

宇宙の非一様性がダークエネルギーの状態方程式の測定結果に与える影響

根岸 宏行 (大阪市立大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙が一様等方と仮定した場合、ダークエネルギーの状態方程式については近年の観測より $w = -1.013_{-0.073}^{+0.068}$ と制限されている (ApJ 746, 85 (2012))。この観測結果は $w < -1$ の可能性を含むが、 $w < -1$ のダークエネルギーは dominant energy condition を破り、因果律を破るように振る舞う。 $w < -1$ という観測結果が確定した場合に因果律の問題を回避する方法として、一様等方宇宙モデルから非一様宇宙モデルへの変更が考えられる。宇宙の非一様性がダークエネルギーの状態方程式に与える影響を調べるために、宇宙定数と大スケールの非一様性がある非一様宇宙モデルを用いて、このモデル中で角径距離を計算し、一様等方宇宙モデルと比較することで宇宙の非一様性を決定した。

1 Introduction

宇宙は非常に複雑な対象であり、素粒子のスケールから宇宙の大規模構造にいたるまで様々なスケールの構造を含むが、宇宙の大局的な構造を調べる場合には細かな構造をすべて考慮する必要は無い。宇宙の大局的構造を知るには宇宙を理解する上で非常に重要である。しかし、宇宙の大局的な構造を知るには観測的制限が少ないため、作業仮説が必要となる。現代の宇宙論の標準宇宙モデルでは一般相対性理論が宇宙に適用できることと「我々は宇宙の中で特別な場所にいない」というコペルニクス原理を作業仮説として採用している。宇宙背景放射の観測より宇宙は等方であることが強く示唆されている。このこととコペルニクス原理を合わせると宇宙の大局的構造は一様等方と結論付けられる。超新星の距離-赤方偏移関係の観測より、宇宙が一様等方な場合、宇宙が加速膨張していることがわかった (ApJ.517:565-586,(1999))。この観測結果より、我々の宇宙には加速膨張を引き起こす物質であるダークエネルギーが満ちていることになる。ダークエネルギーの状態方程式 ($p = w\rho$) について、近年の観測より $w = -1.013_{-0.073}^{+0.068}$ と制限されている (ApJ 746, 85 (2012))。この観測結果は w が -1 より小さい可能性を示唆している。相対性理論が宇宙に適用できる場合、 w が -1 より小さいダークエネルギーは因果律が破れているように振る舞う。我々の宇宙で因果律を保つためには、異なる方法で観測を説明する必要がある。

本研究では、宇宙定数がある一様等方宇宙モデルが大スケールで一様等方からわずかにずれている場合に、非一様性が観測量に与える影響を調べた。すなわち、作業仮説として、我々の宇宙には一般相対性理論が適用できることを仮定した。コペルニクス原理を仮定しないので、我々の宇宙モデルは非一様であるが、宇宙背景放射の観測より、宇宙の等方性が強く示唆されているので我々の宇宙は球対称と仮定する。球対称宇宙モデルを (一様等方時空) + (球対称摂動) と表現し、物質はダストと宇宙定数のみと仮定する。球対称宇宙モデルを決定するために、球対称宇宙モデルと観測データの観測量が一致する条件を課した。本研究では簡単のために観測データの代わりに観測データを非常に良く説明する $w = -1.01$ のダークエネルギーが存在する一様等方宇宙モデルを用い、一様等方宇宙モデルと球対称宇宙モデルで観測量が一致する条件を課し、球対称宇宙モデルを決定した。観測量としては角径距離-赤方偏移関係を用いる。2つのモデルの角径距離-赤方偏移関係が一致する条件下で、光の軌跡を決める測地線方程式 (光は幾何光学近似で扱った) とアインシュタイン方程式を解くことにより、球対称宇宙モデルの非一様性を決定した。

2 Equation

一様等方な時空に球対称な摂動を加えた時空の計量はニュートンゲージで

$$ds^2 = -(1 + 2\psi(t, r))dt^2 + a^2(t)(1 - 2\psi(t, r))\gamma_{ij}dx^i dx^j \quad (1)$$

となる。観測と合うように球対称宇宙モデルを決定する。そのために観測と球対称宇宙モデルで観測量が一致することを要請する。本研究では観測量として角径距離-赤方偏移関係に注目する。簡単のため、観測から得られる観測量の代わりに、観測データを非常によく説明する一様等方宇宙モデルで計算された角径距離 d_A を用いて、球対称宇宙モデルの角径距離 $d_{A(s)}$ の z 依存性と一様等方宇宙モデルの角径距離 d_A の z 依存性が一致することを要請する。すなわち、

$$d_A(z, \Omega_d, w) = d_{A(s)}(z) \quad (2)$$

となることを要請する。ここでダークエネルギーの状態方程式は $p = w\rho$ と仮定し、 Ω_d と w は一様等方宇宙でのダークエネルギーの量と状態方程式を決める量である。一様等方宇宙モデルにはダストとダークエネルギーのみが存在するとする。この条件の下で角径距離を求めるためには、光の軌跡を決める測地線方程式

$$k^a \nabla_a k^a = 0 \quad (3)$$

と時空の振る舞いを決めるアインシュタイン方程式

$$R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab} = 8\pi GT_{ab} \quad (4)$$

を同時に解く必要がある。ただし角径距離は z を変数としているので測地線方程式とアインシュタイン方程式も z を変数として解く必要がある。時空が球対称で物質がダストと測地線方程式とアインシュタイン方程式は常微分方程式の形に書くことができる。これらの式を適切な境界条件のもとで解くことで、一様等方宇宙モデルと観測量が一致するように球対称宇宙モデルを決定することができる。

3 Boundary condition

時空と光の軌跡について境界条件をかす。計量の摂動部分について $a = 0$ で成長モードのみと仮定する。光の軌跡について観測者は球対称な時空の中心にいと仮定する。

4 Conclusion

測地線方程式とアインシュタイン方程式を上境界条件によりとくことにより現在時刻での密度ゆらぎが図のように与えられる。

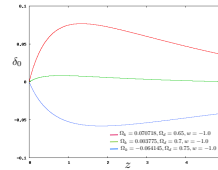


図 1: 現在時刻での密度ゆらぎ

Reference

] ラベル 1 Valkenburg(arXiv:1302.6588[astro-ph.CO])

著者 C. 2013. 発行元 2

著者 D. and 著者 E. and 著者 F. 2013. 発行元 3