

エネルギー輸送を伴うダークエネルギーとその応用

遠藤 隆夫 (名古屋大学大学院 理学研究科 M1)

Abstract

本発表では時間変化するダークエネルギーのモデルの一つとして, dark matter(DM) との間にエネルギー輸送を伴う interacting dark energy(IDE) を扱った Wang et al. (2014) をレビューする. Wang et al. (2014) では DM と IDE を統一的に扱う流体として generalized Chaplygin gas(GCG) を採用する. この時のエネルギー輸送は GCG の状態方程式に現れるパラメータ α によって特徴付けられる. その際, α が正の時は DM から IDE へのエネルギー輸送を表し, 負の時にはその逆となる. なお, α が 0 の時には Λ CDM モデルを再現する. Planck, WMAP, Union2.1, バリオン音響振動 (BAO), 赤方偏移空間歪み (RSD) の観測データから得られる α の制限は 2σ の信頼度で $-0.083 < \alpha < -0.006$ である. この時 RSD 観測による $f_m\sigma_8$ の観測値が Λ CDM モデルよりも小さくなるという不一致は解消される.

1 Introduction

20 世紀の終わりに Ia 型超新星の観測によって宇宙の加速膨張が発見されて以来, その原因の解明は宇宙論研究における重要な課題の一つとなっている. 宇宙の加速膨張の研究には主に二つのアプローチがある. 一つはアインシュタイン方程式の左辺に修正を加えるものであり, 修正重力理論と呼ばれる. もう一つは方程式の右辺に加速膨張を引き起こすような存在を導入するものである. 加速膨張を引き起こす存在は一般にダークエネルギーと呼ばれる. これを宇宙項 Λ に対応させた Λ CDM モデルは宇宙マイクロ波背景放射などの観測結果をよく再現し, 大きな成功を収めている.

しかしながら, この Λ CDM モデルにも問題がある. 例えば宇宙項 Λ はエネルギー密度が変化しないことから, その正体は真空のエネルギーと考えられているが, 素粒子論による単純な見積もりと, 実際の観測値の間には 100 桁以上にわたる開きがある. また, Λ CDM モデルから予想される $f_m\sigma_8$ の値は, RSD の観測から得られる値よりも大きくなるという不一致も存在する.

宇宙項の状態方程式パラメータは $w_\Lambda = -1$ である一方で, 加速膨張に必要なダークエネルギーの状態方程式パラメータの条件は $w < -1/3$ である. したがって, 仮に状態方程式パラメータの値が -1 でなければ, 宇宙項ではないものが加速膨張を引き起こ

していることになる. ダークエネルギーの正体が宇宙項ではないとした場合には, ダークエネルギーのエネルギー密度が時間変化するようなモデルが考えられる. そのなかにはクインテッセンスや k-エッセンスと呼ばれるスカラー場が加速膨張を引き起こすモデルや, 特殊な状態方程式を持つ流体によって DM とダークエネルギーを統一して扱うようなモデルがある. 後者のうち, 代表的なものとして, 過去においては物質として振る舞い, 十分時間が経った後では宇宙項のように振る舞う Chaplygin gas を拡張した generalized Chaplygin gas(GCG) モデルがある.

本発表では DM と IDE を GCG に応用したモデルを紹介する. まず, セクション 2 では本発表で用いる DM と IDE の間の相互作用のモデルを概観する. セクション 3 では各宇宙論パラメータに対し, 観測から得られる制限を示す. セクション 4 では, まとめと今後の展望について述べる.

2 Modeling

このセクションでは本発表における方程式系をまとめる. 背景時空の曲率は 0 とし, エネルギー密度の成分はバリオン, ダークマター, 放射, IDE があるものとする. この時フリードマン方程式は

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_b + \rho_{\text{dm}} + \rho_r + V). \quad (1)$$

ただし, IDE のエネルギー密度を V とした. 今, DM と IDE の間のエネルギー輸送を考えるので, 背景時空において

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = 0, \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_b + 3H\rho_b = 0, \quad (3)$$

$$\dot{\rho}_{\text{dm}} + 3H\rho_{\text{dm}} = -Q, \quad (4)$$

$$\dot{V} = Q. \quad (5)$$

ここでエネルギー輸送を表すパラメータ Q の関数形は考えるモデルによって異なる. 本発表における Q の具体的な関数形は 2.2 節で与える.

2.1 Linear Perturbation

次に, 今考えているモデルを線形摂動へ拡張する. 今, スカラーモードの摂動を考えるとメトリックは

$$ds^2 = -(1 + 2\phi)dt^2 + 2a\partial_i B dt dx^i + a^2[(1 - 2\psi)\delta_{ij} + 2\partial_i \partial_j E]dx^i dx^j. \quad (6)$$

同期ゲージを採用し, ゲージを完全に固定するために DM 流体の速度の空間成分を 0 とする. すると揺らぎの発展方程式として

$$\ddot{\delta}_{\text{dm}} + \left(2H - \frac{Q}{\rho_{\text{dm}}}\right)\dot{\delta}_{\text{dm}} - \left[2H\frac{Q}{\rho_{\text{dm}}} + \left(\frac{Q}{\rho_{\text{dm}}}\right)'\right]\delta_{\text{dm}} = 4\pi G(\rho_{\text{dm}}\delta_{\text{dm}} + \rho_b\delta_b), \quad (7)$$

$$\ddot{\delta}_b + 2H\dot{\delta}_b = 4\pi G(\rho_{\text{dm}}\delta_{\text{dm}} + \rho_b\delta_b), \quad (8)$$

を得る.

2.2 Generalized Chaplygin Gas

DM と IDE を統一して扱うモデルとして Generalized Chaplygin Gas(GCG) を採用する. GCG は以下の状態方程式を持つ

$$P_g = -\frac{A}{\rho_g^\alpha}. \quad (9)$$

ここで A は正の定数, α は GCG を特徴付けるパラメータである. 今, DM と IDE の混合流体を GCG と考えているので

$$\rho_g = \rho_{\text{dm}} + V, \quad P_g = -V. \quad (10)$$

するとエネルギー輸送を表すパラメータ Q は

$$Q = \dot{V} = 3\alpha H \frac{\rho_{\text{dm}} V}{\rho_{\text{dm}} + V}, \quad (11)$$

となる. これより, 正の α は DM から IDE へのエネルギー輸送を表し, 負の α はその逆を表す. なお, $\alpha = 0$ の時は Λ CDM モデルを再現する.

また, 式 (11) を変形して

$$\dot{V} + 3H(1 + w_V^{\text{eff}})V = 0, \quad (12)$$

$$w_V^{\text{eff}} = -1 - \alpha H \frac{\rho_{\text{dm}} V}{\rho_{\text{dm}} + V}, \quad (13)$$

により, IDE に対する effective な状態方程式パラメータ w_V^{eff} を定義することができる. 異なる α に対する w_V^{eff} の振る舞いを図 1 に示す.

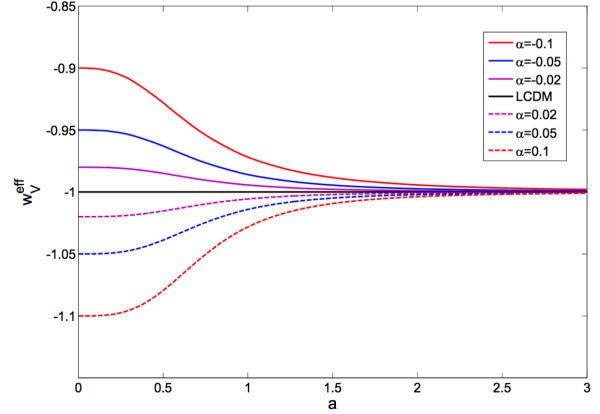


図 1: 各 α に対する w_V^{eff} の時間変化. Wang et al. (2014) より転載

図 1 から分かるように, たとえ $\alpha \neq 0$ であっても, 十分時間が経ったのちには IDE は宇宙項のように振る舞う.

2.3 Linear growth rate

揺らぎの線形成長率は以下で定義される。

$$f_m(a) \equiv \frac{d \ln \delta_m(a)}{d \ln a} = 1 + \frac{g'_m}{g_m}. \quad (14)$$

ここでプライムは $\ln a$ での微分を表し、

$$g_m(a) = \frac{\rho_{dm}}{\rho_m} g_{dm} + \frac{\rho_b}{\rho_m} g_b, \quad (15)$$

$$g_i = \frac{\delta_i}{a}, \quad (16)$$

である。 α を変化させた時の $f_m \sigma_8$ の振る舞いを図 2 に示す。 図中の data は RSD 観測によるデータ点である。

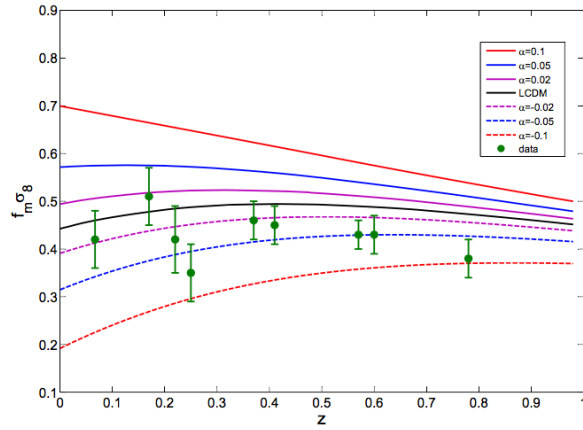


図 2: 各 α に対する $f_m \sigma_8$ の時間変化. f_m は現在の Ω_m で規格化している. Wang et al. (2014) より転載

3 Results

Planck, WMAP, Union2.1, BAO, RSD の観測による各宇宙論パラメータへの制限を表 1 に示す。

図 2 にあるように、この制限内の α は RSD 観測による $f_m \sigma_8$ を再現する。すでに見たように、負の α は IDE から DM へのエネルギー輸送を表す。

4 Conclusion and Discussion

本発表は Wang et al. (2014) のレビューを行った。ここでは Λ CDM モデルにおける CMB 観測と RSD

Parameters	Planck+WP+Union2.1+BAO+RSD	
	Mean values with $1\sigma, 2\sigma$ errors	Best fit
$\Omega_b h^2$	$0.0222^{+0.0002+0.0005}_{-0.0002-0.0005}$	0.0222
$\Omega_{dm} h^2$	$0.1245^{+0.0035+0.0070}_{-0.0034-0.0067}$	0.1225
Θ_S	$1.0412^{+0.0006+0.0011}_{-0.0006-0.0011}$	1.0416
τ	$0.0884^{+0.0124+0.0258}_{-0.0137-0.0241}$	0.0925
n_s	$0.965^{+0.006+0.011}_{-0.005-0.011}$	0.969
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.082^{+0.024+0.050}_{-0.026-0.047}$	3.088
α	$-0.043^{+0.019+0.037}_{-0.020-0.040}$	-0.036
Ω_V	$0.681^{+0.015+0.027}_{-0.014-0.029}$	0.691
Ω_m	$0.319^{+0.015+0.027}_{-0.015-0.027}$	0.309
σ_8	$0.796^{+0.017+0.032}_{-0.016-0.033}$	0.801
H_0	$67.8^{+0.8+1.6}_{-0.8-1.6}$	68.4
$\Omega_m h^3$	$0.0995^{+0.0016+0.0032}_{-0.0016-0.0031}$	0.0990

表 1: Planck+WP+Union2.1+BAO+RSD による制限及びベストフィットの値. Wang et al. (2014) より引用。

観測の不一致の解消をモチベーションの一つとし、DM とダークエネルギーの間にエネルギー輸送が起きるモデルを考えた。これを GCG に応用した時、エネルギー輸送はパラメータ α で特徴付けられ、複数の観測により

$$\alpha = -0.043^{+0.019+0.037}_{-0.020-0.040} \quad (17)$$

と制限される。負の α は過去において、 Λ CDM モデルよりもダークエネルギーのエネルギー密度が大きいことを意味し、構造形成が抑制される。これにより、 Λ CDM モデルと RSD 観測の間の不一致は解消することができた。

2013 年の Planck の解析結果では、ダークエネルギーの状態方程式パラメータには $w = -1.13 \pm 0.14$ の制限がつけられている (Planck 2013 results. XVI)。このためダークエネルギーが宇宙項であることに矛盾はない。しかしながら、誤差の範囲は大きいため、 $w = -1$ から優位なズレがあるかについては、より精密な観測に期待されている。その際、 $w = -1$ からのズレが確かめられれば、本発表で紹介するようなモデルは現実味を帯びてくるのかもしれない。また、ダークエネルギーは構造形成を抑制する効果があることから、大規模構造におけるボイド領域のような、構造形成の進んでいない低密度領域と関係させられる可能性があり、実際そのような研究は行われているようである。そのような観点でいえば、DM と相互作用はしていなくとも、局所的なダークエネルギーの大きさの違いというもの考えてみることは面白いことかも

しれない。

Acknowledgement

本発表に至る過程で名古屋大学宇宙論研究室の方々に大変お世話になりました。この場をお借りして感謝を申し上げます。

Reference

- [1] Yuting Wang, et al., [1404.5706], Phys.Rev. D90 (2014) 2, 023502
- [2] David Wands, et al., [1203.6776], Class.Quant.Grav. 29 (2012) 145017