

平成21年 5月 7日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2006～2008
課題番号：18740117
研究課題名（和文） 太陽近傍とは異なった環境下での星形成過程の理論的研究
研究課題名（英文） Theory of Star Formation in Different Environments
from the Solar Neighborhood
研究代表者
大向 一行 (OMUKAI KAZUYUKI)
国立天文台・理論研究部・助教
研究者番号：70390622

研究成果の概要：将来の大望遠鏡による観測の指針とすることを旨とし、形成期銀河の環境である低金属度ガス中での星形成過程を理論的に考察した。まずは重元素を全く含まない宇宙最初の星の形成過程を化学反応・輻射過程を取り組んだ三次元流体シミュレーションを用いて調べ、宇宙最初の星が太陽の100倍を超える巨大なものであったことを発見した。またこのような星が連星となり条件などについても考察した。次に第二世代以降の星形成の際に重要となる、微量の重元素の効果についても調べ、どの程度の重元素があれば太陽と同じく小さい星が生まれるのかを考察し、そのためには星間微粒子の存在が必要であることを見出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	300,000	3,400,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星形成、金属欠乏星、銀河形成、宇宙論

1. 研究開始当初の背景

宇宙における天体の形成史を物理過程の積み重ねとして理解することは、宇宙物理学の根本的な課題である。宇宙背景輻射をはじめとする観測により、すでに宇宙論パラメータならびに冷たい暗黒物質理論にもとづく構造形成理論はほぼ確立したといえる。近年の計算機の高速化により宇宙論的なスケール

での天体形成過程が実際に計算可能となり、銀河の種であるダークハローの形成まではほぼ解明されているといつてよい。一方で、それ以後の進化に関しては、理論的に未確定である。この原因は、宇宙初期の星形成過程にかんして予言能力のある理論が存在しないことにある。この状況の打破を目指して、ここ数年間、宇宙最初の星形成理論が盛んに

研究され、大きな進歩があった。たとえば、形成される星は非常に大質量であること、また周囲へのフィードバックがうまく星形成の効率が低くなることなどを明らかにした。しかしながら、これらの予言はいまだ定性的なものにとどまり、数値シミュレーションに信頼して取り入れることのできる定量的理論とはいえない。この原因は宇宙最初の星形成過程の観測が存在しないため、理論を観測的に検証不可能であることにある。この状況は次世代観測機器をもってしても改善は困難であると予想されている。

その一方で、長らく太陽近傍のものに限られていた星形成領域の観測的な研究は、我々の銀河系内の遠方領域のみならず、銀河系外にも急速に広がり始めた。既にマゼラン雲、M33といった近傍銀河中の巨大分子雲の構造は日本の「なんてん」望遠鏡をはじめとする観測により明らかにされ始めている。数年後にせまったアルマ望遠鏡ではさらに多くの近傍銀河内における星形成領域の原子・分子ガス雲の微細な構造をこれまで太陽近傍においてしか知られていなかったのと同程度まで分解して観測することができる。我々は、あと数年で、銀河系内、系外のさまざまな環境における星形成過程を目の当たりにすることができるのである。これら重元素量、輻射強度などが異なる環境での星形成過程の観測は初期宇宙の星形成研究の実験場といえてよい。

このような現状で、理論研究に早急に求められる課題は、数年後に確実に出てくると予想される結果の解釈、さらにどのような観測によって更なる進展が期待されるかといった提言をすることであるが、観測同様に星形成の理論も、太陽近傍の環境に対してのものがほとんどであり、異なった環境での場合に対する理論的な展開はあまりなかった。

2. 研究の目的

本課題では、まず太陽近傍とは異なる環境、とくに重元素が少なく、輻射強度が異なった環境下における星形成過程の理論的モデル化を行う。この結果とアルマ望遠鏡をはじめとする次世代観測機器を用いた観測との比較をつうじて環境の相違が星形成過程にあたえる影響を定量的に理解することを目指す。こうして構築した理論を外挿することにより、星形成過程を現在から宇宙初期に至る宇宙史の枠組みで考察する。最終的には、こうした理論を宇宙論的シミュレーションに組み込むことにより宇宙の誕生から現在までの天体の進化を解明することを目的とする。まずはマゼラン雲をはじめとする環境での熱的進化モデルを構築して、それを組み込んだ数値実験を行う。その結果をもちいてアルマ望遠鏡に観測の方向性を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

我々の太陽近傍とは異なった環境のもとの星形成雲の進化を調べるために、紫外線・宇宙線の強度、重元素量、ダスト量およびその性質、磁場の強度などのパラメータが異なる場合のガス雲の熱・化学進化モデルを構築する。重元素量が異なる場合に関して既存のモデルを改良することにより達成可能であると思われる。このモデルを用いて、与えられた星間の条件下において、星間媒質の物理的状态としてどのようなものが可能となるか、また収縮して星形成が可能な条件は何か、そして収縮する際の温度進化はどのようなものとなるかを解明する。とくに、観測されている銀河系内の遠方領域や系外銀河の物理状態をモデル化し、環境の相違が分子雲の性質、星形成過程に関して、どのような相違となって現れるかを予想し、観測結果と比較して検討する。次に得られた熱進化モデルを

流体計算と組み合わせることにより定量的な数値実験を行い、観測的性質を議論する。具体的には、星間雲が収縮して星形成に至る過程を、まずは1次元の流体計算と熱化学過程、輻射輸送を組み合わせた計算により解析する。次にこの結果をもとにして、各進化段階の観測的特性の予言を目指す。さらに、観測とより直接比較可能なように2, 3次元の数値実験へと順次計算を拡張していく計画である。

4. 研究成果

まずは重元素を含まない始原ガスからの星形成過程を宇宙論的な初期条件から始めて、化学・輻射といった素過程を詳細に取り扱いながら3次元流体計算を行うことにより宇宙最初の星のもととなる高密度コアの収縮過程を調べた。特に本課題の最終年度には、化学反応、輻射過程を取り組んだ3次元流体シミュレーションを行い、宇宙の初代星が100太陽質量を越える超大質量星となることを示した。

また、これら宇宙最初の星が連星となる場合はガンマ線バーストの親星となりうるなど重要であるので、初代星の連星形成の可能性についても調べ、初期の星形成雲が極めて小さな角運動量をもつ場合を除き、連星は普遍的に形成されることを明らかにした。

次に始原ガスからの星の形成の際に、どのくらいの大きさの磁場が存在すると、原始星ジェットを引き起こすのか、その値を定量的に示した。

微量の重元素がある場合の星形成に関しても研究を行った。星形成を行う高密度コアが収縮する際の温度進化は、多様な流体现象の原因となり重要である。これまでの低重元素量ガスの熱進化の解析では、星間ダストの性質として、現在の星間媒質中のもの（AGB星起源）と同じものを仮定してきたが、宇

宙初期では超新星起源のダストが主となるため、よくない仮定である。そこで、我々は宇宙初代星の超新星から形成されたダストのモデルを用いて、そのようなダストを含む気体の熱進化を調べた。その結果、AGB星起源のダストよりも少量でも輻射冷却、分子形成といった過程に重要となることがわかった。さらにダストによる冷却が起こる際に、高密度コアが分裂する条件に関しても流体計算を行うことで調べた。これにより、わずか（太陽の10万分の1程度）な重元素量でも、その多くがダストに凝縮している場合には低質量星形成が可能であることが見出された。

さらに一様モデルによる熱進化の計算結果を用いて、星形成コアの分裂過程について、3次元流体シミュレーションを用いて解析し、各金属量においてガス雲が分裂にいたる質量スケールを計算した。特に、どの程度の重元素があれば低質量星形成が可能になるのかという問題に関して議論し、小質量ガス塊の形成にはダストの存在が本質的であることを指摘した。

これら宇宙初期の大質量星は当面観測が不可能であり、そのため理論の検証は困難である。そこで、観測との比較が可能な近傍の星形成領域における大質量星形成過程についてもモデル化を行い数十太陽質量の原始星の降着進化過程およびその観測的性質を調べ、このような大質量星の形成が可能となる降着率範囲を見出した。加えて、銀河形成時に星と同時に誕生すると思われる超大質量ブラックホール形成過程についても考察した。代表的な形成シナリオの一つである、強い輻射場中での単一ガス雲収縮過程が機能する為には、僅かの星間微粒子も存在してはいけないことを見出した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① T. Hosokawa, & K. Omukai (2009)
” Evolution of Massive Protostars with High Accretion Rates”
The Astrophysical Journal, 691, 823-846, 査読有
- ② K. Omukai, R. Schneider, & Z. Haiman (2008)
” Can Supermassive Black Holes Form in the Metal-Enriched High-redshift Protogalaxies?”
The Astrophysical Journal, 686, 801-814, 査読有
- ③ N. Yoshida, K. Omukai, & L. Hernquist (2008)
” Protostar Formation in the Early Universe”
Science, 321, 669-671, 査読有
- ④ M. N. Machida, K. Omukai, T. Matsumoto, & S. Inutsuka (2008)
” Conditions for the Formation of First-Star Binaries”
The Astrophysical Journal, 677, 813-827, 査読有
- ⑤ T. Tsuribe & K. Omukai (2008)
” Physical Mechanism for the Intermediate Characteristic Stellar Mass in the Extremely Metal-Poor Environments”
The Astrophysical Journal, 676, L45-48, 査読有
- ⑥ N. Yoshida, K. Omukai, & L. Hernquist, (2007)
” Formation of Massive Primordial Stars in a Reionized Gas”
The Astrophysical Journal, 667, L117-L120, 査読有
- ⑦ S. Inoue, K. Omukai, & B. Ciardi (2007)
” The radio to infrared emission of very high redshift gamma-ray bursts: probing early star formation through molecular and atomic absorption lines”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 380, 1715-1728, 査読有
- ⑧ T. Tsuribe, & K. Omukai (2006)
”Dust-cooling--induced Fragmentation of Low-metallicity Clouds”
The Astrophysical Journal, 642, L61-L64, 査読有
- ⑨ R. Schneider, K. Omukai, A. K. Inoue, & A. Ferrara (2006)
”Fragmentation of star-forming clouds enriched with the first dust”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 369, 1437-1444, 査読有
- ⑩ M. N. Machida, K. Omukai, T. Matsumoto, & S. Inutsuka (2006)
” The First Jets in the Universe: Protostellar Jets from the First Stars”

The Astrophysical Journal, 647,
L1-L4, 査読有

- ⑪ N. Yoshida, K. Omukai, L.
Hernquist, & T. Abel (2006)
” Formation of Primordial Stars in
a Λ CDM Universe”
The Astrophysical Journal, 652,
6-25, 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① 大向一行
“Low-metallicity star formation: t
he characteristic mass and upper ma
ss limit”
IAUシンポジウム255: “Low-metallicit
y Star Formation”
2008年7月16日
於 Rapallo, Italy
- ② 大向一行
「低金属量星の形成」
日本天文学会2007年秋季年会
2007年9月28日
於 岐阜大学
- ③ 大向一行
“Zero-metallicity Protostar Format
ion”
会議 “Star Formation, Then and Now”
2007年8月13日
於 UC Santa Barbara, USA
- ④ 大向一行
“The formation of stars at very low
metallicity” 会議 “First Stars III”
2007年7月16日
於 Santa Fe, USA
- ⑤ 大向一行
“Radiative feedback from the first
stars and formation of the
second-generation stars”
会議 “HI Survival through Cosmic
Times”
2007年6月11日
於 Abbazia di Spineto, Italy

(1) 研究代表者
大向 一行 (OMUKAI KAZUYUKI)
国立天文台・理論研究部・助教
研究者番号: 70390622

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし