

現代宇宙論の未解決問題

目次

1. 宇宙論	1
1.1. ダークエネルギー	1
1.2. ダークマター	1
1.3. 原始ブラックホール(PBH)	2
1.4. ハッブルテンション (ハッブル定数の緊張)	4
1.5. S_8 テンション	5

1. 宇宙論

1.1. ダークエネルギー

2001 年に打ち上げられた WMAP や、2019 年に打ち上げられた Planck 衛星などにより、全天にわたり精密に宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background, CMB)が観測された。この観測により、現在の宇宙のエネルギー組成は

- ・ ダークエネルギー: 73%
- ・ ダークマター: 24%
- ・ バリオン: 4%

などと求められている。

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

の左辺第 3 項の Λ は宇宙定数と呼ばれるもので、宇宙の膨張に影響する。この宇宙定数は真空のエネルギーであり、ダークエネルギーに対応すると考えられている。現在の宇宙論で標準理論とみなされている Λ CDM 模型の Λ はこの宇宙定数である。

Planck 2015 の観測では真空エネルギー密度 ρ_{vac} は幾何学単位形で

$$\rho_{\text{vac}} = 2.5 \times 10^{-47} \text{GeV}^4 \quad (2)$$

である。これは非常に小さい値である。

一方、場の量子論から真空のエネルギー密度を求めると

$$\rho_{\text{vac}} = 10^9 \text{GeV}^4 \quad (3)$$

程度になり、実に 10^{56} 倍もの違いがある。

1.2. ダークマター

銀河では、中心から離れるほど星の密度が低くなる。そのため、もし銀河の質量が目に見える星だけで決まるのであれば、その回転速度は外側ほど遅くなるはずであ

る。しかし 1980 年代に、銀河の回転曲線が外側までほぼ水平であることが明らかになった。銀河系（地球が属する渦巻銀河）の場合は (Figure 1) を参照。この矛盾を説明するために、光では観測できない未知の質量、すなわち「ダークマター」が存在すると考えられるようになった。このダークマターの候補は多々あるが、そのどれが実際にダークマターであるのか決定的なことは何もわかっていない。候補としては

- ・ アクシオンおよびアクシオン様粒子 (Axion-like particle, ALP)
- ・ 原始ブラックホール (Primordial Black Hole, PBH)
- ・ WIMP (Weakly Interacting Massive Particle, 弱い相互作用だけをする重い粒子)
- ・ MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Object, 銀河ハロー内に存在する、恒星になりきれなかった褐色矮星や惑星など、光をほとんど発しない天体) などがある。

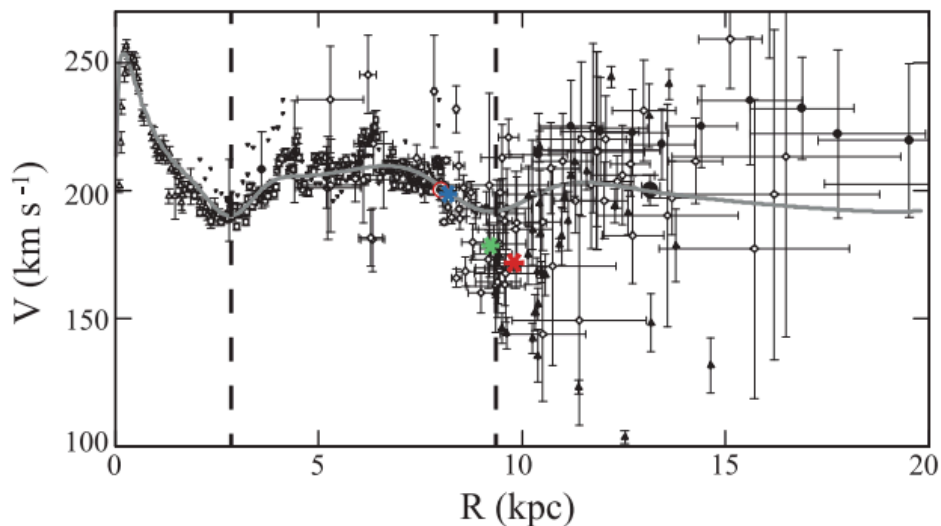


Figure 1: 銀河系（天の川銀河）の回転曲線。国立天文台 VERA プロジェクト。

1.3. 原始ブラックホール(PBH)

通常のブラックホールは、太陽の二十倍以上の質量を持った恒星がその寿命を終えた時に重力崩壊することで形成される。一方、原始ブラックホール(PBH)は、恒星が存在しないビッグバン直後の初期宇宙で形成されたと考えられているブラックホールである。これは宇宙には物質の分布の揺らぎが存在することで、特に密度の高かった領域が、自身の重力によって収縮し、ブラックホールを形成したと考えられている (Figure 2)。

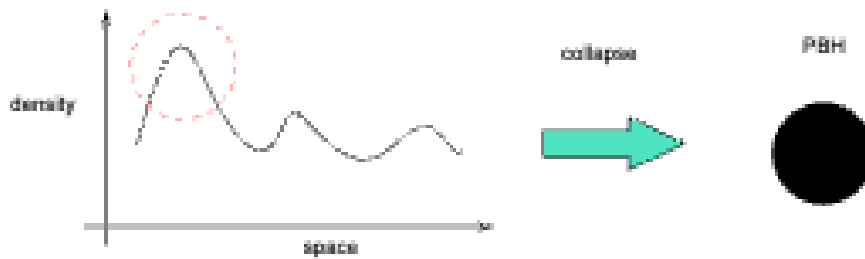


Figure 2: 密度揺らぎが大きいところが重力崩壊することで PBH が形成される。
質量 M はおよそハッブル体積内に含まれる物質の合計だと考えられるため

$$M \approx \frac{c^3}{G} t \approx 10^{15} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{s}} \right) \text{g} \quad (4)$$

と概算される。例えば、宇宙誕生後 10^{-43} 秒（プランク時間）に形成された PBH の質量は 10^{-5}g 程度、1 秒後に形成されれば太陽質量の 10^5 倍程度と、形成時期によって非常に幅広い質量を取りうる。

なお、PBH が実際に存在するという観測的証拠はなく、現状はあくまで理論的に存在しうる天体というだけに留まる。

しかし非バリオンでありコールドダークマターと同様の振る舞いをするため、ダークマター候補としての妥当性を巡っては議論があるものの、有力な候補の一つとして研究されている。

また 1974 年にホーキングが提唱したホーキング放射という、ブラックホールも放射を放ち蒸発していくという予言があるが、このホーキング放射という現象の観測的証拠を得る上でも、PBH は重要な役割を果たすと期待されている。ブラックホールの温度は質量の逆数に比例する。質量が 10^{15}g 程度の PBH は、理論上、今まさにその生涯を終え、蒸発（ホーキング放射）している最中であると考えられているため、PBH が見つければホーキング放射の実証も可能である。

PBH のダークマターとしての存在量の割合は多くの観測から上限が課されている (Figure 3)。例えばホーキング放射により周囲の物質が温められ、X 線を放射すると考えられるため、X 線背景放射の観測との比較から存在量の上限が与えられる。

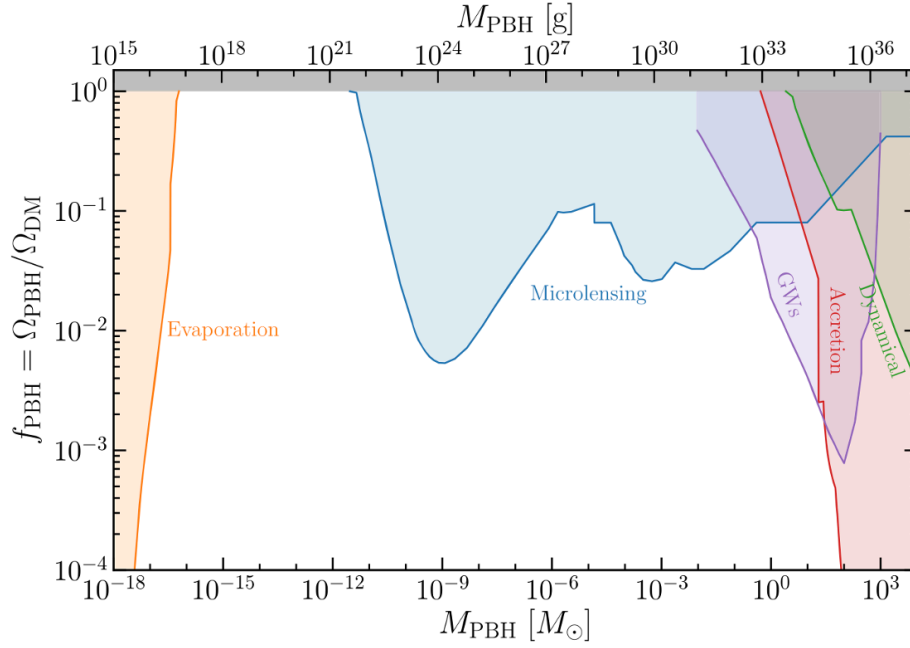


Figure 3: PBH の存在量の制限。

PBH は揺らぎの大きさが 1 程度、つまり密度が平均の二倍程度の時に形成される。しかし、CMB の観測から揺らぎの大きさは非常に小さく、 10^{-5} 程度と見られているため、すべてのスケールにおいて PBH が形成されるほど大きな揺らぎが存在することはできない。そこで、特定のスケールにおいて大きな揺らぎを生成するようなインフレーションモデルを考える（ウルTRASローロールインフレーション、複数場のインフレーション等）、PBH 形成に必要な揺らぎを小さくするモデルを考える、などの試みがなされている。

なお、私の研究室の先輩により単一場のインフレーションモデルでは観測と矛盾なく PBH を形成することは不可能であるという研究がなされた。次のプレスリリースがわかりやすいため、参照されたし。 (<https://www.ipmu.jp/ja/20240530-PBH>)

レビュー論文: <https://arxiv.org/abs/2002.12778>

1.4. ハッブルテンション (ハッブル定数の緊張)

ハッブル定数(H_0)は、宇宙の現在の膨張率を示す基本的な物理量である。物理的には、遠方の銀河が我々から遠ざかる速度と、その銀河までの距離との間の比例定数を表す。これはハッブル=ルメートルの法則 $v = H_0 d$ として知られ、 v が後退速度、 d が距離である。この定数の値が大きいほど、宇宙は速く膨張していることを意味し、宇宙の年齢は若くなる。逆に、値が小さいほど膨張は遅く、宇宙の年齢は長くなる。このように、 H_0 は宇宙のダイナミクスと進化の歴史を理解する上で根幹をなすパラメータである。

ハッブルテンションとは、異なる観測手法で得られたハッブル定数の値に統計的に有意な不一致が見られる問題のことを指す。具体的には、

- ・ 前期宇宙の観測: Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から予測される値は、 $H_0 = 67.4 \pm 0.5, \text{km/s/Mpc}$ である。これは、宇宙初期の物理状態と標準宇宙論モデル (ΛCDM モデル) に基づいて、現在の H_0 の値を「予測」したものである。
- ・ 後期宇宙の観測: SH0ES (Supernovae, H0, for the Equation of State of Dark Energy) チームによるセファイド変光星と Ia 型超新星の観測から「直接測定」された値は、 $H_0 = 73.0 \pm 1.0, \text{km/s/Mpc}$ である。これは、現在の宇宙で様々な天体の距離と後退速度を直接測ることで得られた値である。

この 2 つの値の差は統計的な誤差の範囲を超えており、5 シグマ程度の非常に高い有意性を持つ「テンション (緊張)」となっている。この不一致は、現在の標準宇宙論モデル (ΛCDM モデル) が不完全である可能性を示唆しており、新しい物理学の探求を促している。

レビュー論文: <https://arxiv.org/abs/2302.05709>

1.5. S_8 テンション

S_8 パラメータは、 $S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\frac{\Omega_m}{0.3}}$ と定義され、現在の宇宙における物質のゆらぎの振幅、すなわち構造形成の度合いを表す指標である。物理的には、 S_8 は宇宙の大規模構造 (銀河団や超銀河団など) がどれだけ物質がどれだけクラスター化 (集積) しているかを示す。 σ_8 は半径 $8h^{-1} \text{ Mpc}$ という特定のスケールにおける物質密度のゆらぎの大きさを表し、 Ω_m は宇宙全体のエネルギーのうち物質が占める割合を示す。 S_8 の値が大きいほど、物質はより強く集まっており、銀河団のような構造がより多く、またより密に形成されていることを意味する。逆に、 S_8 が小さいと、物質の分布がより一様であることになる。

S_8 テンションとは、ハッブルテンションと同様に、前期宇宙と後期宇宙の観測で得られた S_8 の値に不一致が見られる問題である。

- ・ 前期宇宙の観測: Planck 衛星による CMB の観測データと ΛCDM モデルから予測される値は、 $S_8 = 0.834 \pm 0.016$ である。これは CMB の微小な温度ゆらぎが、現在の宇宙でどれだけ構造成長したかを理論的に計算した結果である。
- ・ 後期宇宙の観測: Dark Energy Survey (DES) や KiDS (Kilo-Degree Survey) などのウィークレンズ効果 (遠方の銀河の像が手前の大規模構造の重力によって歪められる現象) の観測から得られる値は、これよりも小さい値 (例: DES Y3 では $S_8 = 0.776 \pm 0.017$) を示す傾向がある。ウィークレンズ効果は、現在の宇宙に存在する物質の分布を直接観測する手法である。

この不一致は、ハッブルテンションほど統計的に深刻ではないものの、3 シグマ程度の有意性があり、 ΛCDM モデルに対するもう一つの重要な挑戦と見なされている。これは、宇宙の構造形成の理論と観測の間に齟齬がある可能性を示唆している。