

星間気体のモデル

海野和三郎*

1. 星間気体の空間分布

宇宙論では多くの場合、宇宙を均質な流体のように取扱う。しかし、望遠鏡で観測する宇宙では、大きな単位としての銀河系と小さな単位としての恒星が特に注目をひく存在であり、これらはあるいは集団となり、あるいは散在して、変化の多い様相を呈している。われわれの銀河系は渦巻星雲であるが、質量の大半は恒星によって占められ、星間気体は太陽近傍で約 15%、全体平均では約 2% を占めている。星間気体の分布は、扁平な円盤状を示す恒星の平均的分布よりもさらに一層扁平である。すなわち、星間気体のなす円盤は 50 万光年の半径に比し、厚みはその 1% の程度である。また、その密度は平均して水素原子 1 個/cm³ 程度であるが、渦巻の腕において幾分密である。同様な空間分布を示すものに若い恒星がある。これは恒星が星間気体から生まれることを裏付ける。このように銀河面への集中度の高い分布を示すものを種族 I と呼んでいる。星間気体は種族 I の典型である。ちなみに、種族 I と対称的な空間分布を示すものを種族 II と呼んでいる。種族 II の典型は球状星団で、それ自体が球状であるだけでなく、分布も銀河系を包む球状に近い空間になっている。

種族 I・II の存在は銀河気体の運動状態の歴史を示すものであろう。種族 II の起源である初期の銀河系では、乱流が激しく、そのエネルギーは系の重力エネルギーに匹敵していたものと考えられる。これに反し、現在は乱流もほとんどおさまり、星間気体は銀河面に静かに沈んでいる状態であるといえる。現在の星間乱流はその原因も別にあり、またその 10 km/sec 程度の速度は初期のものに比して 1 桁以上低いものである。

銀河系よりずつと尺度を小さくして、われわれの太陽系がある。ここでの種族 I は惑星であり、種族 II は黄道と大きな軌道傾斜をもつ彗星と対応させることができよう。しかし、星間気体と現在の惑星間空間気体とは必ずしも対応しない。太陽コロナから発する太陽風の存在は初期の惑星間気体を一掃してまい、現在では太陽風それ自体が惑星間気体をなしている。

2. 星間気体の電離

星間気体の物理状態、ひいてはその運動状態を大きく左右するものとして電離度がある。星間気体は水素を主

として、これにいくらかのヘリウムとほんのわずかの他の元素を混じたものからなっている。主成分である水素の電離の度合は、主として星の紫外輻射による光電離と、電離により生じた陽子と電子との再結合との釣り合いによってきまる。したがって、紫外輻射の豊富な高温星の周囲と再結合に時間のかかる低密度の空間では電離度が高い。

星間空間の一つの特徴は水素がほとんど電離した領域 (H II 領域) とほとんど中性原子でいる領域 (H I 領域) とが截然と区別できることである。星の発する電離輻射は星からの距離とともに減るほかに、中性水素による吸収で光学的厚さについて指数関数的に弱められる。光学的厚さとは単位体積中の吸収原子の数に吸収係数を乗じたものを光の行路について積分した量で、吸収の能力をあらわす。ところで、輻射強度が下がると、電離度が比例して下がるので、光学的厚さは距離の指数関数で増加する。つまり、水素の電離度の変化と、電離輻射強度の変化は加速度的に行なわれるので、H II 領域と H I 領域の転移は極めて薄い層でおこる。

理想化すると、恒星の周囲には球状の H II 領域ができることになり、この球をストリームグレン球と呼ぶ。ストリームグレン球の半径は星間気体密度と中心星の表面温度できまるが、特に後者に強く依存する。これは電離輻射強度は温度に敏感な関数だからである。

オリオン星雲のように星間気体密度の大きいところは恒星の誕生する場でもある。高温の若い星 (O 型星, B 型星) も集団的に存在する。これを O-アソシエーションなどと呼ぶが、その周囲の H II 領域は比較的密度も高く、電子の再結合に起因するバルマー線などの輝線を強く出し、いわゆる輝線星雲として観測される。このような H II 領域は同時に連続輻射も出し、特に電波領域で熱的電波源としてくわしい観測がなされている。周囲の星間気体はもちろん一様密度ではないので、特に密度の低いところは光学的に薄く、紫外輻射は外部の星間空間一般にもれだす。こうした輻射が銀河面内の一般的な星間空間の電離にあずかる。その結果、水素密度 0.1 個/cm³ 程度の空間はほとんど完全電離 (H II 領域) となり、10 個/cm³ 程度の星間雲はほとんど電離しない (H I 雲)。

3. 星間空間の温度

一般星間空間が H II 領域と H I 雲とに分かれるこ

* 東京大学理学部

W. Unno: Mechanical Properties of Interstellar Gas.

とについては理由がある。それはそれぞれの温度のきまり方が著しく異なるためである。H II 領域では、光電子の平均運動エネルギー（電離放射光子のエネルギーと電離ポテンシャルとの差）と再結合電子の平均運動エネルギーとの差が主な熱源であり、このエネルギーが電離酸素などの衝突励起や陽子との自由-自由遷移などで結局輻射として失われる。この加熱と冷却とはともに電子温度の関数であるが、両者がバランスする温度で平衡となる。このきまり方は温度に敏感なので、かなり密度や電離放射強度をかえてもあまり結果をかえず、約 10^4 K を与える。一方、H I 領域では、加熱機構としては星間雲どうしの衝突、低エネルギー宇宙線（超熱粒子）と水素の電離衝突などがあり、冷却機構としては酸素原子、炭素イオン、水素分子、星間塵など低い励起状態のレベルを持つものの励起にともなう輻射損失が考えられている。結果は平均約 100° K の温度を与える。

H II 領域と H I 領域との間の圧力のバランスは、温度に 10^2 の比があるので 0.1 個/cm³ と 10 個/cm³ との密度の比によって成り立つことになる。その中間の半電離の状態は熱的に不安定である。すなわち、膨張または収縮の小さな変動を与えると、陽子電子の再結合の速度が変わり、電離度も少し変化する。その結果、電離放射のさざぎりがかわり、電離度はさらに大きく変化する。そうすると、温度が変わり、圧力が変わるため、これがさらに膨張または収縮を加速する方向に働く。

4. 星間気体の密度と進化

銀河系の全質量 (10^{11} 太陽質量) の数%が星間気体であるとして、500 光年の厚みの銀河円盤に入れると密度は水素 1 個/cm³ 弱となる。同じ空間を 10 個/cm³ の H I 雲と 0.1 個/cm³ の H II 領域に分けると、全 H I 雲の占める体積は 1 割弱となる。このように、平均密度および H II 領域と H I 雲というモデルをきめている要素は、上述の熱不安定性以外では、星間気体の全質量と星間気体円盤の厚みである。円盤の半径は恒星の分布がきめるから別とする。したがって2つのパラメータについて考えることにする。

星間雲またはその複合体（大複合雲）が恒星誕生の場であるとし、その全体積に比例して恒星の形成があるとすると、銀河の進化につれてその全体積は指数関数的に減少するであろう。一旦恒星になっても白色矮星へ進化するまでに質量放出をするが、この影響は星間気体減少の時間尺度を長くすることになる。恒星形成の時間尺度を大星間雲の重力収縮時間 $(G\rho)^{-1/2}$ (G は重力定数、 ρ は密度)、すなわち 10^8 年程度とし、最終的に白色矮星に至る質量をもとの星間雲の $1/10$ とすると、全星間雲体積の半減時間は 10^9 年程度となるであろう。したがっ

て、他の条件が変わらなければ、その3倍あまりの時間前には、星間空間はすべて H I 領域であったということになる。しかし、実際には、星間空間の全体積は以前はもっと大であったと考えられるので、H II 領域と H I 雲という図式は、初期に銀河系内に恒星ができて以来成り立つものと考えてもよいであろう。

銀河面上の気体の厚みは、そこにある乱流圧と重力のバランスで定まる。老令の星ほど厚みのある空間分布を示しているのは、乱流の減衰の履歴をあらわしているものと考えられる。

5. 重力不安定性

密度一様で無限にひろがった気体は安定でない。いま、平均密度 ρ からの超過 $\delta\rho$ で大きさ l の摂動を与えてみる。温度 T を一定とすると、圧力勾配による復原力は $kT\delta\rho/l$ (k は気体定数) の程度で、重力は $\rho \times G\delta\rho l^2/l^2$ の程度であるから、両者は l が $l_J = (kT/G\rho)^{1/2}$ のとき釣り合う。この l_J が重力不安定性のジーンズ波長と呼ばれているものである。 $l > l_J$ であると重力が勝って収縮する。この結果、一様媒質は $M_J = \rho l_J^3 = (k^3 T^3 / G^3 \rho)^{1/2}$ 程度の質量のかたまりに割れることとなる。

M_J は H II 領域に対しては太陽質量の 10^8 倍、H I 領域に対しては 10^4 倍程度となる。H I 領域では密度が上がると温度が下がるという熱的条件を入れると M_J はさらに1桁近く下がるが、通常星間雲質量は太陽の数百倍程度であるから安定である。

M_J 以上の星間雲がたまたまできると、これは収縮してまもなく自由落下に近い状態となる。収縮が止められるのは、やがて密度の上昇で輻射の逃げ出しがおそくなるため、断熱的に内部の圧力が高まってからである。その過程の途中、 T があまり上らずに ρ が増すと M_J ははじめの値より下がるので、次々と破片に分裂することをくり返すことが可能であり、これが恒星形成にいたる機構であると考えられた。この考えを一步前進させて、無摂動状態を自由落下にとり、内部分裂を摂動として扱ってみると、自由落下は分裂を速める効果があることが知られた。いずれにしても、重力不安定性は恒星や星団の形成に欠かせぬ要因であると考えられる。

6. エネルギー密度

星間空間内のエネルギーは乱流運動、熱、磁場、宇宙線、星からの輻射、 3° K 宇宙輻射などの形で存在している。非常に特徴的なことは、これらのエネルギー密度が1桁くらいの範囲で 1 eV/cm³ くらいにそろっていることである。このうち最後の2つの輻射についてはかなり間接的でいわば偶然の一致といえるようであるが、前四

者の一致は相互作用によるものと考えられる。

十分に加速があれば乱流は音速をこえるが、もしそうになると衝撃波的になり熱への逸散がはげしくなるので、乱流エネルギーが熱エネルギーを大幅にこえることはおこらない。一方、乱流があると磁力線の引き延ばしがおこり、磁場エネルギーが乱流エネルギーと同程度に高められることが期待される。また、磁力線の乱れた運動はフェルミ加速などの宇宙線加速をなし、そのエネルギーをも同程度にする。もちろん、くわしい相互作用機構は星間空間の磁気乱流のモデルとともに今後の研究にまたぬばならないが、こうして一応定性的な説明が与えられる。この説明のもとには乱流の加速が要因として必要である。

7. 乱流の加速 I

星間空間の乱流は星間雲の運動で代表され、その速度は 10 km/sec 程度である。その運動エネルギーは約 10^7 年くらいでお互いに衝突する際にかかなりの部分が熱になるものとする、最低限それをおぎなう加速が必要である。加速機構の定説はないが、これまでにいくつかの考えが出されている。

1つはストリームグレン球の形成と関連のある説である。第2節では電離にともなう力学的効果については述べなかった。実際には、電離して温度が上がると圧力も高くなり周囲をおし出すことになる。高温度星が誕生し、近くの星間雲を電離するモデルを考えると、電離は星に照らされている側から進み、電離したプラズマは約 10^4 K に相当する熱運動の速度 (<10 km/sec) でロケットのように噴出して星間雲を加速する。このロケット機構はかなり有効であると考えられたが、実際には星間雲は孤立して存在するわけでなく、むしろ連続した媒質中でのストリームグレン球の進化を考える方が実際に近い。すなわち、電離のフロントが進行し、H II 領域が大きくなって行くモデルである。その理論は衝撃波の場合と同様に電離フロント前後で質量、運動量、エネルギーの保存を扱うことにより、フロントの速度、前後の圧力および密度の比を与える。結果は、電離放射強度と媒質密度との比により、フロントに強 R 型、弱 R 型、弱 D 型、強 D 型の4つの型があることが知られ、また、電離フロントのみでは解がなく、衝撃波を伴なうことが必然となる場合のあることも知られた。この理論はストリームグレン球の物理として重要であるが、加速機構として初め考えられたよりずっと能率が悪く不十分であるという結論が得られている。

その他の加速機構の主なものとしては、銀河回転をもとにするものと恒星と気体との相互作用を考えるものがある。銀河回転はケプラー運動のごとく、角速度が外

に向かって減少するから、銀河面上の各点でその周囲は相対的に回転運動をしていることになる。その回転自体が乱流の母要素となり、より小さい渦要素をつくって行くというモデルが考えられる。これは簡単なモデルだけに魅力があるが、乱流加速の能率としては要求より1桁くらいは不足しているようである。そのほか、磁場を媒介とした銀河回転をもとにする説がある、銀河回転により磁力線の巻き込みが積もり、磁場の強さがある限界をこえると、その乱れが銀河面に垂直の方向につき出すと考える。その乱れの回復が乱流エネルギーを増大せるとするわけである。しかし、銀河磁場の構造がこの説に都合のよいようになっていることについては、最近の銀河渦巻の形成の理論からみても、疑問がある。

8. 乱流の加速 II. 恒星と気体の力学的相互作用

太陽はその近傍の平均との間に相対的に約 20 km/sec の特有運動をもっている。これは恒星の特有運動としては大きい方ではないが、それでも H II 領域の音速 (<10 km/sec) を大きくこえている。したがって、恒星は通常後方に開いた双曲面状の衝撃波をしたがえて星間空間を走っているものと考えられる。この波の発生は、一方では恒星の運動エネルギーうばい、他方その分を星間空間におくりこむことになるが、この機構は、恒星の断面積で星間気体を掃くと考える限り大した影響を与えない。さらに、星が重力でもって星間気体をひきつけ、その中を走る効果を入れると、有効断面積がずっと大きくなったことになるが、それでもまだ必要な乱流加速には何桁も足りない。

恒星風(太陽では太陽風)はこの気体の引きつけの逆の機構であるが、恒星の周囲の密度を高め、星間気体との力学的相互作用を強める上では同様に働く。しかも、コロナが存在する条件(例えば対流層で音波が発生してエネルギーを外へ送る)のもとでは、うすい星間気体を引きつける付着作用よりは、恒星風の方がはるかに高い密度を周囲につくる。低温度巨星で期待される強力な恒星風を仮定して、その乱流加速の有効性をあたってみると、有望のようである。さらに定量的な研究がなされる必要があろう。

上の付着作用の議論は単独星についてであった。重力は遠隔力であるので、 N 個の星が同じ動きをする場合には、付着の効率 N^2 で増加する。したがって、星の集団運動は大きな影響を星間気体に及ぼすことが期待される。実際、超音速の星流と気体の系をプラズマ物理的に取扱った研究があるが、結果はすべての波長の平面波が重力不安定性を示すことが明らかにされた。これは乱流の励起を意味するものと解されるので、集団運動効果は乱流加速に大きな働きをするものと考えられる。た

だ、理論は実際とことなり、無限空間に一樣な完全に系統的な運動をする理想的な星流を仮定しているの、実際では定量的にどれくらい効果があるものがいまだ明らかでない。

9. 銀河の渦巻

最後に星間気体の最も大局的な特徴である渦巻構造について付言する。これについては、これまでに磁場の影響を主にして考える立場などいくつかの説が出されているが、最近、重力波説が提唱されて注目をひいている。

銀河系の重力ポテンシャルは銀河円盤と中心核部の星が大部分を背負っているが、これに渦巻き腕を摂動としてのでせて、それからくる重力ポテンシャルの摂動に対し、星間気体などがどのように反応するかを調べる。その結果、仮定した腕と同型のものでレスポンスとしてあらわれれば、その腕は自己保存的である。実際の計算の

結果はこの自己保存的な渦巻き腕の存在が示された。これは定常的な重力波と解することができる。この理論的結果は観測的な種々の特徴をよくあらわすので、現在のところ渦巻腕の説明として定説となりつつある。

10. むすび

以上、星間気体のモデルに関連して、多種多様な研究分野があることを簡単に紹介した。また、ここでは流体モデルとしての面を強調したので、とり上げなかった問題もかなりある。元来、天文学は極めてオープンな学問であるが、星間気体の問題に限っても、多くの分野の人に興味と関心をもってもらい、また自由に研究面にも入り込んで新しい面を研究するようになることが学問自体の性格として強く望まれている。また、このことが宇宙科学発展のエネルギー源でもあると信じている。

銀河系および銀河系外星雲の光とガス量

横 尾 武 夫*

はじめに

銀河系および銀河系外星雲の中では、星間ガスから絶えず新しい星が生まれ出て、その星々は各々の進化の道をたどっている。これらの星雲の寿命の大部分を通じて、その体積が変わるといような、大規模な物質の分布変化がない場合を考えると、恒星とガスの大集団としての銀河系および銀河系外星雲の進化の様子が、恒星の進化理論を応用して、ある程度、追跡できるのではないだろうか。

銀河系および銀河系外星雲が、前に述べたように、力学的に定常であるかどうかは、依然、大きな問題であるが、現在までに、パーピッジ夫妻等の努力によって集積

された、多くの銀河系外星雲 (galaxy—以下単に星雲といっておく) の内部運動の観測的研究から、一応、ほとんどの星雲が力学的に定常であると考えてもよいことがわかっている。われわれの銀河系についても、同様である。特に、エッゲン達 (1962) の準矮星の運動学的研究にもとづいた推定によれば、われわれの銀河系が現在のよな質量分布をとったのは、その誕生から 10^8 年以内、すなわち銀河系の年齢の最初の 100 分の 1 においてであろうとされている。

そのような立場から、ガスと星の集合として特徴づけられるこれら星雲の総合的な物理量を見ると、そこには進化の様子をさぐる手だてがあるように思える。第 1 表

第 1 表 銀河系外星雲の形態分類と物理量 (ホルムベルク, 1964)

型	絶対写真等級 M_{pg}	色指数 $B-V$	質量 $\log M$	中性水素量 M_H/M
Irr I	-17.3	0.12	9.0	37 %
S _c	-19.8	0.22	10.2	20
S _b	-21.0	0.41	11.1	3.2
S _a	-20.6	0.53	11.2	1.3
S ₀ , E	-19.6	0.77	11.3	(0.2)

* 大阪教育大学

T. Yokoo: The Lights and Gas Masses of Galaxies.

絶対写真等級および色指数は星間吸収を補正したもの。

質量は太陽質量単位。