

Structure Formation in Warm Dark Matter Universe

東京大学 宇宙理論研究室 修士課程2年 黒川拓真

目次

1. 構造形成の標準モデル

- 1.1 Λ CDMモデル
- 1.2 Λ CDMモデルの問題点

2. Warm Dark Matter

- 2.1 Λ Warm Dark Matterモデル
- 2.2 理論的&観測的制限

3. 理論的アプローチ

- 3.1 N体シミュレーション
- 3.2 Cold Dark Matter vs. Warm Dark Matter
 - Mass function
 - 密度プロファイル
 - Concentration parameter
 - Halo shape

4. まとめ

1. 構造形成の標準モデル

宇宙の大規模構造

近年の観測によって、宇宙の銀河分布が明らかにされた。宇宙は銀河が密集して網の目状に連なった構造と、ほとんど銀河の存在しない巨大な空洞(ボイド)からなっている。これらの構造は宇宙の大規模構造と呼ばれている。

1.1 Λ CDMモデル

重力による構造形成

この大規模構造は、宇宙初期のわずかな密度ゆらぎが重力で成長することによって作られたと考えられている。重力源として最も重要なのは、宇宙全体で星やガスなどの通常の物質の数倍の量が存在するdark matterである。

無衝突減衰

dark matterは重力以外の相互作用が非常に弱いが、大きな速度分散を持っているとその自由運動のスケール以下のゆらぎを減衰させてしまい、構造形成を抑制する(*)。これを無衝突減衰という。無衝突減衰の無視できるものはCold Dark Matter、無視できないものはHot Dark Matterと呼ばれる。

Dark matterの候補として、既知の粒子ではニュートリノがまず考えられる。しかしニュートリノはHot Dark Matterであり、もしニュートリノがdark matterの主要な成分だとすると銀河団以上のスケールのゆらぎすら減衰させてしまう。これでは現在の宇宙のような構造はできない。

こういった理由から、dark matterはcoldであるというのが標準的な理論となっている。

Λ CDMモデル

上で述べた無衝突減衰の無視できるdark matter=Cold Dark Matter(CDM)に、宇宙の加速膨張の効果(宇宙定数 Λ)を加えた

Λ Cold Dark Matter(Λ CDM)モデルが構造形成の標準モデルとなっている。

(*)速度分散が大きいほど、ゆらぎが減衰するスケール=カットオフスケールも大きくなる。基本的に粒子の質量が軽いほど速度分散は大きい。

1. 構造形成の標準モデル

ΛCDMモデルの成功

ΛCDMモデルに基づく理論的なアプローチは、主にN体シミュレーションが用いられる。これは、コンピュータによって(“N個の”) dark matter間の重力を直接するもので、相互作用としては重力だけを考える非常にシンプルなものである。しかしながら、その結果は大スケールで観測と非常に良く一致する。これにより、ΛCDMモデルは標準モデルとしての地位が確かなものになった。

1.2 ΛCDMモデルの問題点

Small scale crisis

大スケールでは非常に良く観測と一致するΛCDMモデルだが、小スケール(銀河スケール以下)においては、観測との不一致が指摘されている。これから述べるような小スケールにおける問題は、small scale crisisと呼ばれている。

Missing satellite problem

銀河系近傍(局所銀河群)には、**数十**の矮小銀河(衛星銀河)が存在する。しかしΛCDMモデルのN体シミュレーションは、同様の範囲に**500**程度の矮小銀河質量のdark matter haloが存在すると予言している。

Cuspy halo problem

N体シミュレーションによると、dark matter haloの密度プロファイルは非常に鋭い(Cuspな)冪で中心ほど高密度になる。しかし、矮小銀河の回転曲線の観測から密度プロファイルを求めると、このような鋭い冪のプロファイルは見つからない。

大き過ぎる小スケールのゆらぎ

上述の問題は、いずれも小スケールのゆらぎが現実よりも大きくなり過ぎていることによっている。Cold dark matterは無衝突減衰が無いため、小スケールのゆらぎも大きく成長する。つまり、小スケールのゆらぎを抑える何らかの機構が存在するはずである。

2. Warm Dark Matter

ΛCDMモデルの修正

観測を説明できるようにΛCDMモデルを修正する場合、大スケールではΛCDMモデルと変わらず、小スケールのゆらぎだけを減衰させることが必要である。天体現象(超新星爆発、AGNなど)の効果といった様々な提案がなされているが、本研究ではΛCDMモデルに最小の修正を加えて観測を説明できないか議論する。

2.1 Λ Warm Dark Matterモデル

無衝突減衰

dark matterの性質でゆらぎを減衰させるものは、前述した無衝突減衰である。ニュートリノのようなHot Dark Matterは、無衝突減衰が強過ぎてダメであった。一方Cold Dark Matterは、無衝突減衰が無いために小スケールのゆらぎが成長し過ぎてしまう。

ではその中間ならどうか？理論と観測の不一致が問題になっているスケール以下のゆらぎの成長だけを抑えるdark matter = Warm Dark Matter (HotとColdの間だからWarm) を考えてみよう！というのが基本的なアイデアである。

2.2 理論的&観測的制限

ΛCDMに代わるΛWDM(Warm Dark Matter)モデルはどのようなモデルでなければならないか？

まず、理論的には大スケールでΛCDMモデルと等価であること、ΛCDMモデルの問題点(small scale crisis)を解決できるモデルであることだ。

そして、理論的に可能なモデルであれば最終的には観測によって制限される。ΛWDMモデルは、ΛCDMモデルに比べ構造形成を抑制するので、そこから制限がされる。詳細は次章移行で議論する。

3.理論的アプローチ

3.1 N体シミュレーション

Warm Dark Matterシミュレーション

構造形成の理論的予言は主にシミュレーションによって行われ

る。warm dark matterの場合、速度分散の効果を取り入れる必要があるが、一個一個のdark matter粒子の速度分散の効果を入れてシミュレーションするのは不可能である。そこでwarm dark matter(あるいはhot dark matter)の場合、無衝突減衰のゆらぎのカットオフスケール以下のゆらぎをカットした初期条件からシミュレーションを始めることで、無衝突減衰の効果を再現している。

計算コード

•Gadget-2

<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

BoxSize 100Mpc³

粒子数 512³(dark matterのみ)

Redshift $z = 99 \sim 0$

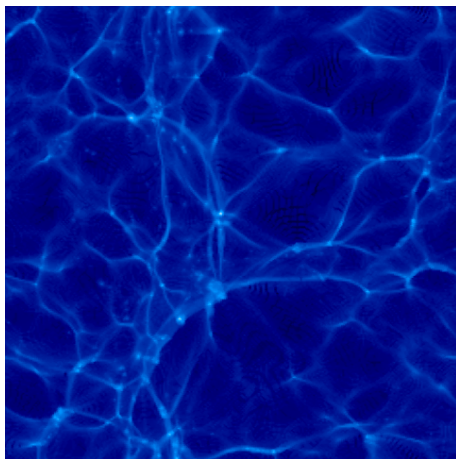
初期条件 WMAPのデータから初期密度ゆらぎを決定

境界条件 周期境界条件

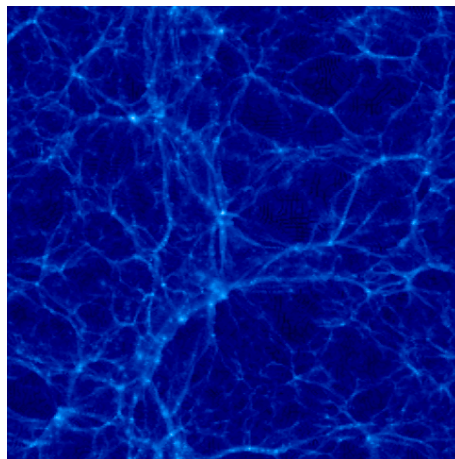
モデル Λ CDM, Λ WDM(mass = 0.25keV, 1.0keV)(*)

密度map

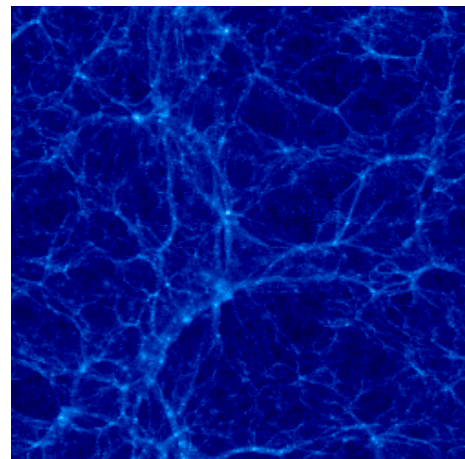
← 100Mpc →



0.25keV



1.0keV



Cold dark matter

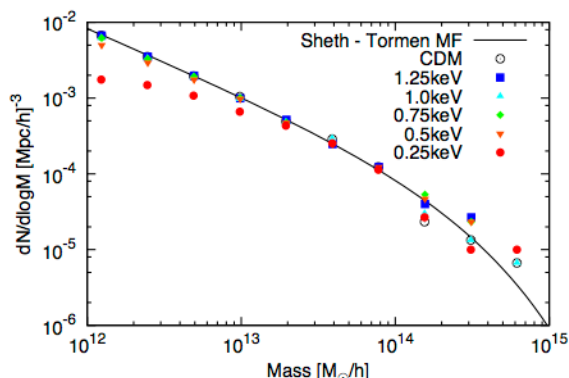
三次元密度分布を二次元に投影した図。質量の軽いdark matterほど小さな構造ができにくくなっている。1.0keVのWDMとCDMは、大スケールではほとんど見分けがつかない。

(*)対応するゆらぎのカットオフスケールは、0.25keV : ~ 1 Mpc, 1.0 keV : ~ 200 kpc

3.2 Cold Dark Matter vs. Warm Dark Matter

最終的な目標は、dark matterはcoldかwarmかを観測によって決定することである。しかし、モデルの前提として大スケールでは両者に差はほぼ無い。一方、小スケールでは非線形性や重力以外の効果が大きくなるので、単純なcoldかwarmかという議論は成り立たなくなる。そこで、できる限り大スケール(銀河～銀河団)で最もcoldとwarmの差が出る統計量は何かを調べる必要がある。

Mass function

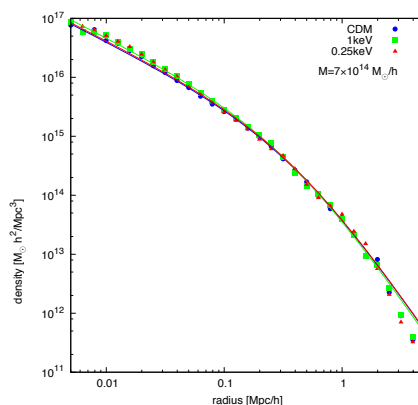
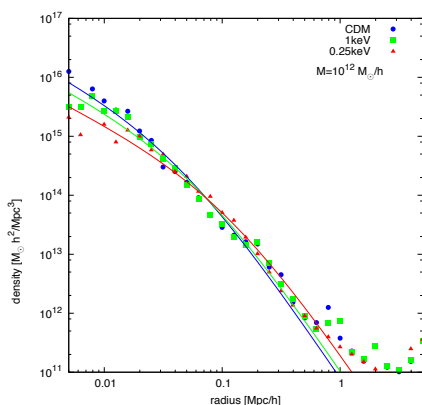


ある質量を持つdark matter haloの数密度。各色の点は異なるdark matterのモデルを表している。

大質量のhaloの数はどのモデルでも変わらず、質量の軽いdark matterでは小スケールに行くほど数密度が下がっている。実線はCDMの場合の理論式。

動径密度プロファイル

青がCDM、緑が1.0keVのWDM、赤は0.25keVのWDMをそれぞれ表す。



左図は銀河、右図は銀河団に相当する質量のdark matter haloの密度プロファイル。実線はNFWプロファイル。銀河団スケール(右図)ではcold warmの差は見え、銀河スケール(左図)のhaloの中心から10kpc程度で差が現れ始める。

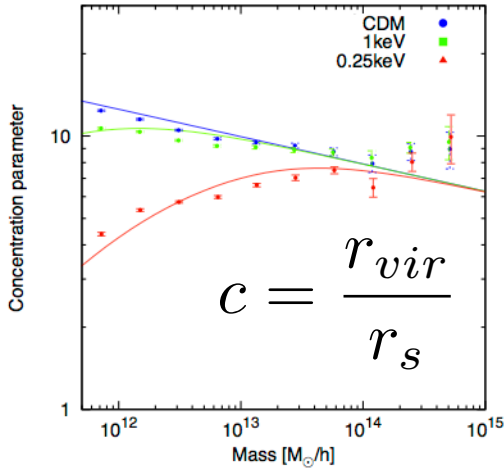
NFWプロファイル

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\delta}{r_s \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

δ は特徴的密度、 r_s はスケール半径。NFWプロファイルはN体シミュレーションから得られたフィット公式である。半径 r_s 付近で密度の冪が-1から-3へと変わる。

3.2 Cold Dark Matter vs. Warm Dark Matter

Concentration parameter



Concentration parameterはhaloを特徴づける量の一つである。前ページで見たように密度プロファイルは、ある半径 r_s で冪の値が変わる。Concentration parameterはこの冪が変化する半径を特徴づける量であり、その値が大きいほど中心に物質が集中している。

Concentration parameterは無衝突減衰の cutoffスケール(=質量)の影響が出やすく、1.0keVのモデルでも比較的大スケールでCDMとの差が見える可能性がある。

青がCDM、緑が1.0keVのWDM、赤は0.25keVのWDMをそれぞれ表す。実線はfitting公式。

r_s : NFWプロファイルのスケール半径

r_{vir} : ビリアル半径

まとめ

現在のところconcentration parameterが最もcold, warmの差が出やすい統計量である。重力レンズ観測から、Concentration parameterや密度プロファイルが測られれば、0.25keVのような極端なモデルは制限することができる。このような大規模構造から得られる制限はモデルの不定性が少なく信頼性が高い。

1.0keVのようなより現実的なモデルを区別するには、何か別の手法を考案するか将来の高精度な観測を待つことになるだろう。

4. まとめ

1. Λ CDMモデルは大スケールで非常に良く観測と一致する。
2. 小スケールではsmall scale crisisと呼ばれるいくつかの観測との不一致が存在する。
3. Warm Dark Matterの無衝突減衰によって Λ CDMモデルの問題点を解決できる可能性がある。
4. 問題を解決しうる可能性のあるdark matterの質量は $m_{WDM} \sim 1.0\text{keV}$ である。
5. 大規模構造の観測からは、不定性の少ない制限warm dark matterへの制限が得られる。将来より高精度な観測が行われれば、dark matterはcoldかwarmかが決定される可能性がある。