

学 位 論 文 題 名

Binary Star Formation and Mass Outflow
in the Molecular Cloud Cores

(分子雲コア内での連星形成過程とアウトフロー)

学位論文内容の要旨

星間分子雲から星への進化の過程を明らかにすることは、宇宙物理学にとって基本的かつ重要な問題である。近年の観測機器の発展により星形成領域において分子雲コアや原始星が数多く観測され、アウトフローなど星形成に付随する現象も詳細に調べられつつある。また、一般に恒星の70%以上は、連星または多重星であるといわれている。さらに、原始星の観測から星は若いほど連星である頻度が高いことも分かっている。従って星は単独星で誕生するよりも連星で誕生する方が一般的である。このように星形成を考える上では、単独星のみならず連星の形成過程こそ研究しなければならない。しかしながら分子雲コアから星に進化するまでの様子は、光学的に厚いガスに覆われているために直接内部を観測することは難しい。よって、分子雲コアから連星に向かう進化(分裂の過程)やその後のアウトフロー現象の原因もまだ明らかになっていない。このために、理論的または、数値シミュレーションによって星形成過程を理解することが必要である。特に分子雲の収縮過程では、ガスの磁場、回転の強さ、自己重力などが複雑に絡み合っているため、解析的に解くのは難しく、数値シミュレーションこそが有効である。現在までに単独星の形成過程に関しては多くの人々によって研究がなされてきた。しかしながら、連星の形成過程については、その計算の複雑さからあまり行われてきていない。特に磁場、回転の影響を考慮して、分子雲コアから直接連星形成の初期である分裂過程やアウトフローを追いかけた計算はほとんどされていない。

多重格子法を用いた3次元MHDシミュレーションにより本研究では、連星形成過程とそれに伴うアウトフロー現象を調べた。密度 10^2 cm^{-3} の分子雲からガスが収縮し、中心密度が約 10^{10} cm^{-3} を超えるとガスは光学的に厚くなり、断熱のコア(第一コア)を形成する。その後中心密度が約 10^{15} cm^{-3} 程度まで達する過程でアウトフロー現象が見出される。このように、分子雲コアの状態から星形成までを一貫して計算するためには、密度にして10桁以上、スケールにおいては1万倍以上も違う構造を取り扱わなければならない。このため、本研究では、空間分解能の低いグリッドで全体を覆いながら、細かいグリッドで星間雲中心部を覆うという多重格子法を用いて計算を実行した。計算の初期状態として、回転しながら平衡状態にある磁場星間分子雲に軸対称と非軸対称の揺らぎを加えて、その収縮の様子を調べた。圧力と密度の関係はポリトロプの関係を用いて、等温であったガスが 10^{10} cm^{-3} 以上で断熱的になるとした。また、

初期の分子雲コアが持つ非軸対称揺らぎの大きさ、磁場と回転の強さをパラメータとして51通りの計算を行った。

計算の結果以下の事が分かった。

(a) ガスが完全に球対称に収縮するのであれば分裂は起こらない。そのため非軸対称性が分子雲の収縮と共にどのように成長するのかを理解する必要がある。計算の結果、非軸対称性は収縮の初期にはほとんど成長しないことが分かった。円柱状であったガスが収縮し、十分に扁平な非常に薄いディスクを形成して初めて非軸対称性は成長を始める。このとき、ガスの扁平率 (z 軸と xy 平面の軸の長さの比) は初期の磁場と回転の強さに依存しており磁場、回転が強いほど早く扁平しディスクを作る。そのため初期に磁場、回転が強かった場合は、非軸対称性が早期から成長を始め等温段階の終わりにはバー状の構造を形成する。磁場、回転が弱い場合はディスク (後にリング)、または小さなコアを形成する。

(b) 断熱コアが分裂するかどうかは、等温段階が終了するときの中心部の形状に強く依存する。扁平率が4:1以上であれば、その後、断熱コアは分裂する。しかしながら分裂片が相互に合体せずに連星になるかどうかは、等温段階終了の時点での軸比 (xy 平面上の長軸と短軸の比) によって異なる。軸比が2:1以下であるか、10:1以上であれば、分裂片は生き残り安定した連星へと進化する。それ以外の場合は、合体して単独星を形成する。よって安定な連星が出来るかどうかは、等温段階終了時の軸比と扁平率によって決定される。

(c) 分裂のパターンと角運動量の分配には異なる法則が存在する。断熱コアが分裂する場合は、軸比の大きさによってリング分裂とバー分裂に分類出来る。分裂の際、全体の角運動量は分裂後の軌道角運動量と自転角運動量に分配されるが、それは分裂のパターンによる。リング分裂では、ほとんどの角運動量が軌道角運動量に分配される。このため、自転角運動量は少なく、そのまま恒星になりやすい。バー分裂の場合は自転角運動量が軌道角運動量と同じかそれ以上に分配される。この場合は、自転の強さのために、磁力線を激しく巻き込み、非常に強いアウトフローが駆動される。このアウトフローによって自転角運動量は外部に輸送される。しかしながら、バー分裂の多くの場合、軌道角運動量が小さいために (自転角運動量に分配されるため)、分裂片は合体し、単独星へと進化する。

(d) 非軸対称のコアが出来た場合、アウトフローの形状は様々である。特に分裂が起こる場合は、バーまたは、リングの残骸から駆動される弱く広範囲のアウトフローと分裂片から駆動される強く狭い範囲のアウトフローの2層構造になる。

(e) 磁場が強いほど、角運動量輸送が大きく働き、同じ質量の断熱コアでも、初期の磁場が強いほど小さな角運動量を持った構造が形成される。

以上の結果から、断熱コアが分裂するのに必要な条件 (断熱コア形成後の軸比、扁平率、及び初期の磁場と回転の強さ) が求められ、分裂のパターンによって角運動量の分配が異なることが明らかになった。また、分裂後には2層構造のアウトフローが現れることが分かった。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本	正行
副査	教授	和田	宏
副査	教授	羽部	朝男
副査	助教授	兼子	昇
副査	教授	大西	明
副査	教授	富阪	幸治 (国立天文台理論天文学系)

学位論文題名

Binary Star Formation and Mass Outflow in the Molecular Cloud Cores

(分子雲コア内での連星形成過程とアウトフロー)

本論文の主題である星間雲からの恒星の形成は宇宙物理学において、銀河、銀河系等の形成と進化にかかわる基礎的な構成要素として重要な役割を担っている。恒星はガス雲の重力収縮によって生まれるが、近年の観測手段の発展によって、ガス雲中の分子雲コアや誕生したばかりの原始星などを伴う星形成領域が詳細に研究され、アウトフローなど星形成に付随すると考えられる現象が明らかになってきている。しかし、星形成過程そのものは、分子雲コアの重力収縮の時間尺度は短いため観測は難しく、また、光学的に厚くなると直接観測できなくなる。一般に恒星の多くは連星系をなしていることが知られているが、連星系の形成には、分子雲のもつ回転や磁場の役割が重要である考えられている。すなわち、重力収縮した分子雲コアの高密度領域がこれらの効果で分裂して連星系の形成にいたると考えられるが、この過程で、密度やスケールが大きく変化することになる。このため、解析的な扱いが困難であり、連星系の形成過程の理解には大規模な数値シミュレーションが不可欠な手段となっている。

著者は、回転と磁場を持つ分子雲コアが重力収縮して起きる連星系への分裂過程とそれに伴うアウトフローの発生を調べるために、多重格子法を用いた3次元電磁流体力学シミュレーションを行った。多重格子法は空間格子を階層化することによって、高密度領域の効率的な計算を可能とするものである。著者はこの多重格子法によって、水素の数密度が 10^2 cm^{-3} の希薄な分子雲から等温的に収縮し、やがて光学的に厚くなり断熱コアを形成し、それが分裂してアウトフロー現象が見いだされる 10^{15} cm^{-3} を超えるまで、密度で14桁以上、空間的なスケールとしては $1/10000$ にいたる過程を一貫して計算することを可能にした。これは、星形成領域の数値シミュレーションとしては、現段階の世界最高水準をいくものである。

数値シミュレーションでは、分子雲の初期状態とし、軸対称な回転円柱状の平行形状をとり、それに軸対称および最低次の非軸対称な摂動を与えて、分子雲の収縮・分裂とアウトフローの形成に至る過程を追跡し、非軸対称な摂動の大きさと磁場、回転の強さをパラメーターとして、連星系形成にいたる条件を調べた。その結果、以下のような描像をはじめて明らかにした。

1. 非軸対称モードの摂動の成長は、初期に円柱状であったガスが収縮し、十分に扁平な円盤の形成を俟って進行する。このとき、磁場、回転が強いほど早く扁平になり、その結果、非軸対称摂動の成長も早く、断熱コアの形成にいたる以前に、バー状の構造になる。これに対して、磁場、回転が弱い場合には、非軸対称モードが成長せず、ディスクまたは小さなコアを形成する。

2. 断熱コアの進化は、等温段階終了時の形状に依存し、扁平率が4:1以上になっている場合は、コアは分裂することができる。また、そのときの軸比が2:1と10:1の間である場合には、分裂片は生き残って安定な連星系を形成するが、それ以外の場合は、分裂片は合体して単一星になる。

3. 断熱コアの分裂は、軸比によって、リング分裂とバー分裂の2つの型がある。リング型の場合は、コアの持っている角運動量は殆ど軌道角運動量に配分され、自転の角運動量は少ないので、分裂片はそのまま恒星になりやすい。これに対し、バー型の場合は、より多くの角運動量が自転に分配されるため、軌道角運動量が小さく、多くの場合分裂片は再び合体することになる。

4. アウトフローの形状はさまざまであるが、円盤の広範囲から駆動される弱いものと、分裂片の自転による強く狭い範囲からのものがある。特に、バー型分裂の場合は、後者が強くなる傾向にある。

5. 初期磁場が強いほど、収縮過程で角運動量の輸送の効果が大きく、結果として、同じ質量の断熱コアでも、角運動量の小さい構造が形成される。

以上のように、著者の研究は、大規模な数値シミュレーションを実行して、磁場と角運動量とともに考慮して、分子雲コアの重力収縮に伴う連星系の形成およびアウトフローの発生にいたる過程をはじめて具体的に明らかにした。この研究は、宇宙物理学における基本的問題である星形成過程に新しい知見を加え、今後の発展方向への展望を与えることに大きく貢献するのである。

よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。