Dark Energy

京都大学大学院理学研究科　　千葉 剛

理論懇シンポジウムでは、標準的なレビュウを行ったので (たとえば [1] を参考)、ここでは、もう少し違った角度からダークエネルギー問題を考えてみることにする。

1 The Problem

問題は次のように要約されよう:

$$\Omega \equiv \frac{8\pi G\rho}{3H^2} = 1 \tag{1}$$

であるはずなのに観測結果 (Ia 型超新星 [2]、宇宙背景輻射の揺らぎ [3]、銀河団分布等 [4]) は

$$\Omega < 1$$

を示唆している。

Ω はアインシュタイン方程式の右辺 (物質項) と左辺 (重力項) の比とも見れるから、このことは:

「$3H^2 > 8\pi G\rho$ のところを何とか $3H^2 = 8\pi G\rho$ にしたい。」

ともいかえられる。この「であるはず」とか「したい」、という要請は「アインシュタイン方程式 (フリードマン方程式) を満たしなさい」というところからくる。したがって、この等式を満たすようにするには、1）新たな物質を導入するか、2）重力を変えるか、しかないのである。このうち後者の可能性は、太陽系での光の屈折角、時間の遅れや、月の運動等の測定から、一般相対論からのずれは 0.1% 以下であることがわかっているので [5]、困難である[1]。したがって、前者の方向で何か候補者を立てなくてはいけない[2]。すぐに思いつくのがアインシュタインの宇宙項であろう。ただしここでは宇宙「定数」であるという必然性は何もないし、この自由度を (スカラー) 場で書き表せばむしろ動いている方が自然ともいえる。最近では、このような以前には宇宙項と言われていたエネルギー成分をダークエネルギーと呼ぶようになってきている[3]。その定義はこの段階では、「(1) 式を満たすようなエネルギー成分」である。エネルギー保存の式, $\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$, から一般には時間変化する (宇宙「定数」は $p = -\rho$ に相当)。しかしながら、その割合は全体の 7 割にも及ぶ。

---

[1] この制限は太陽系スケールでの制限なので、それより大きいスケールで重力が大きくずれている可能性は否定しない (例えば MOND(Modified Newtonian Dynamics))。しかしながら MOND をメトリック理論の枠組みで記述すること (したがって一般相対論を含むように記述すること) には今のところ成功していない [6]。

[2] ここでは「オッカムの剃刀」にしたがって必要最小限の可能性を探っているので、「両者」の可能性はもちろんあるがとりあえず考えない。

[3] ここでの “dark” は “unknown” の意味で使われていて、 “dark matter” の “dark(nonluminous)” とはニュアンスが微妙に違う。

ここで直ちに導かれる制限がある。それは、「現在の宇宙の構造ができるためには宇宙には物質優勢期がなくてはならない」という要請だ。したがって、過去に遡ればダークエネルギーは物質より少なくなる必要がある。$\rho \propto a^{-3(1+w)}$ $(w \equiv p/\rho)$ だから、このことはすなわち、ダークエネルギーは「負の圧力」$(w < 0)$ を持たなければならない、ということを意味する。

2 Zoo of Dark Energy

ここで、ダークエネルギーをその状態方程式 $w = p/\rho$ にしたがって分類してみよう。

- $-1 < w < 0$(decaying Λ)

  緩やかなポテンシャルを持つスカラー場 (quintessence)[7]
  位相欠陥のネットワーク (コズミックストリング $(w = -1/3)$、ドメインウォール $(w = -2/3)$)[8]

- $w = -1$

  宇宙定数 [9]

- $w < -1$(growing Λ)

  重力と non-minimal に結合したスカラー場 (extended quintessence)[10]
  正準的でない運動項を持ったスカラー場 (phantom)[11]

どの可能性も、何か新しい物理を必要としている。

3 Problems of Dark Energy

ダークエネルギーの可能性には次に述べるいくつかの深刻な理論的困難がある。

- 宇宙項問題 [12]

  場の量子論によると、真空は空っぽではなく、ゼロ点振動のエネルギーを持っている。素朴に考えると、真空のエネルギースケールは cutt-off スケールで決められ、それはプランクスケール $(m_{pl} \simeq 10^{19}\mathrm{GeV})$ か超対称性の破れのスケール $(m_{SUSY} \simeq 1\mathrm{TeV})$ になると期待されるが、ダークエネルギーのスケール $(m_{DE} \simeq 10^{-12}\mathrm{GeV})$ とは桁違いに大きすぎる。そもそも真空は重力相互作用するのか。

- coincidence 問題 [13]

  最近の観測が示唆するようにダークエネルギー (宇宙項) があるとすると、現在という時期は、丁度ダークエネルギーが宇宙の主たるエネルギー成分になってきたという意味で、非常に特殊な時期にみえる。なぜ今[4]、ダークエネルギーが支配的になってきたのか。

[4]Mike Turner はスケート選手の Nancy Kerrigan 事件をもじって、好んでこれ (Why now, Why me) を Nancy Kerrigan problem と呼んでいる。

- 相互作用問題 [14]

  ダークエネルギーの自由度を場で表すと、その場は (対称性で禁止されない限り) 一般には通常の物質と相互作用しうる。しかしながら、場は時間的に変動し、また非常に軽い (典型的には $\simeq H_0 \simeq 10^{-33}$eV) ので、自然定数の時間変化や (弱い) 等価原理を破る長距離力を媒介しうる。これらの可能性は観測から非常に厳しく制限されている [15]。

はじめの宇宙項問題がいかに難しい問題であるかは Witten が Dark Matter 2000 における講演で明快に述べている [16]。彼の講演から引用しよう: 「宇宙項問題は低エネルギーの物理と関係していると思われる。しかしながら、標準模型の成功のゆえに、低エネルギーの物理に変更を加えるのは非常に難しい...」。

4 Possible Observational Consequences

次に、観測的にダークエネルギーの正体が暴き出せるのか、その可能性を探ってみよう。戦略としては、1) まず、ダークエネルギーが 2 章にあげた三つのカテゴリーのどれに属するかを明らかにし、2) その上で、(可能なら) ラグランジアンまで決定する。

4.1 First Stage

第一段階のテーマで観測量としてあがってくるのは以下のものであろう。すべて何らかの方法で、ハッブルパラメター, $H(z)^2/H_0^2 = \Omega_M(1+z)^3 + \Omega_{DE}(1+z)^{3(1+w)}$, を測定するものである。

- Ia 型超新星の magnitude-redshift relation:

$$d_L(z) = (1+z)r(z), \qquad r(z) = \int_0^z dz/H(z)$$

- 重力レンズ: $d_A(z) = d_L(z)/(1+z)^2$
- 宇宙背景輻射の揺らぎのピークの位置 (θ_n):

$$\theta_n \simeq (\eta_{LSS}/n)(1+z_{LSS})^{-1} d_A(z_{LSS})^{-1}, \qquad \eta_{LSS} = \int_{z_{LSS}}^{\infty} c_s(z)dz/H(z)$$

- 銀河の number count: $dN/d\Omega dz = n(z)dV/d\Omega dz = n(z)r^2(z)/H(z)$

それぞれについて、さまざまの現在進行中 (SCP, HZT, CLASS, SDSS) あるいは将来 (SNAP, MAP, Planck, NGST, DEEP) の観測計画があり、今後 10 年以内にダークエネルギーに関係した宇宙論パラメターに精度の良い情報をもたらしてくれるものと期待される。

4.2 Second Stage: Reconstructing $V(\phi)$

ここでは、特に $-1 < w < 0$ の可能性が出てきた場合の第二段階のテーマを考える。それは、「観測データからラグランジアン (この場合はポテンシャル) を直接に決定しよう」、というものである。この考えは荒唐無稽に思えるかも知れないが、原理的には全く可能であり [17]、実際上も遂行可能である [18]。

「原理的には」の部分のアイデアは全く簡単で、方程式を観測量を変数にとって書き直せばよい。つまり、以下の 2 つの式

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\left(\rho_M + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)\right),$$
$$\dot{H} = -4\pi G(\rho_M + \dot{\phi}^2),$$

を観測量 (超新星までの光度距離), $d_L(z)/(1+z) = r(z) = \int_0^z dz/H(z)$, を使って書き直せば良い。結果は、

$$8\pi G V(z) = 3/r'^2 + (1+z)r''/r'^3 - 3H_0^2\Omega_M(1+z)^3/2,$$
$$8\pi G(1+z)^2\phi'^2/r'^2 = -2(1+z)r''/r'^3 - 3H_0^2\Omega_M(1+z)^3,$$

となる。したがって、赤方偏移を媒介変数としてポテンシャルとスカラー場に関係がついた: $V(z) = V(\phi(z))$。

図 1 に計画されている超新星観測衛星 (SNAP(Supernova/Acceleration Probe))[5]で予想されるデータをもとにしたモンテカルロ計算の結果を示す。もし、ダークエネルギーの正体が quintessence なら、観測データからそのポテンシャルを再現できるかもしれない。

5 Summary

以上、ダークエネルギーをめぐる現状を簡単にふれた。まとめると、

- 現在の観測結果を満たすには、1) 新たな物質を導入するか、2) 重力を変えるか、しかなく、後者の可能性は薄い。
- しかしながら、前者の可能性 (ダークエネルギー) には問題が山積みである。
- 近い将来、観測からダークエネルギーの性質 (特に状態方程式) に制限をつけられる、と期待される。
- さらには、超新星までの距離のデータから直接にダークエネルギーのポテンシャルを再現できるかもしれない。

いずれにせよ、ダークエネルギー問題は素粒子論 (真空論)、相対論 (重力相互作用)、宇宙論 (観測的制限) を巻き込んで議論が続くものと見られる。

[5] http://snap.lbl.gov

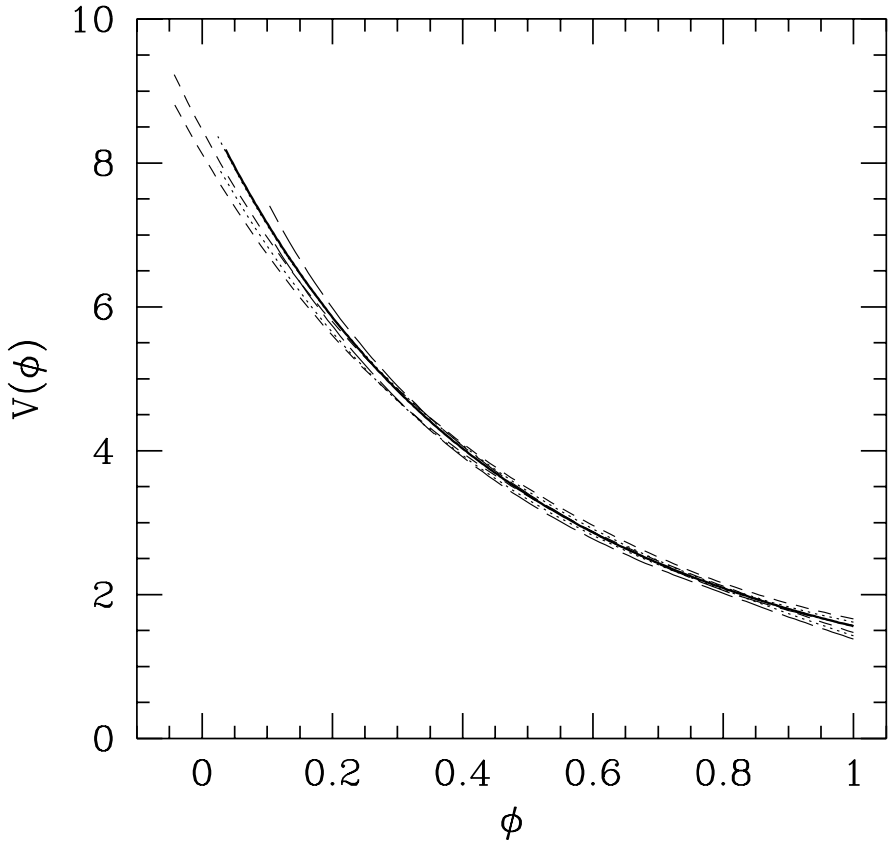

図 1: 6000 個のデータをもとにして再現したポテンシャル (1σ)。データは $\Omega_M = 0.3$ の物質と $V(\phi) = M^8\phi^{-4}$ のポテンシャル (太線) を仮定して構成した。縦軸はポテンシャルを $H_0^2/8\pi G$ で規格化したもの、横軸はスカラー場を $1/\sqrt{8\pi G}$ で規格化したものである。点線はデータから再構成する際に $\Omega_M = 0.3$ と仮定したもの、短い破線は $\Omega_M = 0.27$、長い破線は $\Omega_M = 0.33$ を仮定したもの。図は仮定した Ω_M の不定性にあまり依らずにポテンシャルの概形が再現できることを示している。

参考文献

[1] V. Sahni and A. Starobinsky, Int. J. Mod. Phys. D **9**, 373 (2000); S.M. Carroll, astro-ph/0004075.

[2] B.P. Schmidt *et al.*, ApJ **507**, 46 (1998); A.G. Riess *et al.*, AJ **116**, 1009 (1998); S. Perlmutter *et al.*, ApJ **517**, 565 (1999).

[3] P. de Bernardis, *et al.*, Nature **404**, 955 (2000); A.H. Jaffe *et al.*, astro-ph/0007333.

[4] N.A. Bahcall and X. Fan, ApJ **504**, 1 (1998); D. Wittman *et al.*, Nature **405**, 143 (2000).

[5] C.M. Will, *Theory and experiment in gravitational physics*, (Rev.Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

[6] R.H. Sanders, ApJ **480**, 492 (1997).

[7] B. Ratra and P.J.E. Peebles, Phys. Rev. D **37**, 3406 (1988); C. Wetterich, Nucl. Phys. **B302**, 645 (1988); Y. Fujii and T. Nishioka, Phys. Rev. D **42**, 361 (1990); J.A. Frieman, C.T. Hill, and R. Watkins, Phys. Rev. D **46**, 1226 (1992); T. Chiba, N. Sugiyama, and T. Nakamura, MNRAS **289**, L5 (1997); MNRAS **301**, 72 (1998); M.S. Turner and M. White, Phys. Rev. D **56**, 4439 (1997); R.R. Caldwell, R. Dave, and P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **80**, 1586 (1998).

[8] A. Vilenkin, Phys. Rev. Lett. **53**, 1016 (1984); M. Bucher and D. Spergel, Phys. Rev. D **60**, 043505 (1999).

[9] A. Einstein, Sitz. Preuss. Akad. Wiss., 142 (1917).

[10] T. Chiba, Phys. Rev. D **60**, 083508 (1999); F. Perrotta, C. Baccigalupi, and S. Matarrese, Phys. Rev. D **61**, 023507 (1999).

[11] R.R. Caldwell, astro-ph/9908168; T. Chiba, T. Okabe, and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D **62**, 023511 (2000).

[12] Ya.B. Zel'dovich, JETP **6**, 316 (1967); S. Weinberg, Rev. Mod. Phys. **61**, 1 (1989).

[13] C. Armendariz-Picon, V. Mukhanov, and P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **85**, 4438 (2000); L. Amendola and D. Tocchini-Valentini, astro-ph/0011243.

[14] S.M. Carroll, Phys. Rev. Lett. **81**, 3067 (1998); T. Chiba, Phys. Rev. D **60**, 083508 (1999).

[15] T. Damour and F. Dyson, Nucl. Phys. **B480**, 37 (1996); J.G. Williams, X.X. Newhall, and J.O. Dickey, Phys. Rev. D **53**, 6730 (1996); Y. Su *et al.*, Phys. Rev. D **50**, 3614 (1994).

[16] E. Witten, hep-ph/0002297.

[17] A. Starobinsky, JETP Lett. **68**, 757 (1998); T. Nakamura and T. Chiba, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **306**, 696 (1999).

[18] T.D. Saini *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 1162 (2000); T. Chiba and T. Nakamura, Phys. Rev. D **62**, 121301 (2000); J. Weller and A. Albrecht, astro-ph/0008314.