

太陽近傍の星の速度分散の年齢依存性

石橋 史朗*

1. はじめに——問題提起

現在我々が見ている銀河系のさまざまな性質を物理的に理解しようとする時にしばしば遭遇する問題がある。それは我々が実際に目にしている銀河系の姿はその進化のタイムスケールに比べるとほんの一瞬にしかすぎないため、銀河系が過去においてどのような経過をへて現在の状態に至ったのかを直接的に知る方法がないということである。そのために、現在観測されているある性質にとって、銀河系の初期の状態が決定的な役割を果たしているのか、あるいは現在まで進化してくる途中での物理過程が重要であるのかを判断するのが困難な場合がでてくる。言いかえると、現在見ている銀河系の性質は先天的にある程度決まっているものなのか、あるいは後天的な要素が強く働いてでき上がったものなのか、という疑問が常につきまとうのである。このような問題の一例として、太陽近傍の星の速度分散が星の年齢との間に強い相関を持っているという観測事実が、現在どのように解釈されているのかについて紹介してみたいと思う。

太陽から 20 パーセク以内にある星をサンプルしたカタログにグリーゼのカタログ (1969 年) があるが、このデータをもとにしてビーレンは 1974 年に太陽近傍の星の速度分散の値を星のタイプ毎に計算して表 1 のような結果を出している。ここでの速度分散とは、太陽近傍の星の集団の平均的な運動に対するばらつきの大さを意味している。 $\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$ はそれぞれ銀河円盤の半径方

表 1 太陽近傍の星の速度分散の値を星のタイプ毎に計算してまとめたもの (ビーレン 1974 年による)

星のタイプ (スペクトル型)	速度分散 (km/s)				平均年齢 τ (10^9 年)
	σ_U	σ_V	σ_W	σ	
- A1	14	8	4	16	0.2
A2 - A6	17	7	4	19	0.4
A7 - F1	14	11	8	19	0.9
F2 - F6	27	18	11	34	2
F7 - G3	34	21	21	44	4
K+M 矮星	39	23	20	50	5
古い巨星	32	31	15	47	7
白色矮星	42	22	18	50	—
準矮星	101	82	65	145	10

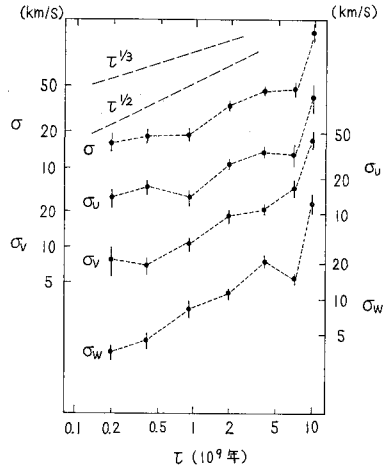


図 1 速度分散の各成分 $\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$ 、及び全速度分散 σ の値を星の平均年齢 τ に対してプロットしたもの (ビーレン 1974 年にもとづく)

向、円周方向、および円盤に垂直な方向の速度分散の大きさを表わし、これらの 3 方向の成分を合わせた全速度分散の値が σ である。すなわち $\sigma^2 = \sigma_U^2 + \sigma_V^2 + \sigma_W^2$ となっている。また、これらの各グループの星の集団の平均的な年齢を最後の欄に示してある。表 1 を見ると、早期型星から晚期型星へ向かうにつれて速度分散が増加していることにすぐ気がつく。この傾向をより明らかにするために、星の平均的な年齢と速度分散の関係をプロットしたのが図 1 である。星の速度分散 σ が年齢 τ の $1/3$ 乗ないし $1/2$ 乗で増加しているのがよくわかる。

このように太陽近傍の星の速度分散が年齢の増加関数になっていることは以前から指摘されていたが、この観測事実の解釈としては、大きく分けて 2 つの立場がある。その 1 つは、現在観測されている速度分散はそれぞれの星が生まれた時に最初から持っていたものであるとする立場 (先天説) であり、第 2 の考え方は、星が生まれた時の速度分散はどの星も同じ程度であるが、現在に至るまでの間にさまざまな摂動を受けて現在の速度分散が獲得されたと考える立場 (後天説) である。すなわち、最初に述べた「初期条件と途中経過のどちらが本質的であるか」という問題がここでも現われてくるのである。そこでこのような正反対な 2 つの立場をそれぞれとった時に、現実の観測結果がどの程度うまく説明できるのかを以下順を追って見ていくことにしたい。

* 東大理 Shiro Ishibashi: The Age Dependence of the Stellar Velocity Dispersion in the Solar Neighborhood

2. 星の運動に擾乱を与えるもの——後天説

星の速度分散が年齢とともに増加しているという事実からすぐに思いつく解釈は、星の運動に擾乱を与える何らかのメカニズムが存在して、時間とともに星の速度分散をふやす働きをしているという考えであろう。このようなメカニズムが銀河系の初期から現在に至るまでの間ずっと働き続けていれば、星が生まれた時の速度分散が時代によらずに一定であっても、古い世代の星の集団ほど長い間摂動を受けることになるから、速度分散が年齢の増加関数になっていることがきわめて自然に説明できる。星の運動に擾乱を与えるものとしては、まず最初に星同志の間の衝突過程が考えられる。しかしながらよく知られているように、星同志の間での重力相互作用で速度分散が変化するタイムスケール、すなわち緩和時間は 10^{14} 年程度であり、この値は明らかに宇宙年齢をはるかに越えてしまうため、星同志の衝突によって速度分散が有意に増加していくとは考えにくい。そこで次に考えられたのが、星よりももっと質量の大きな天体と星との間の衝突過程である。

シュピッツァーとシュバルツシルトは、当時観測的にかなりはっきりしてきた星間ガスの非一様性に着目し、ガスの密度が集中しているいわゆる星間雲と星との間の衝突によって、星が速度分散を獲得していくメカニズムを提案した。(1951, 1953年) まず大まかな評価を行なうため、星と衝突する相手の天体の質量、数密度、平均的相対速度をそれぞれ m , n , v とすると、上で述べた緩和時間 T はこれらの量との間に、 $T \propto v^3/m^2n$ という関係を持っている。ここで分母の mn は質量密度を表わすが、太陽近傍ではこの量は星の系についても星間雲についてもほぼ同じ程度の量となる。したがって緩和時間 T は、衝突する相手の質量に反比例して短くなることが期待される。例えば星間雲の質量として太陽質量の 10^5 倍程度をとると、星と星間雲との衝突による緩和時間は 10^9 年程度となり、この値は銀河系の年齢以内におさまるので、星の速度分散に有意な変化を与えることがわかる。よって太陽質量の 10^5 倍ないし 10^6 倍程度の星間雲の存在が確かめられれば、ひとまず星の速度分散を増加させる有効なメカニズムになりうるであろう。そして現在ではこのような質量を持つ天体として巨大分子雲の存在が確立している。しかしながらシュピッツァー達がこの論文を書いた頃には巨大分子雲は未だ発見されていない時代であったから、彼等の仕事はある意味では極めて大胆な想定に基づいていたともいえる。

3. 星と星間雲との衝突過程

上で述べたようなメカニズムで、どの程度観測事実を

うまく説明できるかを調べるためには、星と星間雲との衝突過程を定量的に記述する必要がある。取り扱い方法としては、微分回転している銀河の中を星が運動していく状況を考え、その軌道上で星間雲と遭遇することによって速度分散を獲得していく過程を計算することになる。このようなプロセスは結局のところ、星の集団の速度空間における一種の拡散方程式に帰着することがわかり、最終的には速度分散の時間変化は $\sigma(t) = \sigma(0)(1+t/t_E)^{1/3}$ という形に表わされる。ここで $\sigma(0)$ は星が生まれた時に持っていた速度分散の大きさであり、 t_E は速度分散の増加の速さを表わす特徴的な時間で、先に述べた緩和時間 T に対応するものである。この結果では速度分散の時間に対する依存性が t の $1/3$ 乗になっていて、図1の観測結果と良く一致していると言える。

このようにして、星の速度分散が年齢の増加関数になっているという事実は、星と大質量星間雲との間の衝突によって解釈することが可能となったわけであるが、このメカニズムでは依然として、準矮星に代表されるような速度分散のきわめて大きい種族IIの星までは説明することはできない。従ってこれらの最も古い星は、生まれた時点から既にかかなりの大きさの速度分散を持っていたと考えるのが妥当であろう。以上のことを銀河の進化という観点からまとめると次のようなシナリオになる。すなわち銀河形成の初期においては、星間ガスは現在よりもずっと大きな速度分散を持っていて、この時期に種族IIの星が誕生した。その後、星間ガスの速度分散が散逸によって現在の値程度に落ち着いた頃から種族Iの星が形成され始め、早く生まれた星は星間雲との衝突をくり返すうちに、次第に大きな速度分散を獲得していったと考えられる。

4. 拡散過程としての取扱い

さて、上の議論からわかるように、シュピッツァーとシュバルツシルトによって提案されたメカニズムの本質的な物理過程は、星と星間雲との間での重力による散乱過程である。従って基礎となる物理法則は重力の法則のみであるが、いざこの問題を定量的に取扱おうとするとかなり複雑な計算を必要とすることになる。事実シュピッツァー達の計算でも、星や星間雲の速度分布についてはマクスウェル分布を仮定するなどの簡単化が行なわれているが、それでもなお、かなりこみ入った操作を行なわなければならない。このようなこともあって、星の速度分散が増加していく様子をより現象論的な立場からとらえようとしたのがビーレン(1977年)である。すなわち星の速度分散の増加を速度空間での拡散現象と考え、観測されている星の速度分散と年齢との間の関係から拡散係数を決定しようという試みである。この様子を図2と

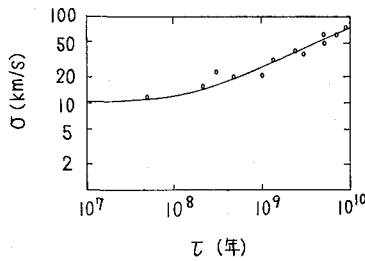


図 2 速度分散 σ の年齢 τ に対する変化を示したものの。丸で示したのが観測点で、実線はある一定値の拡散係数を仮定した時の理論曲線 (ピーレン 1977 年による)

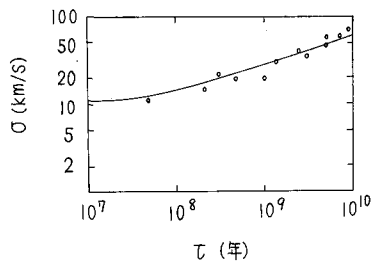


図 3 速度分散 σ の年齢 τ に対する変化を示したものの。丸で示したのが観測点で、実線は星の速度に反比例するような拡散係数を仮定した時の理論曲線 (ピーレン 1977 年による)

図 3 に示した。丸で示した各点が観測値であり、データは、やはりグリーゼのカタログに基づいているが、ここでは銀河面と垂直な方向について平均化操作を行なった速度分散の値を用いているので、表 1 の値とは若干異なるが、おおまかな傾向は変わっていない。実線で示した曲線が観測点をうまく説明するように拡散係数の値を選んだ時の理論曲線であり、図 2 はある一定値の拡散係数を仮定した場合、また図 3 は星の速度に反比例するような拡散係数を仮定した場合の結果を描いてある。それぞれの場合について星の速度分散 σ の年齢 τ に対する依存性を式で表わすと、図 2 の場合には $\sigma(\tau) = (\sigma^2(0) + c_1\tau)^{1/2}$ 、図 3 の場合には $\sigma(\tau) = (\sigma^3(0) + c_2\tau)^{1/3}$ となる。但しここで c_1 及び c_2 は拡散の速さを表わす定数である。シュビッツァー達の星と星間雲とが衝突する過程は、図 3 の場合に対応している。ピーレンは、拡散現象を引き起こす原因については特定のメカニズムを支持しているわけではないが、図を見る限りではこのような現象論的な取扱いでも観測事実をうまく説明できている。具体的な物理過程を提出していない点で多少説得力に欠けるものの、星の速度分散の後天説を支持する一つの結果にはなっていると思われる。

5. 銀河形成モデルからのアプローチ——先天説

これまで述べた後天説と正反対の立場をとっているの

がラルソンに代表される先天説の立場である。つまり、現在観測されている星の速度分散は星が生まれた時に最初から持っていたものであり、シュビッツァー達が主張するような星の誕生後におけるさまざまな擾乱の効果はほとんど有効には働いていないだろうという説である。後天説に対するこうした反論が出てきた背景には、年齢のわりには速度分散が小さい星の集団がいくつか発見されたことがあげられる。特に有名なのがヒアデス運動星団であり、その年齢 7×10^8 年から期待される速度分散の大きさが $\sigma \sim 20$ km/s であるのに対して、観測値は $\sigma \leq 7$ km/s と著しく小さな値を示している。

このような後天説の困難を避ける意味から、ティンスレイとラルソン (1978 年) は、銀河の形成モデルから星の速度分散を説明することを試みている。円盤銀河の形成と進化を数値計算によって追跡したものとして 1976 年のラルソンの仕事が有名であるが、ティンスレイ達の計算はこのラルソンの仕事の拡張版となっている。この数値計算では星の系とガスの系の二成分系を考えて、原始銀河のガスの収縮から出発して、星の生成や星からのガスの質量放出などを経て現在見られるような銀河ができ上がるまでを、化学進化も含めて再現することを目的としている。このモデルの中には、ガスが最初持っていた速度分散が散逸によって次第に減少していく効果が入っているので、銀河初期に生まれたハロー種族の星の速度分散は大きく、その後ガスの速度分散が減少していく途中で誕生した円盤種族の星の速度分散は、最近になって生まれた星ほど小さくなっているという傾向がうまく説明できている。この様子を示したのが図 4 である。しかしながら、観測的には現在に至る $2 \sim 3 \times 10^9$ 年の間で 2 倍以上の速度分散の差が存在しているにもかかわらず、彼等のモデルではこのような急激な速度分散の変化までは説明できていない。すなわち、シュビッツァー達の場合とはちょうど逆に、このモデル計算では種族 I と種族 II の速度分散の相違は比較的良好に説明できるが、 10^9 年程度での短期間の速度分散の変化までは説明できていな

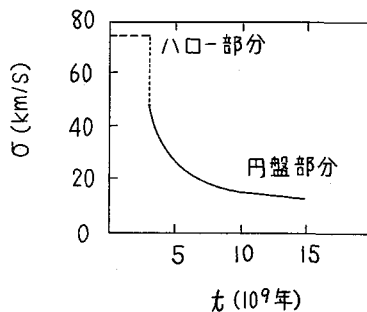


図 4 星の速度分散 σ が、銀河形成開始時からの経過時間 t に対してどのように変化していくかを示した図 (ティンスレイ, ラルソン 1978 年にもとづく)

いのである。このような短期間での速度分散の変化の原因について、同じ先天説の立場から一つの答を提出したのが、次に述べる星間ガスの乱流階層説である。

6. 星間ガスの乱流階層説

1979年にラルソンによって提出された乱流階層説は、一言でいうならば、銀河内の星間ガスはいろいろなサイズの乱流が重ね合わさって階層構造を作っていることを主張するものである。図5は、我々の銀河系内のさまざまな対象について、それが占めている空間的な大きさ L に対して、その対象が持っている速度分散の大きさ σ を観測から求めてプロットしたものである。バツ印は星についてのデータで、散開星団やOBアソシエーションについての観測値を表わしている。白丸は星間ガスについての値であり、サイズの小さい所では星間雲、大きい所ではガス円盤の波うち現象なども対象として含まれている。この図を見ると、銀河系内のさまざまな対象が持っている速度分散 σ とその対象が占めているサイズ L との間にはきわめてよい相関があり、 $\sigma \propto L^{1/3}$ の形でよく表わされることがわかる。すなわちサイズ L の空間には、そのサイズの $1/3$ 乗に比例するような速度分散をもった乱流運動が存在していると考えることができる。

このような乱流階層説の立場をとると、太陽近傍の星の速度分散が年齢依存性をもつことが次のように説明できる。現在太陽近傍にある古い星は、かつては太陽付近から離れた位置にあったものが飛来してきたものであると考えると、その星が動いた空間サイズ L は、星の年齢を τ とした時に $L \sim \sigma \tau$ 程度になる。この関係と上に述べた $\sigma \propto L^{1/3}$ の関係を合わせると、星の速度分散 σ と年齢 τ の関係が $\sigma \propto \tau^{1/2}$ という形に求められる。この関係はまさに図1のところで述べた関係と一致するものである。実際、太陽近傍で観測される星について、先のビーレンの解析から得られた σ と τ の値を用いて、 σ と L

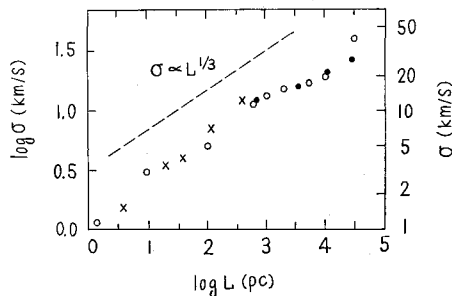


図5 我々の銀河系内のさまざまな対象について、それが占めている空間的サイズ L に対してその対象が持っている速度分散の大きさ σ をプロットしたものの。バツ印及び白丸はそれぞれ星、並びに星間ガスについてのデータ。黒丸は太陽近傍の星についてのデータを表わす (ラルソン 1979 年にもとづく)

の値を図5に黒丸で示してみると、前述の星や星間ガスについてのデータの線上にうまくのることがわかる。以上のことから、星の速度分散が年齢依存性をもつという観測事実は、その星が占めている空間スケールに対応した乱流速度場を反映しているためであると考えられることができる。すなわち現在太陽付近で観測される古い星ほど、かつてはより広い空間に分布していた星の集合体を見ていることになるため、その広い空間に対応したより大きな速度分散を生まれながらにして持っていたという解釈が成り立つ。このように乱流階層説の立場では、星はその誕生の初期から現在と同程度の大きさの速度分散を持っていたということになるので、後天的な速度分散の獲得機構は一切必要ないことになる。

7. おわりに

以上見てきたように、太陽近傍の星の速度分散が年齢依存性をもっているという比較的古くから知られている事実に対して、後天説と先天説という2つの異なった立場からそれぞれ解釈が試みられてきた。そしてどちらの立場も観測をある程度定量的に説明しているという点では満足できるものであるように思われる。今までは2つの立場を正反対に位置するものとして述べてきたが、もちろん両者の中間的な立場をとることも可能で、現実も先天的な要素と後天的な要素が複雑にからみ合った状況になっているのかも知れない。星の速度分散の起源の問題は銀河自体の進化の問題とも密接なつながりを持っているし、また速度分散がどの程度の大きさであるかは、銀河円盤の安定性の問題や、密度波理論を通して銀河の姿態とも深く関連してくる。今回述べたような問題はそれ自身で閉じてしまうようなものではなく、他のいろいろな情報と考え合わせて初めて解決の糸口が見つかっていくような問題の1つであるように思う。

お知らせ

第16回日本アマチュア天文研究発表大会

日本アマチュア天文研究発表大会実行委員会

日時: 昭和58年10月23日(日) 9時~20時

会場: 川崎市民プラザ

〒213 川崎市高津区新作 1777

TEL 044-888-3131

発表希望者は8月30日までに概要を200字以内にまとめ、申込み用紙を同封して送付下さい。申込み用紙は事務局あて申し込んで下さい。

参加及び発表の申込み先

〒214 川崎市多摩区登戸新町 208

川崎天文同好会事務局 宛