

論文の内容の要旨

High-Resolution Simulations of Small-Scale Structures of Dark Matter Halos (高分解能シミュレーションによる ダークマターハローの微細構造の研究)

石山 智明

冷たい暗黒物質 (CDM) モデルは、宇宙の構造形成過程の標準的なモデルと考えられている。このモデルに従うと、宇宙の構造形成は初めに小さい構造が形成し、それらが合体して大きい構造へと至るといった階層的なものである。

CDM モデルは、宇宙の大規模構造のような銀河より大きい構造を非常によく再現する一方、それより小さい構造の記述において、少なからず未解決問題が残されている。例えば、銀河スケールハローにおいて、CDM モデルが予言するサブハローの個数が、銀河系における矮小銀河の数に比べ、桁違いに多いという矮小銀河問題などが存在する。このような小さな構造の非線形成長を追うためには、宇宙論的 N 体シミュレーションが非常に有用である。しかし、こういった構造の大部分は大きい構造の中に付随するものとして存在するため、考慮すべき質量・空間スケールが非常に幅広い。したがって高分解能の宇宙論的 N 体シミュレーションが必要不可欠である。

一方、ダークマター粒子の正体そのものも依然不明である。ひとつの有力な候補として、超対称性粒子、ニュートラリーノが挙げられる。ダークマター粒子がニュートラリーノであれば、最小のダークマターハローは地球質量程度になると考えられる。このマイクロハローが現在まで生き残っていると、ダークマター対消滅によるガンマ線の主なソースになるが、生き残るかどうかにについては論争があった。生き残るかどうかは構造、特に中心密度による

が、従来のシミュレーションでは分解能が不足してははっきりした結論が得られていなかった。したがって、高分解能シミュレーションによって解決すべき問題として残されている。

本博士論文ではまずはじめに、大規模シミュレーションのために新しく開発した超並列宇宙論的 N 体シミュレーションコード "GreeM" について述べる。そして小スケールの代表的な未解決問題のひとつである "矮小銀河問題" と、地球質量のダークマターマイクロハローの構造に関する研究結果について述べる。以下それぞれの概要を記述する。

GreeM : Massively Parallel TreePM Code for Large Cosmological N -body Simulations

私は超並列宇宙論的 N 体シミュレーションコード "GreeM" を開発した。このコードは相互作用重力計算のアルゴリズムに TreePM 法を、並列化の際の領域分割に再帰的多段分割法を用いており、PC クラスタや、国立天文台の Cray-XT4 のような超並列計算機において非常に効率よく動作する。ロードバランスの調整に新しい手法を使うことで、1024 コア以上を使っても負荷の不均一による損失を 5% 以下にした。これにより、高い並列化効率を実現した。報告されている並列 TreePM コードの殆どでは 256 コア程度以下で既に負荷の不均一が 10% を超えており、1024 コアでは効率が大きく低下していた。また、測定した重力相互作用の演算能力は、Cray-XT4 の 1CPU コア、1 秒あたりおよそ 50000 粒子であった。

Variation of the Subhalo Abundance in Dark Matter Halos

次に、宇宙の構造形成の未解決問題の一つである矮小銀河問題に着目した。我々の銀河系においては、マゼラン雲をはじめ十数個の矮小銀河が発見されている。一方 CDM モデルに基づいた銀河スケールハローの構造形成シミュレーションを行うと、ハロー内部のサブハローの個数が観測される矮小銀河の数に比べ、桁違いに多くなるということが報告されている。これが矮小銀河問題である。

これまでに提案されている解決案には、矮小銀河として観測されているものは質量の大きいサブハローに対応し、小さいサブハローでは星形成を誘発するのに十分なガスを集められず、矮小銀河として観測されないはずであるというものがある。また宇宙再電離により小さいサブハロー内部のガスが暖められ、星形成が抑制されたというものもある。この 2 つをはじめ、多くの解決案が提案されているが、確固たるものとして広く受け入れられているものはない。

従来の研究は 1 つ、または数個のハローにおけるサブハロー分布を見ていた。これは多くのハローを比較できるような広い領域におけるハロー形成を高解像度で追うのは、非常に計算時間がかかるからである。しかし、これらの結果には、ハローを選択するというバイアス

と、サンプル数が少ないことによる統計的誤差が含まれている。したがって、ハローによるサブハロー分布の違いを考慮しておらず、それがどの程度か検証することは最重要課題の一つである。

そこで本博士論文においては、広い領域の構造形成を高分解能の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて追い、銀河スケールハローでのサブハロー分布を調べた。シミュレーションは Λ CDM モデルを用い、およそ 46.48Mpc 立方の領域を 40 億個のダークマター粒子で表現した。この規模の領域では我々のシミュレーションの分解能は、我々の知る限り世界最高である。計算には国立天文台の Cray-XT4 の 2048CPU コアを用い、およそ 280 時間を費やした。そして $z = 0$ のスナップショットから全ての銀河スケールのハローを 68 個、巨大銀河スケールのハロー 57 個を無バイアスに取り出し、その中のサブハロー分布を調べた。

その結果、サブハローの個数はハロー毎に大きく異なることがわかった。一番多いハローに対して 10 分の 1 程度しかサブハローを持たないハローも存在する。サブハローが少ないハローは中心集中度が高く、形成が早いといった特徴がある。これはハローの形成史がサブハローの数と関係しているためと考えられる。また質量の小さいハローほどサブハローの数の分布の分散が大きく、局所銀河群と比較して 2 倍程度しか多くないハローも存在した。つまり、局所銀河群の衛星銀河の数とシミュレーションでのサブハローの数は、従来言われていた数十倍ではなく、せいぜい 2 倍程度と考えられる。残る 2 倍程度の差については、バリオンによる物理過程が一定の役割を果たしている可能性がある。

Gamma-ray Signal from Earth-mass Dark Matter Microhalos

次に、地球質量マイクロハローの構造を高分解能の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて調べた。その結果マイクロハローの密度構造は外側から中心まで -1.5 乗のカスプであることがわかった。これは従来考えられていた -1 乗程度のカスプとは大きく異なる。これらマイクロハローは恒星による近接遭遇を経験しても、中心が $\sim 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ と高密度であるために、銀河系の大部分で、ほとんど破壊されることなく生き残る。ハローの外縁部は削られるが、マイクロハローのガンマ線光度にはほとんど影響しない。

このようなマイクロハローは、銀河全体に銀河ハローのダークマター分布と同じように分布する。結果として、銀河ハロー自身よりも対消滅によるガンマ線光度が大きくなり、ブーストファクターは太陽近傍で約 20、銀河全体で約 1000 にもなる。太陽近傍のマイクロハローは中心部の視角が Fermi の分解能と同程度であるため、大きな固有運動を持った明るい点状のガンマ線源として観測されると考えられる。また銀河中心付近のマイクロハローは、ミリ秒パルサーと近接遭遇をし、摂動を与える。この摂動によるパルサータイミングのずれは 10 年間で、 $\sim 5\text{ns}$ と見積もられ、ずれは特徴的な形を持つため、PPTA 等で観測されると考えられる。