

観測によるダークエネルギーの密度パラメータ・状態方程式の制限付け

石丸 晴海 (神戸大学大学院 理学研究科)

Abstract

遠方にある Ia 型超新星の距離-赤方偏移関係の観測により、宇宙が一様等方と仮定すると、宇宙が加速膨張していることがわかった。その起源を説明するための理論として大きく分けダークエネルギー仮説と修正重力理論仮説 (銀河や銀河団スケールになると距離の逆二乗則が破れており、アインシュタインの重力理論を修正する) がある。ダークエネルギーが宇宙のどの程度占めているのかを示す密度パラメータや、ダークエネルギーの性質を示す状態方程式に制限を付けるために様々な観測がなされている。その観測は宇宙年齢や超新星観測、CMB 観測、BAO(バリオン音響振動) の観測などである。そこで今回、宇宙年齢問題を考える。宇宙年齢問題は現在宇宙が加速膨張していないとされていた時に考えられた問題である。しかし Ia 型超新星観測により現在加速膨張していることがわかり、ダークエネルギーを考慮すると、この問題が解決される。また、現在の物質密度パラメータにも制限をつけることができる。まず、宇宙年齢問題について説明し、宇宙年齢問題を解決する方法を説明する。その後計算結果を示し、ダークエネルギーを考慮しなければならないこと、物質密度パラメータに制限が付けられることを示す。

1 Introduction

Carretta *et al.* は、天の川銀河の球状星団の年齢を 12.9 ± 2.9 Gyr と見積もった (E.Carreta et al 2000) のに対して、Jimenes *et al.* は 13.5 ± 2 Gyr と見積もった (R.Jimenez et al 1996)。Hansen *et al.* は白色矮星冷却系列の方法を用いて、球状星団 M4 の年齢を 12.7 ± 0.7 Gyr と制限した (B.M.S.Hansen et al 2002)。多くの場合、球状星団の年齢は 11Gyr よりも大きくなる。宇宙年齢問題とは上記で見積もられた球状星団 (原始星) の年齢よりも、宇宙年齢の方が短いという問題である。これは宇宙が平坦であると仮定し、かつダークエネルギーなしと考えた宇宙モデルでこのような問題が生じる。そこでここではダークエネルギーの寄与を考慮することによりこの問題が解決されることを考えていく。

2 Methods

解決法として、宇宙年齢をダークエネルギーの寄与を考慮して、より正確に見積り直すことが挙げられる。赤方偏移 z 、時間 t 、ハッブルパラメータ $H(z)$ に $dt = -dz/[(1+z)H(z)]$ の関係があることから、

現在の宇宙年齢 t_0 は

$$t_0 = H_0^{-1} \int_0^{\infty} \frac{dz}{E(z)(1+z)} \quad (1)$$

となる。ただし、

$$E(z) = \left[\Omega_r^{(0)}(1+z)^4 + \Omega_m^{(0)}(1+z)^3 + \Omega_{DE}^{(0)}(1+z)^{3(1+w_{DE})} + \Omega_K^{(0)}(1+z)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

である。ここで、平坦宇宙モデル $\Omega_K^{(0)} = 0$ では、(1) 式を積分すると、

$$t_0 = \frac{H_0^{-1}}{3\sqrt{1-\Omega_m^{(0)}}} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1-\Omega_m^{(0)}}}{1 - \sqrt{1-\Omega_m^{(0)}}} \right) \quad (3)$$

となる。ただし、 $\Omega_m^{(0)} + \Omega_{DE}^{(0)} = 1$ である。 $\Omega_{DE}^{(0)} \rightarrow 0$ の極限では

$$t_0 = \frac{2}{3}H_0^{-1} \quad (4)$$

となる。 $1/H_0 = 9.78 \times 10^9 h^{-1}$ years なので、 $h = 0.72 \pm 0.08$ の値を用いると、 8.2 Gyr $< t_0 < 10.2$ Gyr の間にあると見積もられる。これは観測により得られた球状星団の年齢 11Gyr の年齢よりも短い。そこで、現在の宇宙年齢を見積り直すことが必要である。ここまでで得られた宇宙年齢は $\Omega_{DE}^{(0)} \rightarrow 0$ の極限で

あり、ダークエネルギーの寄与を考慮するとより長く宇宙年齢が引き延ばされることを結果で示す。

3 Results

(1) 式を計算すると図 1 のようになる。

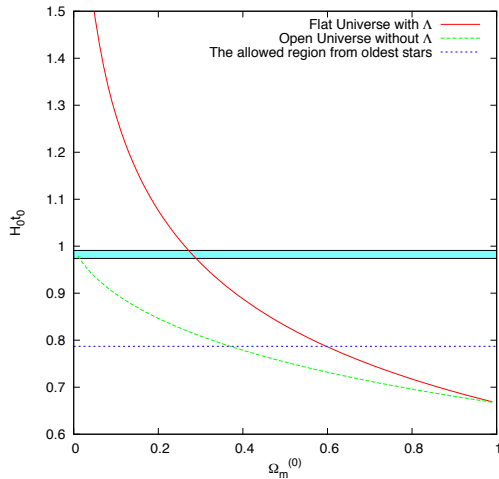


図 1: 宇宙年齢 t_0 (H_0^{-1} で規格化した) の $\Omega_m^{(0)}$ 依存性。

平坦宇宙モデル (曲率密度パラメータ $\Omega_K = 0$) でダークエネルギー (ダークエネルギー密度パラメータ Ω_{DE}) を考慮した場合の結果が赤色の曲線である。ただし、ダークエネルギーの状態方程式が $w_{DE} = -1$ である、宇宙項の場合を考えている。また、開いた宇宙モデルで $\Omega_{DE} = 0$ とした場合の結果が緑色の点線である。青色の点線は宇宙が誕生し間も無く出現した初期天体 (球状星団) 観測結果からの制限 (11Gyr 以上) であり、これよりも上の領域しか、宇宙年齢は許されない。赤色の平坦で宇宙項を考えたモデルでは、 $\Omega_m^{(0)} \leq 0.6$ で宇宙年齢は青色の線よりも上にあり、ここの領域であれば宇宙年齢問題は解決される。また、緑色の線のモデルでも $\Omega_m^{(0)} \leq 0.38$ の領域であれば解決される。ただ、この判定法では、開いた宇宙モデルでのダークエネルギーの寄与を考えない場合でも宇宙年齢問題は解決され、ダークエネルギーの存在証拠になり得ないので、さらに他の観測からの制限付けを行う。そこで水色のバンドを考える。こ

の水色のバンドは WMAP 5-year データからの制限 (E.Komathu et al 2009) である。Ia 型超新星距離測定観測結果と銀河分布内のバリオン音響振動観測結果を WMAP データと組み合わせて得られた制限である (現在の宇宙が Λ CDM モデルと仮定)。それによると現在の宇宙年齢は $t_0 = 13.72 \pm 0.12$ Gyr としている。この水色のバンドを用いてどちらのモデルが現在の観測結果とより整合しているのか考えたい。

4 Discussion

水色のバンドによる制限によると、 $t_0 = 13.72 \pm 0.12$ Gyr しか許されない。そこで再度、図中の赤色のモデルと緑色のモデルを考える。赤色のモデルでは $\Omega_m^{(0)} \leq 0.6$ を満たし、水色のバンドを満たす領域は $0.271 < \Omega_m^{(0)} < 0.289$ の領域である。もちろんこの制限は h の選び方によって変化し、 $h = 0.70$ の時、この制限は $0.271 < \Omega_m^{(0)} < 0.289$ となる。次に緑色のモデルを考える。 $\Omega_m^{(0)} \leq 0.38$ かつ水色のバンドを満たす領域を考えると限りなく 0 に近くなり、現在考えられている宇宙モデルから大きく異なる結果となる。WMAP 5-year データにより制限された値と大きく異なるので、このモデルは正しくないと考ええる。

5 Conclusion

平坦宇宙でダークエネルギーなしの過去の宇宙モデルでは球状星団の年齢よりも現在の宇宙年齢が短くなり問題であった。しかし、ダークエネルギー (ここでは宇宙項) を考慮するとこの問題が解決されることがわかった。また、開いた宇宙でダークエネルギーなしの宇宙モデルでも球状星団の年齢よりも上回る領域は出てくるのだが、WMAP-5-year データによる制限から、このモデルでは物質密度パラメータが限りなく 0 に近い値をとってしまい、現在他の観測結果から与えられる制限と大きく異なるため、このモデルは考えられないことがわかった。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。また、神戸大学のご支援に感謝いたします。

Reference

- Luca Amendola, Shinji Tsujikawa, "*DarkEnergy*", 2010, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- Scott Dodelson, "*ModernCosmology*", 2003, ACADEMIC PRESS
- 辻川信二, 「現代宇宙論講義」, 2013, サイエンス社
- 松原隆彦, 「現代宇宙論」, 2010, 東京大学出版
- E. Komathu *et al.* [WMAP Collaboration], Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation, *Astrophys. J. Suppl.* 180 (2009), 330
- E.Carreta, R.G.Gratton, G.Clementini, and F.Fusi Pecci, Distances, ages and epoch of formation of globular clusters, *Astrophys. J.* 533 (2000), 215
- R.Jimenez, P.Thejll, U.Jorgensen, J.MacDonald, and B.Pagel, Ages of globular star clusters: a new approach, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 282 (1996), 926
- B.M.S.Hansen *et al.*, The white dwarf cooling sequence of the globular cluster Messier 4, *Astrophys. J.* 574 (2002), L155