

銀河系七不思議

—銀河系の進化について—

横尾 武夫*

はじめに

最近、天文学の概説書や教科書などで、銀河系の構造と進化に関連したもの、あるいは、そのような題名の章を設けたものが、多く見られるようになった。ところが、我々が住むこの銀河系が、どのような進化の過程を経てきたかに興味を持って本を開いた多くの読者は、肝心の、進化の物語り性には、歯切れの悪さを感じると思う。確かに、現在の天文学では、まだ銀河系進化論といったものが確立されたわけではなく、今後の重要な課題の一つであるとしか云えない段階である。

小文は、現在の我々が、「銀河系進化論」の成立への道程の、どのあたりまで到達しているかを考える材料としたい。

銀河系の規模が、およその形で知られるようになったのは、今世紀の始めの頃である。その後、宇宙銀河の研究が進み、それら銀河系との比較から、銀河系の宇宙における階層的な位置づけが出来上がったのが、銀河系の進化の研究の出発点であったといえる。そして、銀河系を構成する恒星や星間物質の個々の特性と、空間的な運動と分布との関連が次第に明らかにされ、今では、銀河系の実体をかなり良く見わたせるようになった。それらを集約したものが、第1表にあげたような、銀河系の構成物質を「種族」によって分類する仕方である。これが、まず一段階の到達であり、進化の道を逆にたどる糸口でもある。このような種族による分類は、恒星の形成時期と、その材料となった物質の化学組成、そして現在の空間分布とが、明確な関連性を持っていることを示し

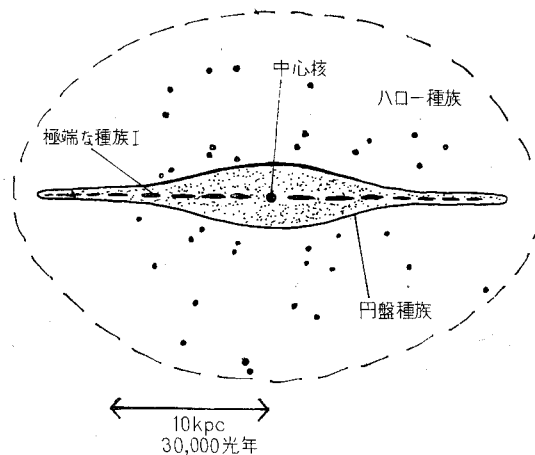


図 1

ている。このような種族の特性を統一的に説明しようとする進化理論は、まだ、指導原理的な、概括的なものではあるけれども、いくつか考えられている。それらの中で、最も標準的な進化理論は、次にあげる二つの考え方を骨子にしたものである。

- 1) 個々の恒星の進化の過程で、その内部での熱核反応により重元素が合成されるが、銀河系の中で、恒星の誕生-進化-死が、くりかえし行われるため、銀河系の物質は、全体として、重元素を次第に多く含むようになる。
- 2) 原始の銀河系は、ガス物質と恒星との混合体が、不定形もしくは球状にひろがっていたが、ごく初期に、ガスの部分が、円盤状に急激に落ちこむという

表 1 種族分類

古い分類	種族 II			種族 I	
	ハロー種族 II	中間的な種族 II	円盤種族	中間的な種族 I	極端な種族 I
金属量 Z (質量比)	0.003	0.01	0.02	0.03	0.04
年齢 (10 ⁹ 年)	6 以上	6 ~ 5	5 ~ 1.5	1.5 ~ 0.1	0.1 以下

1957年、I.A.U. のパチカン総会でみとめられた分類による。

* 大阪教育大学

T. Yokoo, The Seven Mystery of the Galaxy

カタストロフィーがおこった。そのために、円盤物質とハロー物質とが分離した。

しかし、これらの考えの基本をなす、個々の現象の物理過程のすべてが、具体的に明らかにされたわけではないので、これだけでは、進化のイメージは漠然としたものであるといわざるをえない。この「標準的」な図式も、将来、全く書き換えられる可能性もなきにしもあらずの状態である。ここでは、この「標準的」な銀河系進化論を念頭において、現在までに、銀河系の進化に関連する、観測によって見いだされている現象が、理論的な見地の問題をながめるため、進化に特にかかわりあいのありそうな未解決の問題を七つ取り出してみた。七つに限る必要はないけれども、「世界の七不思議」という紀元前からのベストセラーが頭の中にあって、それに語呂合わせを試みただけである。勿論、銀河系の中に、不思議と思われることが七つしかないという意味ではないことは、「世界の七不思議」と同様である。

銀河系七不思議

I 恒星の速度分布

銀河系は、それを構成する星とガスが銀河回転と無秩序運動によって、銀河系全体がおよぼす重力とつりあう形で、平衡で定常な姿を保っていると考えられている。無秩序運動については、星のグループによって分散度が異っており、それが、種族分類の一つの手がかりでもある。第2表では、銀河面に垂直な方向の運動が、星のスペクトル型によって異なることを示している。スペクトル型が晩期になるにしたがって、円盤の厚みが大きくなる様子が知らされる。スペクトル型が質量の系列であるという観点のみからは、星々の間で、平均として、エネルギーが等分配されて、質量の小さい晩期の星ほど速度が大きくなる、という説明が出来そうである。実際には、銀河系は希薄であり、星同志がお互いに力学的エネルギーを幾度もやりとりするほど、星の年齢は古くない。スペクトル系列は、やはり星の平均年齢は古くない。スペクトル系列は、やはり星の平均年齢の系列と見る方が良さそうだ。晩期の星ほど平均年齢が大きく、それらの星が形成されたガスの円盤が、より厚みがあったとすれば、

表 2 銀河面に垂直な方向の運動と分布

星のスペクトル型	星間ガス	0~B5	B6~A	F	G	K	M
Z方向の速度分散 (σ_z km/sec)		4	9	14	20	19	19
円盤の厚さ $\langle z \rangle$ pc	125	50	70	130	180	270	270

“Stars & Stellar System vol. 5” Blaauw による。

若い星ほど扁平に分布することは、円盤ガスの冷却過程をあらわしているともいえる。しかし現在の星の分布が過去のガスの分布をそのまま反映しているとは、必ずしも言えない。星がその生涯を通じて、幾度か渦状腕の中を通過したため、渦状腕の重力エネルギーを得て、速度を大きくしたとしても説明しえる。いずれが良いかは、まだ未解決である。

II いわゆる「知られざる物質」

太陽近傍の空間の質量密度がどれくらいあるかは、銀河系の総質量を定める上にも重要な問題である。あるグループの星が、銀河面からの高さに応じて、星の速度分布と密度分布が変化する様子から、その銀河円盤の密度を知ることが出来る。このようにして推定された密度は、力学的な密度、といえて、太陽近傍では、 $0.15 M_{\odot}/pc^3$ である。ところが、天空をにらんで、実際に観測することが出来る物質について考えてみると、そのほとんどが恒星によって占められているが、電波の眼や、光の吸収の測定などによっても星間物質の存在も確認できる。ところが第3表に示すように、観測にかかる全ての恒星と星間物質をよせあつめても、光の力学的密度の約半分にしか満たないのである。我々は、実に膨大な量の物質を見落しているといわねばならない。その見えない物質は、どのような形で占められているのだろうか。観測にかからないガスの状態のままか、質量が小さすぎて自ら光ることの出来ない星なのか、あるいは進化をってしまった死んだ星なのだろうか？

表 3 太陽近傍の密度の内訳

力学的密度	$150 M_{\odot}/1000 pc^3$
星間物質	25
星	61
“知られざる物質”	64

“Stars & Stellar System vol. 5” Blaauw による。

III 渦状腕

宇宙銀河のなかで扁平な形をしたものは、ほとんど例外なく、明るい2本の腕が対称に美しい渦をなしている。我々の銀河系も扁平な形をしているから、このような渦状腕を持っていることは間違いない。星や星間物質の分布の観測からは、その銀河全体にわたる姿はあまりあきらかとはいえないが、渦状腕の一部を見ているに違いない徴候がいくつもある。このように、銀河に普遍的な構造は、その進化に密接なかわりを持っているに違いない。この渦状腕が、何故出来るかは、興味のある問題として多くの研究がなされてきたが、現在では「密度波理論」が最も大きな成功をおさめている。密度波理論によれば、回転する扁平な系におこる一種の定常波の峯が渦

巻の形を示し、それが渦状腕であるというものである。銀河の中で最もありふれた、そして重要な作用である重力だけで渦状腕の機構を説明出来るのが魅力的である。

しかし、この密度波理論は第一次近似の段階であるため、まだ多くの疑問が残されている。たとえば、永い間、渦状を保たせるには、常に何かの励起作用を考えなければならぬかも知れない。また、密度波理論は、銀河系全体にわたる渦状構造を提示しているが、実際の方程式の解は局所的な意味しか持たないという反論もある。渦状腕には磁力線が骨組みのようにはしているのが知られているが、この磁場は腕に対してどの程度の影響をあたえるかは、わかっていない。我々が地球上で見ることの出来る渦まきは、水の流れの中とか、人工衛星から見た台風の雲とか、物質が渦の中心からの動径方向運動がある場合が多い。平衡で定常であると考えられている銀河系に、大きなスケールで対称的な渦巻きのパターンを作る機構は、やはりまだ謎と言った方が良さそう。

IV ハローと円盤の角運動量

種族 I の星やガス雲は、太陽近傍で約 250 km/sec の速度で銀河回転しており、中心力とつりあっているが、種族 II の星の銀河回転の速度は、たかだか 30 km/sec に満たず、無秩序運動が優勢である。銀河系の中で、ハローと円盤が、どのようにして分離したかは不明であるが、もし、銀河の初期に、崩壊というカタストロフィーがあったとする、現在の考え方を支持するとすれば、次のような矛盾がおこる。すなわち、ハローと円盤の物質が過去に混在して同一の系に含まれていたのが、何かの原因で二つの系に分離したあとでも、それぞれの系で、単位質量あたりの角運動量は等しくなければならない。ところが、種族 II の琴座 RR 型変光星の運動学的な研究によると、それらの単位質量あたりの角運動量は、円盤種族のその約八分の一にしか満たないという。ハローの角運動量が何かの理由で減少したとするか、ハロー物質と円盤物質が別の起源を持つことを考えなければならない。

V 銀河系のヘリウム量

太陽大気のヘリウム量は、全体の質量の約 30% を占めているといわれている。ヘリウムのガスは 1 万度以上に熱せられないと、可視光のスペクトル観測にはかからないので、星や星間ガスのヘリウム量に関する知識は充分であるとはいえない。しかし、乏しい資料から、約 30% という量は銀河系を代表する値であると考えられている。恒星の内部での水素燃焼によってヘリウムが作られるということで、この量を説明するとすれば、現在の銀河系の中の星の生成率ではとても補いきれず、過去に、ものすごいスピードで星の生成、進化があったことを仮定しなければならない。しかし、もしそうであった

表 4 スペクトル観測によって定められたヘリウム量の例

		He/H
種族 I	太陽プロミネンス	.16
	オリオン星雲	.15
	惑星状星雲	.16~.18
	B 星 { τ Sco ζ Per	.15 .13
種族 II	BD+33°2642	.11
	K648 (M15中の惑星状星雲)	.18
	NGC6644(高速度惑星状星雲)	.14
ヘリウム 欠乏星	3 Cen A (種族 I)	>.01
	Feige 86 (種族 II)	"

Oort (Science vol. 163, 1969) の論文から引用したものである

とすれば、同時に重元素も多量に形成されたはずである。ところが、金属量の少ない種族 II の星のヘリウム量を見ても、かならずしも、重元素量とヘリウム量が相関を持っているとはいえないようである。むしろ、ヘリウム量については、種族 I と II で同じであるという考え方が、現在では支配的である。

但し、種族 II の星のヘリウム量の推定は、直接、スペクトルからもとめたものよりは、HR 図上の位置などのような間接的な推定に大きな荷重がかかっている、という保留事項があるが、そこで、この 30% のヘリウムは、銀河形成以前の原始物質に、すでに含まれていた、という考え方がなされる。すなわち、観測された宇宙の膨張と、3°K バックグラウンド放射をもとに、膨張宇宙を過去に溯らせ、原始火玉の中で現在の量にはほぼ等しいヘリウムが作られていたという。このような原始物質があるとすれば、その化学組成は、宇宙のどこでも一様でなければならない。ところが、B 型星の中に、極端にヘリウムが少ない星が見つっている。このヘリウム欠乏星は、種族 II の水平分岐星にあり、また、種族 I のアソシエーションに含まれ若い星にも見られるのである。このような星は、いわゆる「病理学的な星」なのであろうか。ヘリウム欠乏星の重元素量は、種族に相応して普通であるといわれている。いつたん作られたヘリウムを、再び水素に分解することは非常に難しいことである。銀河系のヘリウム量は、量そのものがまだ確定していないし、その起源も謎にまつまされたままである。

VI 球状星団の年令

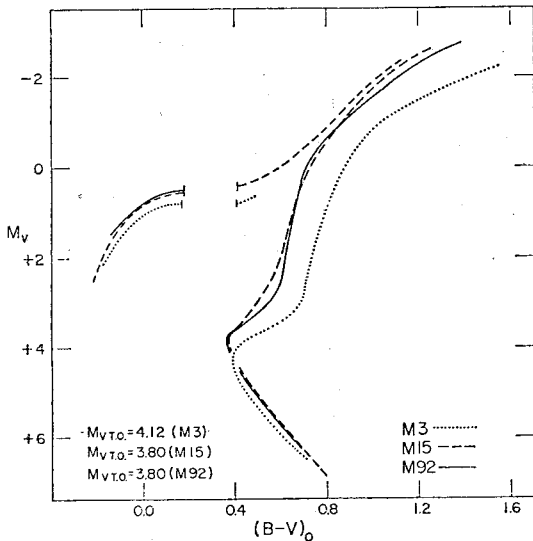
ハローに散在する球状星団は、見かけの姿もさることながら、それに含まれる恒星の HR 図も、お互いに、実によく似ている。それらの HR 図は、いずれも、 $M_V = +4$ 付近で星系列からの分岐点を持っており、銀河系の

星で最も古い年令を示している。しかし、精しい観測によると、球状星団によっていくぶんその分岐点に違いがあるが、この付近の星は小さい質量であるため、年令は 10^{10} 年から 1.8×10^{10} 年という大きいひらきを示していることになる。膨張宇宙の年令を考えると、ハッブル定数を $H=75 \text{ km/sec}$ とすれば、ハッブル年令は $t_H=1.3 \times 10^{10}$ 年となる。銀河系の星が、膨張宇宙の年令をこえてひろがるのは、気持ちが悪いことである。以上の話は星団の化学組成が違ふことは予想されることである。最近では、星団の年令、最初のヘリウム量、重元素量の3つをパラメーターにした恒星進化の理論計算と、観測されたHR図を比較して、それらのパラメータを同時に定める試みがなされている。たとえば、ヘリウム量を種族Iと同じ30%、金属量を色々に変えてやれば、どの球状星団も、 1.2×10^{10} 年程度の年令におさめることが出来る。この論点からいえば、球状星団がほぼ同時に出来たものであるといえる一方、銀河の中で急激変化か、あるいは、場所による組成の違いを仮定しなければなら

ない。ヘリウム量の問題が残ることも先にのべた通りである。それにしても、どうしても、球状星団の年令が、ハッブル年令と一致しなければならないのだろうか。

Ⅶ 中心核の活動

銀河系の中心核は、円盤の星や星間物質が邪魔をして、可視光では見ることが出来ないが、電波や赤外領域の眼では、点状の天体として同定することができる。電波のスペクトルは、それがシンクロトロン放射の機構によって放出されたものであることを示している。赤外のスペクトルは、波長が 20μ のところにピークを持つ強力なものであることを示しており、赤外光は、銀河中心が通常の恒星の集合体として出すことが出来る光ではありえない。力学的に推定された中心核は、 $10^6 M_\odot$ 程度の質量を持っており、電波や赤外線の放射について、エネルギー量だけから見れば、たとえば超新星の爆発なども考えれば、桁違いに大きいものとはいえないが、放射機構については謎のままである。ところで、宇宙銀河のあるものに見られる、いわゆる「活動的」な銀河がある事から考えて、我々の銀河系の中心核の活動も、こんなまやさしいものではないかもしれない。たとえば、中心核から4kpcのところには「3kpc腕」と呼ばれるガス塊が、50 km/secの銀河中心からの膨張を続けている。さらに、規模は小さいが、中心核の近くに同様なガス塊が何本か見つかっている。このような膨張腕は、銀河系全体の力学的なふるまいの局所的なあらわれとも見えそうであるが、現在では中心核の活動に原因するものであるという考え方が強い。「3kpc腕」を作るに必要な力学エネルギーは 10^{56} エルグにもなり、素性の知れている超新星が 10^{50} エルグのエネルギーを放出することから考えて、その活動ぶりはすさまじい。中心核が過去において、宇宙銀河のあるものに見られるような爆発をおこしたそのなごりなのであろうか。最近、銀河中心に起源を持つという重力波を検出したという主張がある。それによると検出された重力波の強さは、中心核で一年間に $10^8 M_\odot$ の質量の消滅に相当するものであり、 10^8 年の間に銀河系の全質量をくいつぶす量である。この問題に関して、多くの追試を待たねばならないが、もし本当だとすれば、最大の不思議としてあげなければならないだろう。



Nuclei of Galaxies (O'Connell 編) 中の Sandage による

図 2 球状星団のHR図

表 5 球状星団の進化計算の例 (Iben, Rood による)

星 団	分岐点の M_{bol}	ヘリウム量 Y	金属量 $\log Z$	年 令 $T \times 10^9$ 年
M 3	3.99	.306	-2.9	11.9
M13	3.94	.357	-3.1	11.3
M15	3.66	.351	-3.8	11.3
M92	3.66	.328	-3.8	11.6

Sandage による (図 2 と同じ)

おわりに

こうして、いささか八方やぶれであるが、疑問点をならべたててみると、まだまだ、銀河系の進化の物語りを作りあげるまでの道のりは長いように思える。ここでは、われわれの銀河系だけに話をかぎったけれど、もし銀河系進化論というものがあるとすれば、それは宇宙銀河の進化にも通用するものでなければならないわけで、現在までの宇宙銀河に関する観測事実にある「不思議な

