

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
大学院生研究
2003年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学	研究科	物理学	専攻
指導教員	所属・職名		氏名		
	理学部・専任講師		須佐 元 印		
自然・人文の別	<input type="checkbox"/> 自然	・ 人文	個人・共同の別	個人	・ <input type="checkbox"/> 共同 2名
研究課題	宇宙の第一世代星形成への磁場の影響				
研究代表者	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻・博士前期課程2年		牧 秀樹 印		
研究組織	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻・博士前期課程1年		内山 洋介		
研究期間	2003 年度				
研究経費	500 千円				

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

宇宙の初期に形成される第一世代星の質量は、宇宙再電離や重元素汚染といった宇宙進化を研究する上で重要な物理量の一つである。第一世代星が形成される過程において、その周囲には降着円盤が形成されると考えられている。したがって、第一世代星の質量を見積もるためには降着円盤における質量降着率が分からなければならない。質量降着率を決める物理機構としては主に磁気回転不安定性による乱流が有力である。また、磁気回転不安定性が有力に働くか否かは降着円盤上における磁場強度が鍵を握っている。そこで本研究では、第一世代星の質量として正しい知見を得るべく、第一世代星の降着円盤に持ち込まれる磁場の量について詳しく解析を行った。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[第一世代星形成] [磁場の散逸] [磁気回転不安定性(MRI)]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

宇宙誕生後、約 30 万年経ったとき、宇宙は完全電離状態から中性化し、光に対して晴れ上がる。その後宇宙はガスの密度揺らぎが成長し、銀河や星といった構造を形成していく。宇宙の晴れ上がり後の空間に存在するガスには、リチウムより重い元素や塵粒子といった物質が含まれていない。このようなガスを原始的なガスという。また、原始ガスから宇宙初期に形成される星のことを第一世代星という。そして、その第一世代星の質量は宇宙の再電離や重元素による汚染といった、宇宙がどのように進化してきたかを研究する上で重要な物理量として認識されている。

ガス雲から星となる過程においては、まずガス雲の中心にコアが形成され、その周囲にガスが取り残される。そして、取り残されたガスが中心コアに降着することで、光り輝く星へと進化していく。ガスが中心へ降着する際には、一般的にガス雲は角運動量を持っているため降着円盤が形成されると考えられている。したがって、物質の降着率は角運動量の輸送率に依存することになり、最終的に形成される第一世代星の質量を知るためには降着円盤における角運動量輸送がどのような物理メカニズムによって起きるのかを明らかにする必要がある。最近の現在の星形成領域に関する研究からは、降着円盤上における磁気回転不安定性(Magneto-Rotational Instability, 以下略して MRI と呼ぶ)によって生成される乱流が円盤の角運動量輸送に大きく寄与することが理解されてきている。このメカニズムが起こるか否かは円盤上に存在する磁場強度に依存しているが、第一世代星形成の研究においてその磁場強度の値は全く知られていない。

そこで本研究の目的は、第一世代星過程においてその周囲にできる降着円盤上における「初期」磁場強度を見積もるために、原始ガス雲の収縮過程においてその中心にどれだけの磁場を持ち込むことが可能かをガス雲中の磁場の散逸に注目し詳細に調べることである。そしてその結果として、第一世代星形成においてその周囲の降着円盤上に MRI が起きるか、つまり、角運動量を輸送することができるか否かについて議論し、第一世代星の質量を求めるときに必要な知見を得ることを目指す。

以上のような研究背景・動機のもとに行った研究の成果について簡潔に説明していく。

詳細は省くがガス雲中の磁場の散逸過程には主に 2 種類ある。一つはオーム損失と呼ばれるもので、もう一つは双極性分散と呼ばれるものである。これら 2 つの散逸過程がガス雲中でどの程度効いているかは、ガス雲中の電離度に強く依存する。したがって、本研究ではまず e, p, H, H⁺, H₂, H₂⁺, H₃⁺, D, D⁺, D⁺, HD, HD⁺, H₂D⁺, He, He⁺, He⁺⁺, HeH⁺, Li, Li⁺, Li⁺⁺, Li³⁺, Li⁻, LiH, LiH⁺といった原始ガス雲中に含まれる粒子の存在量を数値的にシミュレーションし、収縮する原始ガス雲中の電離度の進化を詳しく調べた。その際にガス雲に対して仮定した密度、温度の初期条件は、以下の 2 通りである。(A)密度:10³ cm⁻³、温度:250 K、(B)密度:10³ cm⁻³、温度:100 K。(A)の初期条件から収縮が始まる場合、その熱的進化の経路は大向氏(Omukai 2000, ApJ, 534, 809)によって詳細に調べられており、比熱比 $\gamma \sim 1.1$ で進化する事が示されている。また、初期条件が多少ずれた場合においてもこの進化経路へ繋がる事が過去の研究によって示されている。さらに最近の宇宙初期におけるガスの密度揺らぎの成長を追った 3 次元シミュレーションにおいてもこの進化経路に収束していくことが確かめられている。したがって、本研究で採用した(A)の初期条件は妥当なものである。一方で、そのような進化経路に繋がらない場合もある。それは、比較的重い母銀河が形成される際に起こりえる。そしてそのような場所ではガスが 10⁴ K まで過熱され、H₂分子形成が効率的となり、H₂が多量に形成される状況となっている。普通、HD 分子は原始ガス雲中では少数であるため、ガス雲全体の冷却に寄与することはなく H₂分子がその役割を担っている。しかし、H₂分子が多量に形成されるような状況においては、HD 分子も同様に多量に形成さえるため、HD 分子が冷却に寄与することが可能となる。そして、HD 分子による冷却は H₂分子による冷却よりも効率が良いため、ガス雲はより低温状態を保つようになり、(A)の初期条件から始まって $\gamma \sim 1.1$ で進化するような経路を辿らなくなるのである。(B)の初期条件はそのような初期条件を考慮にいたれた設定となっている。また、(A)、(B)両方のモデルにおいて原始ガス雲中に含まれる各粒子の初期の存在量としては、宇宙の晴れ上がりの時期から宇宙膨張による化学成分の進化を計算した研究があり、それを参考に赤方偏移 $z=20$ での値を採用した。また、以上の初期条件の下で計算を行う際には、上で挙げた 24 種の粒子に関係した 98 個の化学反応を非平衡で解いている。

では、電離度の進化の計算結果を、まずモデル(A)の場合について述べる。10¹¹cm⁻³以下の低密度では、電離度は主に陽子と電子との再結合により密度の増加と共に電離度は減少した。しかし、Li⁺は H⁺よりも再結合率が小さいために、密度が 10¹²cm⁻³に達すると電離度の減少はそこで止まり底を打つ結果となった。また、さらに密度が上がり約 10¹⁶cm⁻³を超えると、温度が非常に高くなるため衝突電離が卓越し、電離度は上昇していくことが分かった。本研究で得られた重要な結果の一つに、電離度は非常に小さな値となるが決してゼロではなく、最低値として約 10⁻¹²(完全電離の場合で 1 の値をとる)の値を持つことが分かったことである。モデル(B)の場合にもモデル(A)とほぼ同様の振る舞いをし、この場合においても Li によって電子が供給され、約 10⁻¹²の最低値を持つ結果となった。

研究成果の概要 つづき

本研究ではLiを含んだガス雲を考慮したが、これまでの他の第一世代星に関する研究においてLiはその存在量が少ないことから無視されてきた。そこで我々は、Liの重要性を示すためにLiを含まない場合についてもモデル(A)、(B)の両方において同様の計算を行った。その結果、モデル(A)の比較的高温(250 K)から収縮する場合にはLiを含む場合の結果とはさほど変わらず、電離度として 10^{-12} の最低値となった。しかしながら、モデル(B)の比較的低温(100 K)から収縮する場合、電離度の進化の振る舞いは大きく変化した。Liが存在する場合には密度が 10^{11}cm^{-3} 以上でも 10^{-12} の電離度を保っていたが、Liが存在しない場合には電離度は 10^{-12} より何桁も小さい値をとる結果となったのである。したがって、低温状態となるモデルを考える際には、Liの役割が大切であるといえる。このLiを考慮することの重要性は磁場の散逸を議論する際にも現れる。その事については後で再び触れる。

さて、以上示したような電離度の時間依存性の計算結果を用いて磁場の散逸について調べるわけであるが、それにはその他に情報も一つ必要で、ガス雲中に存在する磁場の強度を知らなければならない。だが残念なことに、我々が扱っている第一世代星が形成される領域にどの程度の磁場が存在しているのか、つまり、原始ガス雲が収縮し始める際、そこにどの程度の磁場が存在しているかは未だよく理解されていない問題である。したがって、収縮するガス雲中にどの程度の磁場が存在するのかを我々は知ることができない。そこで、我々の計算ではガス雲中に存在する磁場強度をパラメータとして扱っている。また、我々が採用した磁場の散逸を評価する手法は、現在の星形成領域の場合においてではあるが中野氏と梅林氏(Nakano & Umebayashi 1986, 218, 663)によって行われており、我々はそれを第一世代星形成に応用した形となっている。つまり、詳細は省くが、磁場の散逸の度合いを評価する手法は、磁場のガスに対する散逸速度 v_b を定式化し、それをガス雲の自由落下速度 u_{ff} と比較することで、磁場が原始ガス雲から散逸するのかわからないのかを調べるということを行っている。

では以下に、原始ガス雲の収縮過程における磁場の散逸の計算結果について説明する。モデル(A)でLiがある場合には、初期の磁場強度がガス雲の収縮を妨げてしまうような強度よりも弱ければ、収縮過程全体において磁場はガスから散逸しないことが分かった。この事は磁束が保存された状態で収縮が進み、密度の2/3乗に比例してガス雲中の磁場強度が増幅していくことを意味する。言い換えると、初期に存在した磁場を全て余すことなく星の中心に持ち込むことができるのである。さて、この結果を用いると降着円盤上でMRIが起きるために必要なガス雲が収縮し始める際の初期磁場強度を知ることができる。円盤上でMRIが起きるための条件は、円盤の密度がだいたい $10^{-9}\text{g}/\text{cm}^{-3}$ で 10^{-4}G 以上の磁場が存在することである。球対称なガス雲がパンケーキのように磁場に沿った方向に潰れたと仮定すると、円盤の密度 $10^{-9}\text{g}/\text{cm}^{-3}$ は球対称なガス雲の密度 10^{12}cm^{-3} に対応する。つまり、降着円盤上にMRIが発生するためには、原始ガス雲の密度が約 10^{12}cm^{-3} になった時点で、 10^{-4}G 以上の磁場がガス雲中に存在していることが条件となる。さらに上で述べたように、磁場はガスから散逸しないことが分かったので、原始ガス雲が収縮し始める際に存在すべき初期磁場強度はガス雲の密度が 10^3cm^{-3} で 10^{-10}G 以上ということが結論付けられる。

したがって本研究から結論できることをまとめると、仮に 10^3cm^{-3} で 10^{-10}G 以上の磁場が存在すれば降着円盤上でMRIは起き、角運動量を効果的に輸送され、物質が中心に落ち込むことが可能であろう。また逆に 10^3cm^{-3} で 10^{-10}G 以下であれば、MRIは起きず、角運動量を輸送し円盤から物質が中心に落ち込むためには、重力不安定などの別の物理メカニズムが必要であろう。また、初期磁場強度の値は未だよく理解されていないが、宇宙論的な観点からの磁場生成を基礎に初期磁場強度を求める研究はいくつか行われている。例えばその一つとして、QSOといった明るい天体からの輻射による力によって星間空間に電流が流れ、磁場が生成されるというモデルがある。これに従うと、原始ガス雲が収縮し始める初期密度 10^3cm^{-3} で約 10^{-8}G の磁場が生成される。この場合には、降着円盤にはMRIが発生しうる。一方、形成途中の銀河内におけるBiermannのバッテリー効果によって生成されるというモデルがあり、 10^3cm^{-3} で約 10^{-16}G の磁場が生成されることが示されている。したがって、この場合には降着円盤上にMRIは発生しないことになる。

上記の磁場がガスに強く結合し、ガスから散逸することはないという結論は、初期条件の違いにおけるモデル(B)、及びモデル(A)のLiが存在しない場合においても変わることはない。その理由は主に、電離度の進化の仕方が同じだったからである。したがって、モデル(B)でLiが存在しない場合には磁場の散逸の様子は大きく異なる結果となった。電離度が極端に小さくなりすぎるために、磁場は原始ガス雲の収縮過程においてガスから散逸してしまう結果となったのである。このことから、今まで他の研究においてLiは無視されてきたが、第一世代星の中心にどれだけの磁場を持ち込むことができるか、つまり第一世代星の質量を正しく評価するためには、Liの存在が重要で無視できないこと本研究によって理解された。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版者、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① 雑誌論文

- ・ Hideki Maki & Hajime Susa, "Dissipation of Magnetic Flux in Primordial Gas Clouds", *Astrophysical Journal* (2004年7月発行予定)

③ シンポジウム・公開講演会等

- ・ Joint Seminar Japan and Italy on Formation of the First Generation of Galaxies for the Observation Corroboration of Physical Scenarios (December 2003, Niigata University, Japan), "Dissipation of Magnetic Flux in Primordial Gas Clouds"
- ・ 京都大学基礎物理学研究所研究会 & 国立天文台研究会 2003年度天文・天体物理若手の会夏の学校, 2003年7月28日～8月1日, 休暇村岩手(岩手県岩手郡雫石町), 「宇宙の第一世代星形成における磁場の散逸」

④ その他

- ・ 日本天文学会2003年秋季年会, 「第一世代星形成における磁場の散逸」