

氏名	加藤 一輝
学位の種類	博士 ( 理学 )
学位記番号	博 甲 第 8933 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Dynamics of the cusp-to-core transformation in less massive galaxies and formation of the ultra-diffuse galaxies (低質量銀河におけるカスプ-コア遷移の力学過程と ultra-diffuse galaxy の形成)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	大須賀 健
副査	筑波大学教授	理学博士	梅村 雅之
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	森 正夫
副査	筑波大学准教授	博士(物理学)	矢島 秀伸
副査	滋賀大学教授	理学博士	穂積 俊輔

## 論 文 の 要 旨

本論文は、ダークマターが自己重力によって集積して形成された「ダークマターハロー」の密度分布が、理論計算と観測結果で食い違うという問題を解決するため、ダークマター粒子の運動を数値シミュレーションによって調べたものである。超新星爆発等によって引き起こされる星間ガスの密度分布の変化が、重力ポテンシャルの変化を通じてダークマターハローの密度分布を変え(stellar feedback)、観測結果と無矛盾なダークマター分布へと進化する様子が示された。同時に、その主たる原因が、星間ガスが作り出す重力ポテンシャルの変化とダークマター粒子の運動の共鳴であると論じられている。

本論文は全5章で構成されている。第1章では過去の研究を紹介しつつ、本論文の主たる目的について述べられている。ダークマターの存在を示す歴史的発見の紹介を皮切りに、ダークマターハローの密度分布が理論計算と観測結果で矛盾するという所謂「カスプ-コア問題」が示されている。ダークマターハローの中心近傍での密度分布が、理論計算では急勾配(カスプ)となるものの、近傍の矮小銀河の観測ではおよそ平坦な密度分布(コア)となっていることが大きな問題であるとされている。それを解決するために先んじて行われた研究がレビューされると同時に、stellar feedback を簡易的にモデル化してその物理メカニズムを明確にするという本論文の目的が述べられている。加えて、本論文の結果の重要な応用例の一つである Ultra diffuse galaxies (UDGs) についての紹介も行われている。

第2章では、大規模な数値シミュレーションの前段階として、線形解析による計算結果が示されている。

Stellar feedback による重力ポテンシャルの変化が、ダークマターの密度分布にどのような変化を及ぼすのかについて線形解析によって考察すると同時に、数値計算の結果との比較がなされている。

第3章では、大規模な数値シミュレーションを高精度で実行するための self-consistent field (SCF)法について解説されている。SCF 法は過去の計算法と比較し、高精度でしかも高速に重力を計算することが可能という優れた性質があり、これがダークマターハローの中心領域での重力をより正確に解く必要のある本研究において威力を発揮することが述べられている。また、SCF 法を実装した数値計算コードが、スーパーコンピュータ Oakforest-PACS で高い計算性能を発揮することも証明されている。

第4章では、SCF 法を実装した数値計算コードを用いて行われた大規模な数値シミュレーションの結果が示されている。Stellar feedback モデルを特徴づけるパラメータは、振動する星間ガス分布の総質量、半径(振幅に対応)の最小値と最大値、周期、そして周期関数の形状であることが説明され、それぞれの効果を調べるために多数のモデル計算を行うことが述べられている。最初に stellar feedback の関数形状による影響が調べられている。比較的急激に重力ポテンシャルが変化するモデルでは、カスプを持つダークマターハローの密度分布が、カスプを持たないコア形状に時間進化することが示された。一方、比較的なめらかに重力ポテンシャルが変化するモデルでは、中心近傍に比較的高密度な領域(バンプ)が残存すると述べられている。モデルによって密度分布は異なるものの、stellar feedback によってダークマターハローのカスプが消滅し、コア構造へと遷移(カスプ→コア遷移)することが示された。次に、stellar feedback モデルの半径依存性についての調査結果が示されている。カスプ→コア遷移において、半径の最大値がある程度大きくないと、カスプ→コア遷移が起こらないと結論付けられている。引き続き総質量の大小によるカスプ→コア遷移への影響が調べられ、比較的総質量が小さくてもカスプ構造からコア構造への変化が生じることが示されている。Stellar feedback によるカスプ→コア遷移は先行研究でも示されているが、そこでは観測と比較すると少々大き過ぎる総質量を採用しており、より現実的な状況であってもカスプ→コア遷移が起こることを示すことに成功したと述べられている。その後で、Stellar feedback model の周期が長いと、生成されるコア半径が大きくなることが示されている。

この第4章では、カスプ→コア遷移の原因についても調査されている。その結果、Stellar feedback による星間ガスの重力ポテンシャルの振動とダークマター粒子の運動の共鳴が原因であると結論付けられている。先行研究では基本波の効果が主に議論されていたが、ダークマターハロー中心部では高調波が重要な役割を果たすことが新たな発見として述べられている。幾つかの代表的なダークマター粒子に着目した詳細な解析も行われ、stellar feedback によって eccentricity が増大しながら中心領域から外縁方向へと移動する様子が明らかにされている。最後に、本研究のカスプ→コア遷移で得られた密度分布が、およそ定常状態であることが確認されている。

第5章では、stellar feedback によるダークマターハローの密度分布の変化に加え、新たに星の分布の変化も計算している。幾つかのモデル計算の結果、ダークマターハローのカスプ→コア遷移と同時に星の密度分布も比較的平坦で広がった構造となることが示された。結果として得られた星の分布を観測と比較したところ、広がり具合の指標である half-light radius も表面密度分布の指標である Sérsic index も観測と矛盾しないことが示された。より強力な stellar feedback によって diffuse な構造が形成されることが判明したことから、矮小銀河と UDGs の分岐が stellar feedback の強弱の違いによって引き起こされた可能性がある」と指摘されている。

第4章と第5章の最後に短いまとめがあり、また、本論文の内容に関連する基礎知識が appendix で解説されている。

## 審 査 の 要 旨

### 〔批評〕

本論文では、星間ガスが超新星爆発等によって広がり、その後輻射冷却によるエネルギー損失で中心部へ集積するという準周期的な現象をモデル化(stellar feedback モデル)し、それによる重力ポテンシャルの変化が引き起こすダークマターハローの密度分布の進化を、数値シミュレーションを駆使して調べている。計算の結果、この stellar feedback がカスプコア遷移を引き起こし、これにより理論と観測との矛盾が解決可能であることを示すことに成功した。

類似の先行研究はあるものの、新たな計算法をシミュレーションコードに実装し、より現実的なパラメータを採用してもなおカスプコア遷移が生じることを実証したことの意義は大きい。また、その物理メカニズムが先行研究で示されていた重力ポテンシャルの振動とダークマター粒子の運動との共鳴であることを確認した上で、基本波だけでなく高調波が重要な役割を担うことを示したことは重要と認められる。

極めて単純化された stellar feedback モデルを採用することでその物理メカニズムを明確にすることに成功した反面、この単純化が結果にどのように影響しているかについては今後の研究が望まれる。また、ダークマターハローの密度分布をはじめ、一部の観測事実との比較は行っているが、本研究で採用したモデルパラメータの妥当性や、本研究で予想される UDGs の形成プロセス等に関しては、観測とのさらなる比較調査が必要と思われる。

いくつかの課題が残されてはいるものの、stellar feedback によってカスプコア遷移が引き起こされることと、その原因が共鳴、特に高調波の影響が大きいことを示したことは、カスプコア問題に関する重要な結果であり、天体形成史の解明にもつながる大きな成果と認められる。

### 〔最終試験結果〕

平成31年2月12日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。