

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	木村 和貴
論文題目	Evolution of Circumstellar Disk and Protostellar Structure in the Primordial Star Formation (初代星形成における星周円盤および原始星構造の進化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>申請者は宇宙最初に形成されるいわゆる初代星の形成過程について、特に原始星誕生後の星自体とその周囲に形成される星周円盤の進化について理論的モデル化と数値シミュレーションを組み合わせる手法を用いて研究した。</p> <p>初代星はこれまでの理論研究により、ビッグバンから数億年後に誕生することが予想されている。初代星は最初にできる天体であるため、その後の宇宙の構造・天体形成を大きく左右する。この影響を考える上で、特に星の典型質量、あるいは形成時の質量分布が重要である。星形成の問題では、ガス雲の重力崩壊を可能にする冷却材が何であるかが最終的に誕生する星質量を左右する。初代星形成の典型的な場合(i)はH₂分子が主な冷却材となり、H₂分子が何らかのプロセスで破壊される稀なケース(ii)ではH原子が冷却材である。(i)の場合の星質量は10-100太陽質量、(ii)では~10⁵太陽質量と非常に大きい超大質量星形成につながると言われている。特に(ii)はビッグバンから10億年を経ずに存在する超巨大ブラックホールの起源となる可能性があり活発に研究が行われている。</p> <p>上記の(i)(ii)のどちらの場合でも、ガス雲中に誕生する原始星は当初質量が非常に小さいため、最終的な星質量は、どれだけのガスが原始星に降着するかが決定する。ガスには構造形成時に獲得した角運動量があるため、星に直接降着せずに星周円盤が形成される。星質量が大きくなると星光度は急激に増加するため、場合によっては星からの放射が円盤を破壊して降着を止める場合がある。従って、原始星と円盤の進化は本来切り離せない問題であり、お互いが相互作用しながら共進化する系と言える。申請者の研究はこの観点から以下の2つの研究を行った。</p> <p>[I] 星周円盤の非定常降着モデルと円盤分裂</p> <p>(i)(ii)のどちらの場合でも原始星誕生からその周囲にガス円盤が成長していく様子が数値シミュレーションで広く調査されているが、円盤は形成後の早い段階から重力不安定のために激しく分裂することが報告されている。分裂片が円盤中で長く生き残れば誕生する星は単独ではなく連星や多重星系になる可能性があるため、その理解は重要である。なぜこれほど早く一般に分裂が起こるのか、シミュレーション結果をうまく解釈するための半解析的モデル研究も行われているが、限られた理解しか得られていない。</p> <p>そこで、申請者は新しく空間1次元の非定常円盤モデルを構築し、早期円盤分裂に至る進化で鍵となる振る舞いが何であるかを調べた。特に、ガス雲から円盤へのガス供給、円盤から中心星への降着を独立して取り扱い、円盤成長のより現実的なモデル化を可能にした。結果として、ガス雲から円盤へのガス供給は円盤が外側へ拡大することに相当量が使われることを示した。この結果、円盤を通じた星への降着率はガス雲から円盤への供給率に比べて大幅に小さくなるため、早期段階で円盤質量が星質</p>			

量に比べて急増し、大質量の円盤形成につながる事が分かった。さらにこれに加えて、原始星形成とガス円盤成長の3次元高分解能数値シミュレーションも自身で行い、1次元円盤モデルとの比較も行った。数値シミュレーションの設定と合わせた円盤モデルを構築すると、円盤モデルは数値シミュレーションの振る舞いを非常によく再現し、やはり中心星質量を上回る大質量円盤が早期に出現することが分かった。広く発生する早期の円盤分裂には、前提としてこの大質量円盤の形成が鍵になっていることを指摘した。

[II] 原始星内部を分解した3次元輻射流体シミュレーション

最終的に誕生する初代星の質量を決定するには、原始星のまわりの円盤形成と円盤を通じた原始星へのガス降着を長期間($\sim 10^5$ 年程度)追跡する必要がある、実際そうした数値シミュレーションはこれまでも行われてきた。しかし、この手の計算には限界があり、それは計算コストを抑えるために原始星内部とごく近傍を直接解かず計算領域から外していることである。星の内部構造進化は別に1次元のいわゆる星の進化計算を行い、その結果をモデルとして組み込む。しかし、より現実的には原始星内部と近傍でも3次元的な進化が起こるはずであり、様々な仮定を課した1次元計算を用いる妥当性は十分に検証されてこなかった。

そこで、降着する原始星の内部構造進化を3次元で追跡するための放射流体計算コードを独自に開発し、急速ガス降着が起こる(ii)のケースで星質量が ~ 10 太陽質量に達するまでの進化を計算した。この場合、星の進化計算では星半径が数千太陽半径にもなる原始星が予想されていたが、3次元計算でこうした大きく膨張した星が実際に出現することを初めて示した。現実的な乱流場を付加すれば、星はケプラー速度の0.4倍以上の高速回転を伴い、赤道方向により膨らんだオブレート形状を持つことも分かった。赤道方向には星周円盤が発現しつつあることも示した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

宇宙初代星の誕生過程の研究は、星の典型質量と質量分布を明らかにすることを中心課題として最近も活発に進展している分野である。このためには原始星へ星周円盤を通じた質量降着が起こる時期の研究が必要になるが、申請者の研究もこの方向性に沿ったものである。

論文構成は大きく分けて[I]星周円盤の1次元非定常モデル化、[II]降着原始星内部を解く3次元放射流体計算、の2つのトピックに分かれている。[I]はこれまでの数値シミュレーションで示されていた円盤の重力不安定による分裂過程を解釈するためのより簡便なモデル構築、[II]はこれまでのシミュレーションではほぼ扱われてこなかった原始星内部やそのごく近傍を直接分解する3次元計算に初めて取り組んだもの、という位置づけである。

[I]の研究は、円盤進化の解析的モデル化をするだけでなく自身でも3次元数値シミュレーションを行って両者を比較し、モデルの妥当性を検証しているところに特色がある。中心星に比べて大質量の円盤が早期に出現するという結論だが、このような進化が起こるのはガス雲から円盤へのガス供給率のうち、円盤自体の成長に回る割合が高いことが原因になっている。申請者は独自に解析的な考察を展開し、この割合を表す式を導出して諸条件にあまりよらずこの値が大きくなることも示している。数値シミュレーションで見られる進化を解釈するための有用な解析的な枠組みを構築したと言えるだろう。

[II]の研究は、降着原始星の内部構造進化を3次元計算する先駆的な研究であり、殆ど前例のない問題に独自開発したコードを適用して取り組んでいる。降着する原始星進化計算には単純化した1次元の星進化計算以上のモデル化がなかなか進んでいない、というのは初代星形成に留まらず現在の宇宙における星形成研究でも同様の状況にある。申請者の研究では降着率の非常に大きな初代星形成の(ii)のモードを扱い、大半径の大質量原始星が3次元でも出現することを初めて示している。星内部構造を解きつつその周囲に円盤が成長していく様子も見え始めており、こうした計算は前例がない。今後、より長期進化を追跡して原始星と円盤共進化の研究を開拓する道筋を開いたことにも価値がある。

以上まとめると、申請者の研究は最近活発に進展する分野において先駆的な仕事を行ったものであり、その意義は十分評価できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認めた。また、令和5年7月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降