3.5±0.2	0.4-3.0	0.6-1.5	1.5±0.3
$^{28}\text{Si}/^{29}\text{Si}$	19.75	10-20	10-20	13-20	—	18.9±1.5
$^{28}\text{Si}/^{30}\text{Si}$	29.75	—	—	18-28	—	29.7±2.0
$^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$	1.51	—	—	1.4±0.3	—	1.6±0.1

が数倍大きいとされ超金属過剰 (SMR) 星と名づけられた。さらに、M 31 などの系外銀河のバルジもこのような SMR 星で構成されている可能性が示唆された。しかし、これらの星は本当に金属が超過剰なのか、あるいは何かの原因で金属線が強く見えるだけなのかを巡って論争が続けられており、現在でも完全に解決されたわけではない。

一般に現在使われている古典的なスペクトル解析の理論では、星のスペクトル線強度はその星の有効温度と表面重力加速度が決まると、あとは化学組成とマイクロ乱流速度で決定される。従って、マイクロ乱流速度の僅かの誤りが化学組成に大きな誤りをもたらす可能性がある。図 6 には代表的な SMR 星 μ Leo についての化学分析の結果が示してある。これから分かるように、乱流速度を小さく取れば鉄組成は大きくなりこの星は SMR 星と言うことになるが、乱流速度を大きくとれば鉄組成は太陽組成よりも小さくなってしまふ。それでは図 6 に示された解析結果のなかで誰の結果が正しいかは、誰の乱流速度が正しいかを証明すればよいであろうか？ しかし、困ったことに恒星乱流の本質は何かと言う問題はまだ解決されていない。事実、恒星のスペクトル解析で通常仮定されるマイクロ乱流を正当化する根拠は実験的にも理論的にも存在しないと言う指摘も古くからなされている。図 6 のように、同じ星についても異なる結果が得られるのは、解析の誤差によるものなのか、あるいはマイクロ乱流の仮定が物理的実体に対応しないためなのかは必ずしも自明ではない。

詳しい分光解析が行われた SMR 星についてもこのような問題があるが、上で述べた銀河系バルジの赤色巨星の金属量などもこれら SMR 星の結果を用いて低分散スペクトルから間接的な方法で推定されたに過ぎず、高分解能スペクトルによる直接的な解析を行なう必要がある。また低温度星を主成分とする早期型銀河の中心核や楕円銀河には金属線が強いものがあるが、これらの系外銀河の積分スペクトルの解釈を正しく行い、また宇宙

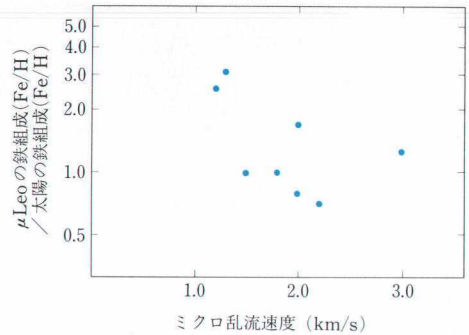


図 6 μ Leo (K型巨星) について、何人かの天文学者による化学分析から得られた鉄組成 (太陽組成にたいする相対値) とマイクロ乱流速度。この星の金属量は果して“超過剰”かあるいは正常以下か？ これらの問題の最終解決には恒星乱流の本質を明らかにする必要がある。

の物質進化は何処まで進んでいるかに明確に答えるには、なお星のスペクトル解析における基本的問題を解決しなければならないであろう。

6. 低温度星の分光学—今後の問題

星は古くから研究されているがなお未解決の問題は多く、前節の例が示すように比較的長い歴史を持つスペクトル定量解析の方法論すら十分確立されたものではない。このような困難は赤色巨星、AGB 星などの低温度星でより深刻な問題となり、古典的なスペクトル線形成理論の限界が見えてきたことを示すものであろう。例えば太陽のスペクトル線に見られる非対称性や偏移は対流によるグラニル構造と密接に関係していることが明かにされ、従来マイクロ及びマクロ乱流で説明されていたスペクトル線の強度や幅は共にこのような対流層の速度構造の反映である可能性が示されている。同様の解析が太陽以外の星にも拡張され、ほとんどすべての星で従来対称として扱われたスペクトル線は非対称であることが明かにされた。赤色巨星の場合についてもスペクトル線強度に依存する相対偏移や非対称性の存在が示され、これらの星の大気には大規模な対流層に起因する複雑

な速度場と非均質構造の存在することが示されている。このような非均質大気における複雑な速度場のもとでのスペクトル定量解析の方法はまだ確立されていない。しかし、高精度の高分解能スペクトルにより、視線速度の精密測定やスペクトル線輪郭そのものの解析から光球大気の構造や運動を直接明かにする方法—分光診断—が可能となり、新しい発展の道が開かれつつある。

進化の進んだ星の内部で合成された化学元素は、質量放出により星間ガスの化学進化を通じて宇宙の物質進化の原動力となるが、同時にこれらの星の周辺における多くの分子レベルでの化学過程に影響を及ぼし、分子・ダストの形成に至る多様な物質進化を支配する。これら放出ガスの膨張速度は 10 km/sec の程度であり、これは中心星の表面からの脱出速度よりはるかに小さく、中心星半径の 10 倍程度の場所での脱出速度に等しい。このことは、これらの質量放出はこのような外層内部領域にその起源をもつことを示している。現在なお未解決の質量放出機構を明かにするにはこのような領域における物理・化学過程を解明する必要がある。このような外層内部領域は分子、ダスト形成を含む低温領域と彩層などの高温領域の複合構造となっていると考えられている。これらについては紫外線から赤外線領域にわたり、高分解能スペクトルによる分光診断の手法により解明が進みつつある。このような外層領域の複合構造は上に述べた光球大気の非均質構造とも関連していると考えられ、質量放出などの外層におけるダイナミカルな現象も基本的には光球大気の物理過程に支配されている。我々はまだ低温度星の光球から外層にわたる大気構造の統一的な理解には至っておらず、今後の研究に待つところが大きい。

7. おわりに

以上見たようにさまざまな星の化学分析から元素レベルでの宇宙の物質進化の解明がかなり進んできた。おそらく宇宙の主要な歴史は現在存在する 100 種に達する化学元素と数 100 種にのぼるそれらの同位元素の分布と組成比のなかに書き記されていると言つても決して過言ではない。これら元素とその同位体の組成及び分布を天体スペクトルの解読から明かにすることにより、我々の宇宙で生じた主要なできごとについての確実な観測的手がかりを得ることができであろう。このような確信のもとに、さらに多くの天体—銀河系中心部からハロー外周部に分布するさまざまな進化段階の星や、我々の銀河系とは異なる物質進化の段階にある近傍銀河の個々の星や星雲—の精密化学分析を進める必要がある。また、星の内部で合成された化学元素が星間物質に還元される質量放出過程とそれに伴う分子・ダストの形成を含む分子レベルの物質進化の解明を進めると共に、さらにこれらの物理・化学過程の原動力となる光球及び外層内部領域の動力学構造を分光解析の様々な手法を駆使して解明していく必要がある。

このように元素レベルから分子レベルにわたる宇宙の物質進化を支配しているものは星であり（主として中大質量星）、またこのような 100 億年以上にわたる宇宙の物質進化を追跡できるのもまた星によってである（主として小質量星）。このように星の研究は 2 重の意味で我々の宇宙を理解する上で基本的な重要性を持っている。これら 2 つの側面は相互に深く関連しているが、いずれも多くの未解決の問題を解決するには、より高い精度、より高い分解能で、より暗い天体を観測する必要がある。すでに、比較的永い観測の歴史を持つ星の研究に於いては、このような新しい観測の必要性は特に大きい。現在、我国で進行中の地上及びスペースからの新しい観測計画により、これら星の研究は大きく進展することが期待される。