

氏名・(本籍)	吉 井 讓
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 6 6 1 号
学位授与年月日	昭 和 5 5 年 3 月 2 5 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 天文学専攻
学位論文題目	Effect of Accretion on Stellar Surface Metal Abundances (質量降着による星の表面金属量への影響)
論文審査委員	(主査) 教 授 高 窪 啓 弥 教 授 菊 池 定 衛 門 教 授 高 橋 真 一

論 文 目 次

Summary

Chapter I. Star Formation in the Primordial Composition

1. Introduction
2. Thermal Evolution and Stability of a Gas Cloud
 - 2.1 Basic Equations
 - 2.2 Physical Processes
3. Numerical Results
 - 3.1 Evolutionary Paths in the T-N Diagram
 - 3.2 Thermally Unstable Regions in the T-N Diagram

- 3.3 Thermal Stability of Evolutionary Paths
- 4. Mass Range of the First-Generation Stars
- 5. Discussion
- Chapter II. Effect of Accretion on Stellar Surface Metal Abundances
 - 1. Introduction
 - 2. Assumptions and Model Construction
 - 2.1 Accretion Rate
 - 2.2 Relative Velocity between a Star and a Gas Cloud
 - 2.3 Cloud Model
 - 2.4 Treatment of the Initial Contraction Phase of the Galaxy
 - 3. Mass Accreted on an Orbiting Star
 - 4. Enrichment of Stellar Surface Metal Abundances
 - 5. G-Dwarf Problem with a Constant Rate of Accretion
 - 6. Conclusions
- Acknowledgment
- References.

論文内容要旨

膨張宇宙論において現在広く受け入れられている宇宙進化模型では水素の再結合期以前にヘリウムより重い元素を合成することができず、銀河の進化を論ずる際に重元素の起源をどこに求めるかということが常に理論上の問題になっている。従来の銀河進化論では原始銀河雲が 2×10^8 年という短い時間尺度で重力崩壊し、巨大星の形成進化を伴う激しい活動期を経て銀河が形成されたため、星としての寿命の短い巨大星内部で合成した重元素が空間を一律に汚染したとする説が支配的であった。しかしながら最近において、銀河収縮は 3×10^9 年という長い時間にわたる準静的過程で進行したと仮定しないと諸々の観測的事実が説明不可能になると同時に、銀河初期に巨大星形成期を想定すると観測される金属欠乏星の化学組成と矛盾する結果になることが指摘されている。本論文はこのことをふまえ、従来とは違う立場からの銀河形成進化の筋書きを提出し、その妥当性を理論的かつ観測的見地から調べることを目的としている。第一章では水素の再結合以後の純粋水素期における星の形成の可能性と、その質量範囲を導びく。第二章では銀河初期に生まれた金属欠乏星がその後の銀河内軌道運動の際に高密度星間雲と遭遇することにより表面化学組成がどのように変わるのかを検討する。

第一章 銀河初期の化学組成をもつ星の形成

純粋水素期はガスの冷却剤として気相で形成される水素分子が考えられている。この場合ガス雲は約 500 度の等温収縮を続けるため、ガス雲内の密度ゆらぎは重力不安定で成長し、やがて分裂するか分裂雲自身が又重力的に不安定となり分裂が続くいわゆる Hoyle (1953) の継続分裂が進行する。この過程はガス温度が 2000 度を越して水素分子が水素原子と衝突解離し冷却剤として機能しなくなる時に終わる。しかし水素分子の解離に伴う熱不安定によって密度ゆらぎが増幅され最終的には自己重力で束縛された $1 - 10 M_{\odot}$ の局所凝縮体が形成されることがわかった。

水素分子が銀河初期における乱流散逸等によるガスの加熱の結果存在しない場合は一般にガスは冷却機構を欠いていると考えられていたが、水素原子と自由電子との衝突で $1 S \rightarrow 2 S$ の励起が 2 光子放出で熱エネルギー損欠に結びつき約 8000 度の等温収縮をするガス雲の進化が考えられることを示した。この進化は熱的には安定だが重力的に不安定であり継続分裂が起こる。分裂が最も効率よくおきるならば冷却放射が分裂雲に対して不透明になるとき継続分裂は $0.1 M_{\odot}$ の分裂雲を最後に終了する。分裂の効率が悪くとも $20 M_{\odot}$ 以上のガス雲は力学的平衡に達することができず星になることはない。故に水素分子を含まない水素ガス雲内で形成される星の質量は $0.1 - 20 M_{\odot}$ 程度と結論できる。

従って純粋水素期には水素分子の有無にかかわらず通常の低質量星も形成され、銀河内の平均

重元素量はそれらの星の星内合成物が超新星爆発を通じて空間に拡散し、時間と共に増加したと考えられる。

第二章 質量降着による星の表面金属量への影響

前章の安定性解析で形成可能な低質量の純粋水素星 ($Z = 0$) や金属欠乏星 ($Z \lesssim 10^{-4} Z_{\odot}$) が何故観測的に実証されないのかを星と星間雲との遭遇の際の質量降着による表面金属量変化に帰着できるかを検討する。質量降着率は Bondi (1952) の公式によると星と星間雲との相対速度の3乗に逆比例しているため軌道運動している星の誕生時から現在までの総降着量を評価するには銀河質量分布モデル内での星の運動と星間雲の運動が必要となる。星と星とによるエネルギー及び角運動量交換相互作用の時間尺度は銀河の年齢にも比するほど長いので、銀河収縮期は銀河の質量分布の時間的変化に応じて軌道も変化するが銀河収縮終了後は軌道は現在まで変わらない。これに対しガスは散逸的であり重力と銀河回転による遠心力が釣り合って微分回転をしており、ガス層は銀河円盤に沈澱して現在に至っている。星間雲は微分回転に乗った系で統計的に等方な無秩序運動をしていると仮定すると軌道離心率と箱型軌道傾斜角を与えることにより星の軌道に沿っての星間雲との相対速度を評価できる。

星は通常表面から恒星風が生じており、さらに星の周囲には水素の電離領域が存在している。そのため星に向っての降着ガス流が実現し降着物質が星の表面にまで達するにはある臨界値以上の密度をもつ星間雲との遭遇によってはじめて可能となる。相対速度が数 km s^{-1} かつ星間雲のガス温度が100度以下の低速遭遇のとき $n_H \geq 10^3 \text{ cm}^{-3}$ の高密度雲は上述の条件を満しており降着が実際に起こる。本論文では特徴的な高密度雲としてCO雲を採用した。しかしながら星の軌道は軌道離心率が大きければ太陽から遠く離れた領域も通過するため銀河の広い範囲にわたっての高密度雲の空間分布や物理状態を知る必要がある。観測は太陽からそう遠くない領域に限られているのでいくつかの仮定を導入せざるをえないが、最終的に降着率を良く見積るような一連の仮定を取ることにする。

以上星と星間雲との相対速度及び高密度雲の空間分布を考慮して、 3×10^5 年の銀河収縮を有する進化モデル内で降着効果がどれだけ期待できるかを調べた結果、軌道離心率又は箱型軌道傾斜角がそれぞれ増加するにつれ総降着量は星の運動に対して顕著な依存性を示して減少することがわかった。特に軌道運動が銀河円盤内にある場合、円軌道をもつ星には星の質量の約1%の質量降着が期待できる。この際遭遇する星間雲は時間と共に増加する銀河の平均的重元素量を持つため降着物質の化学組成は星の誕生時のガス雲の化学組成とは異っている。従って降着物質の化学組成の影響が星の表面に表われ、影響の度合は降着物質が混合される星の表面对流層の質量に対する降着量の比で表わすことが可能となる。主系列星の表面对流層の質量は誕生時の金属量が少いほど、又星の質量が大きいほど小さく、これらの星ほど降着による表面の金属汚染度は大きい。

例えば $5 \times 10^{-4} Z_{\odot}$ の金属量をもって生まれた $0.8 M_{\odot}$ の星は現在までに降着効果で円軌道ならば $0.3 Z_{\odot}$ の離心率が高くとも $10^{-2} Z_{\odot}$ 程の表面金属量を呈することになる。箱型軌道傾斜角が大ききとも $Z \geq 10^{-2} Z_{\odot}$ の表面金属量が期待できるが、この理由は銀河初期には星間雲の存在する領域が広がって 3×10^9 年でゆるやかに銀河円盤に向ってガスが沈澱していくため軌道傾斜角が大ききとも星間雲との遭遇確率が大きかったためである。

この降着の影響を観測的に確認できるか否かを調べるため進化段階が違う矮星と琴座 RR 型変光星についてその金属量と軌道離心率及び箱型軌道傾斜角との相関をみた。その結果矮星については明らかに理論的に求めた傾向と一致し、円軌道をもつ矮星の金属量は $Z \geq 0.3 Z_{\odot}$ に制限されている。しかし琴座 RR 型変光星は円軌道かつ $10^{-2} Z_{\odot}$ の金属欠乏星が存在し、矮星と異った分布をしている。恒星進化論によると琴座 RR 型変光星は主系列星が赤色巨星段階を経て質量を放出し形成されたと考えられている。星が主系列を離れると表面对流層は星の質量の 10% 程度まで成長することにより表面と内部の金属量が異なると表面金属量は大きく希薄化される。この希薄化の度合は表面と内部で金属量が大きく異っているほど大きいため、降着量が最大となる円軌道の星に最もこの効果が顕著となる。従って琴座 RR 型変光星で円軌道かつ金属欠乏の星は希薄化現象によるものと理解すれば降着効果で矮星と琴座 RR 型変光星の金属量と軌道運動との相関を同時に説明でき、降着の可能性が強く示唆されることになるだろう。

ところで銀河の化学進化論では一層理論模型は観測より多くの金属欠乏星を含んでしまい太陽近傍ではほぼ円軌道をもつ G 型矮星の金属量の下限值のみならず金属量についての積算個数もともに説明できないとして模型の本質的欠点が指摘されて久しい。このいわゆる G 型矮星問題に降着効果を考慮した一層模型を適応させると満足いく結果が得られ従来の模型のもつ欠点が除去されることを導びいた。この結論は銀河内で平均重元素が 3×10^9 年で増加するという仮定が本質であり、もっと短い時間尺度での増加率を仮定すると降着効果をもってしても G 型矮星問題は解決されない。

論文審査の結果の要旨

恒星の化学組成は銀河系の歴史を通じて理解されるべきものであり、通説によれば、宇宙初期の物質は重い元素を含まず、以後恒星内部で合成された重元素が星間媒質に混合し、それから新たに生れる恒星は重元素をより多く含むようになるという過程によって世代を重ね、現在に至ったものと考えられている。すると、宇宙初期に形成され、現在に至っているものがあれば、これは重元素を著しく欠いたものであるべきである。しかし、実際には、このような恒星は発見されていない。本論文は、この問題を新しい立場に立って解析し、ひとつの解釈を与えたものであり、二つの章からなっている。

先ず第一章では、宇宙初期に形成される恒星がどの程度の質量であり得るかを調べる。これには、ガス雲の収縮時における重力不安定・熱不安定の解析を要し、その際水素分子の存否が問題になるが、いずれにせよ、重元素量が極く僅かであっても、形成される恒星の質量は太陽質量と因子10の程度で一致し、銀河初期に大量の重元素を作るような大質量星が生ずることはなく、また宇宙初期の元素量をそのまま保った恒星が現在も存在すべきことが示される。

第二章は、現在このような重元素を欠く恒星が検出されないことの説明を試みたもので、本論文の主要部をなし、宇宙初期に形成され現在まで存続している恒星は、これまでの長期間に起った濃密星間雲との遭遇によってその表面に重元素を含む星間物質を降積し、この恒星の大気の化学組成は、内部のそれと異なり、現在見られるようなものになったと説明している。この解析に当っては、銀河初期より現在までの銀河系内物質の密度および速度の分布およびその経時変化の知識を必要とし、特に、銀河初期より銀河円盤形成期までの時間が問題になるが、著者は参考論文中で主張している「ゆるやかな銀河収縮」の立場をとり、他のパラメーターの値を控え目にとっても、この効果は充分大きく、観測を説明し幾つかの未解決であった問題に解答を与えることができることを示している。

以上、本論文は、星間物質の降着によって恒星大気の化学組成がかなり変化し得ることを明らかにし、古い星に見られた化学組成説明の困難を除去し、かつ銀河系初期の進化過程がゆるやかであったとする説のために一つの証拠を加えたものであって、銀河ならびに恒星の進化に関し興味深い新知見を与えたものとして評価し得るとともに、著者が自立して研究活動を行なうのに必要な高度の研究能力と学識を有するものであることを示すものである。よって吉井譲提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。