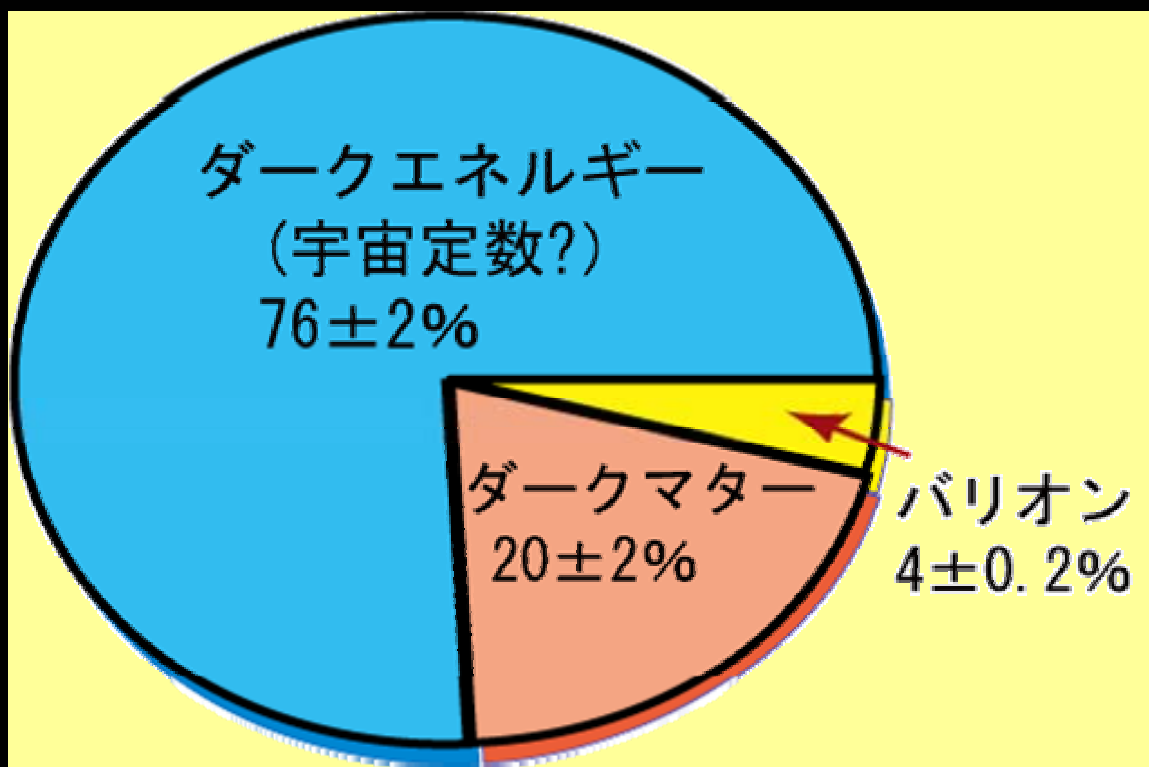


ダークエネルギー研究の現状と展望



東京大学 大学院理学系研究科 須藤 靖

2007年9月22日 日本物理学会@北海道大学

宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム：宇宙のダークエネルギー

「物理学に関する5つの誤解」 (某大学教授のHPより) I

- 誤解その1 物理学の頂点は素粒子論である。

これは誤解である。素粒子論はもう終わったも同然である。今後はもう新しい成果はほとんどでないだろう。したがって、ほとんど進歩しないだろう。

- 誤解その2 物理学の研究の中心は素粒子物理学である。

これは3, 40年前までの話である。現在、年に2回ある日本物理学会講演会でも、研究発表の数は素粒子・原子核・宇宙を合わせても2割しかない。残りの8割は物性物理学である。

「物理学に関する5つの誤解」 (某大学教授のHPより) II

- 誤解その3 現代物理学は相対論と量子力学によって始まった

これは部分的に誤解である。特殊相対性理論はむしろ古典物理学の完成と言った方がよい。現代物理学の真髄は量子力学である。

- 誤解その4 宇宙がやりたい人は物理学科に入るべきだ。

これは誤解に基づいている可能性がある。まず、星が好きなだけの人は天文学科に行くべきである。そして、天文学は物理学ではない。星を分類するだけでは物理にならない。物理学はもっと緻密な法則を探求する学問である。また、宇宙論は学問ではない。だから「論」と付いている。ブルーバックスの記事と学問を混同してはいけない。

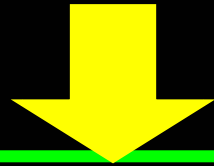
「物理学に関する5つの誤解」 (某大学教授のHPより) III

■ 誤解その5 物理学科を卒業すれば物理学者になれる。

これは誤解である。そんな生易しいものではない。少なくともまず、大学院に進んで博士号を取らないといけない。その後も、素粒子論や宇宙論をやったら、まず新しい研究成果は生み出せない。このような分野では、世界に10人くらい天才的な学者がいればそれで十分であって、諸君が参入する余地はない。それよりも、量子力学を生かした物理学の研究をするべきである。この分野では、アイデアと工夫次第でいくらでも成果が上がり、研究発表も出来るし、論文も書ける。

■ 結論 物理学をやるぞ！

これ自体が(素粒子論に関する記述はさておき?)誤解と
偏見に満ちている



本シンポジウムの結論
少なくとも(ダークマターと)
ダークエネルギーがある
じゃないか!

20世紀宇宙論の総括

- 1980年代以降、宇宙論は急速に進歩
 - ダークマターの存在が確定
 - マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見
 - ハッブル定数が10%の精度で決定される
 - 銀河系内MACHOの検出
 - 宇宙の加速膨張の発見(ダークエネルギー)
 - 素粒子論による初期条件の解明(努力中)
- 物理学として誇るべき段階に達した
- では21世紀はどう進むべきであろう？

研究の漸近的振る舞い？

The historical record here and in other physical sciences suggests that as the puzzles and conundrums we know about are laid to rest, they will be replaced by still more interesting ones.

P.J.E.Peebles (1993)

``Principles of Physical Cosmology'' p.683

21世紀宇宙論を 覆う二つの暗雲



http://www.physics.gla.ac.uk/Physics3/Kelvin_online/clouds.htm

- 1900年4月27日 ケルビン卿 王立協会講演
 - 熱と光の動力学理論に立ち込める19 世紀の暗雲
beauty and clearness of theory was
overshadowed by two clouds
 - 実は、相対論と量子論の幕開けであった
- ダークマターとダークエネルギー(宇宙定数)は
21世紀宇宙論における二つの暗雲か？

2つの暗雲の履歴書

戸籍名	ダークマター	ダークエネルギー
和名	暗黒物質	暗黒エネルギー
旧姓	ミッシングマス	宇宙項、宇宙定数
誕生年	1933年	1917年
実父	フリッツ ツヴィッキー	アルバート アインシュタイン
親戚	アクシオン、超対称性粒子	真空のエネルギー、クインテッセンス
体重	宇宙の約20パーセント	宇宙の約75パーセント
性格	自立心に欠け、群集まることを好む。	他人と反発しがち。協調性に欠け、群集まることを嫌う。
総被引用回数	約2万5千 (dark matter)	約5千 (dark energy) 約1万 (cosmological constant)

この単語が「アブストラクト」に用いられている論文数(ADS, 2007年5月時点)

ダークマター探査

- 歴史的には、天文観測がダークマター存在確認に唯一貢献した
 - 逆に言えば、天文学的にできることはやりつくされた感がある
- すでに天文学を卒業して地上直接検出実験の段階に移行しつつある
 - 5ー10年で何らかのブレイクスルーがあり得る？
 - 直接検出が(素粒子)物理学に与える意義は計り知れない
 - 今日の午後の合同シンポジウム 22pZE「素粒子と宇宙」 stay tuned !
- そのときがきても、天文学の本質的な貢献を決して忘れないようにしよう！

ダークエネルギー探査

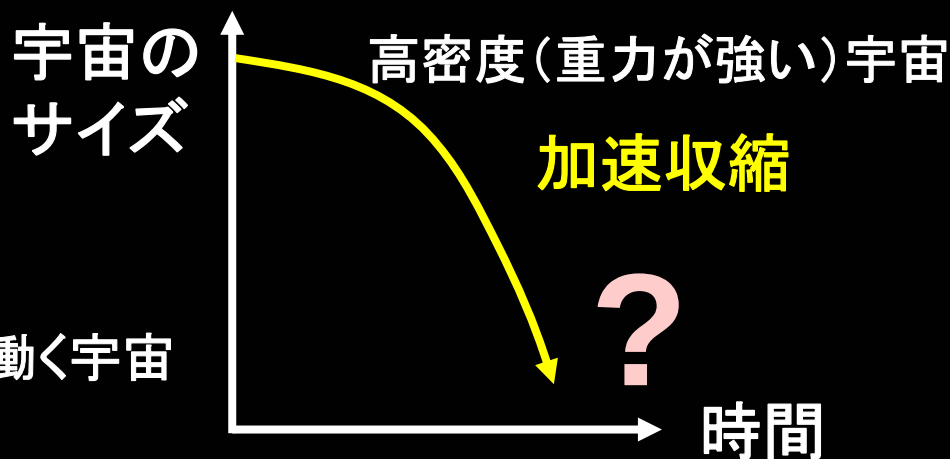
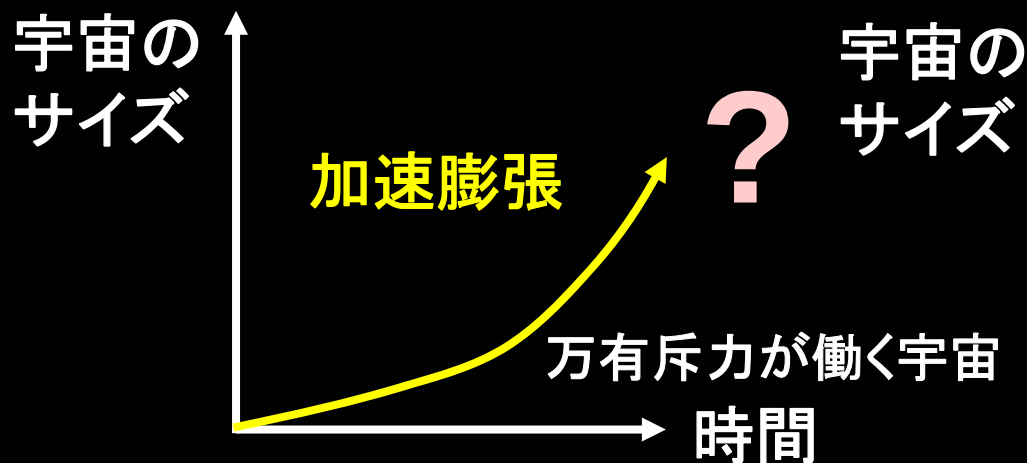
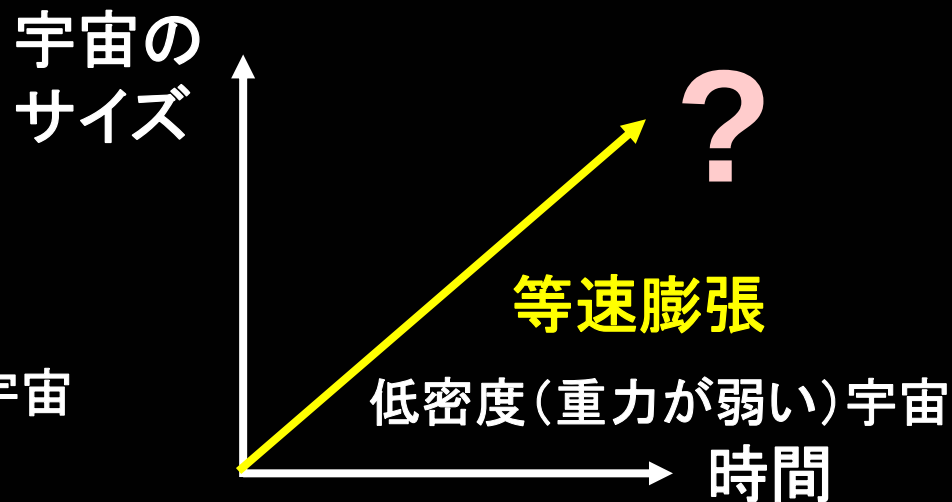
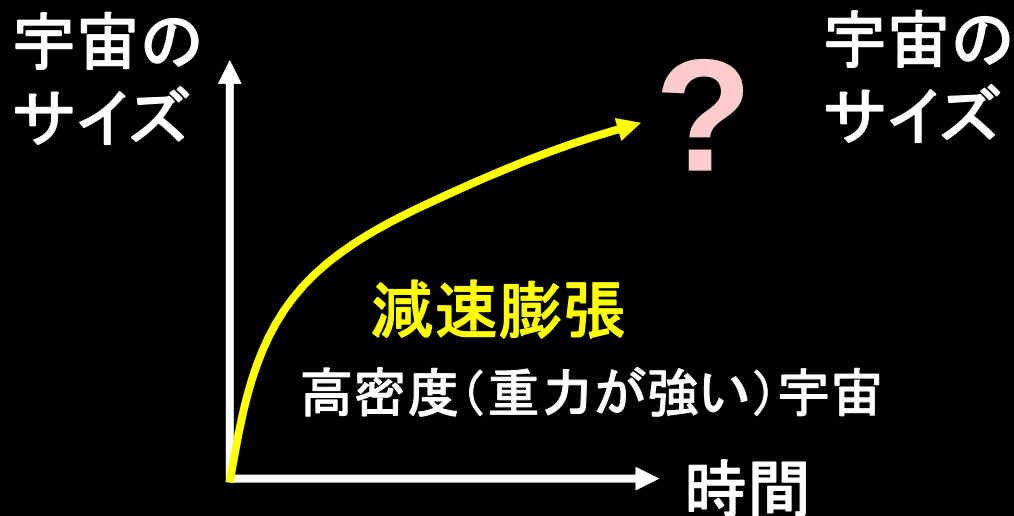
- 「アインシュタインが予言した」という修飾句がつけられるので、大衆受けする
 - 市民が意義を理解(したと誤解)してもらえるテーマは、同レベルの官僚あるいは本当に賢い官僚のどちらにも受け入れてもらえる
- 宇宙の存在比が高いものから調べるのは当然
 - 幸いなことに、理論的解明にも程遠く、直接検出など100年スケールの話
- 当面は天文観測こそが主役
 - ダークエネルギー探査以外の天文学との共生

ダークエネルギーはなぜ観測できる？

- 一般にもものの検出は差分観測（≠絶対観測）
 - 天体：暗いところと光っているところの差
 - ダークマター：空間的な非一様性を天体をトレーサーとして力学的に検出
- もしもダークエネルギーが空間を完全に一様に満たしているとする、その検出には絶対観測が必要？
 - 時間領域での差分観測をすればよい
 - 宇宙膨張、宇宙の構造進化など宇宙論的観測可能量の時間進化を通じてダークエネルギーの存在を読み取る

ダーク成分と宇宙膨張の未来

- 宇宙の構造と進化の観測を通じて、宇宙の組成を決定する



宇宙年齢と加速膨張

- 宇宙年齢: $137.3^{+1.3}_{-1.7}$ 億年 (Spergel et al. 2007)
- ハッブルの法則: $v = H_0 d$
 - 後退速度が一定ならば, $d/v = 1/H_0$ で一点に収縮
 - $H_0 = 73 \pm 3$ km/s/Mpc (Spergel et al. 2007)
 - $1/H_0 = 134^{+6}_{-5}$ 億年 (一致しすぎ!?)
- 宇宙は等速膨張している?

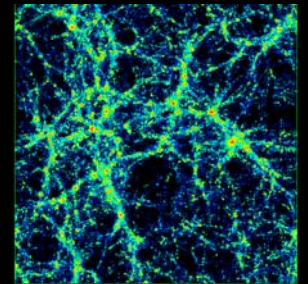
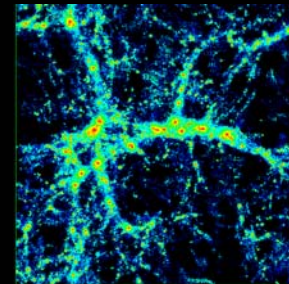
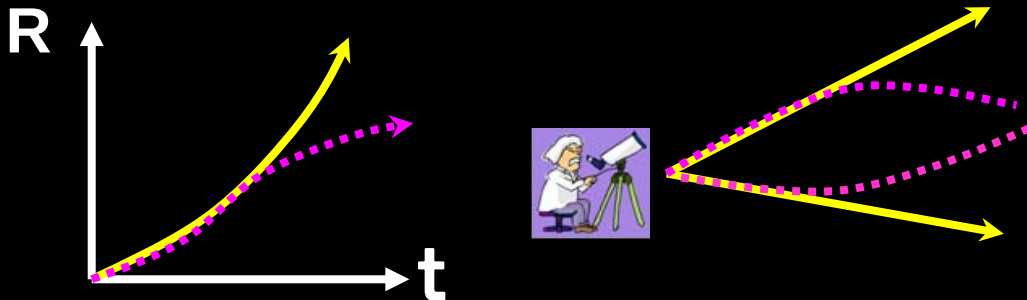
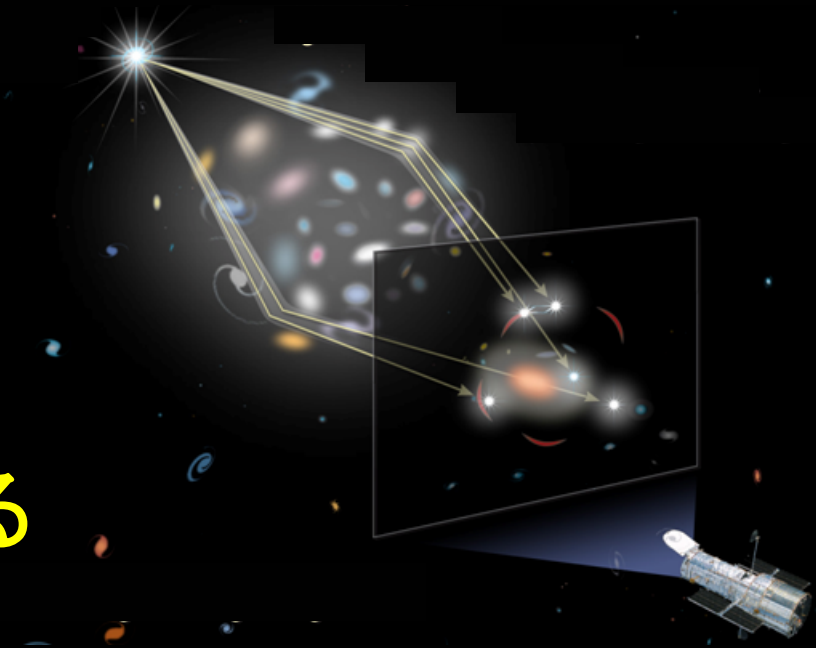
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 普通 ($\rho > 0$, $p = \Lambda = 0$) は減速膨張 (万有引力!)
- それを相殺するだけの加速膨張をする期間が必要
- 宇宙定数 ($p = 0$, $\Lambda > 0$)? ダークエネルギー ($p < 0$, $\Lambda = 0$)?

重力レンズ $\propto$ (宇宙の幾何) $\times$ (宇宙の構造)

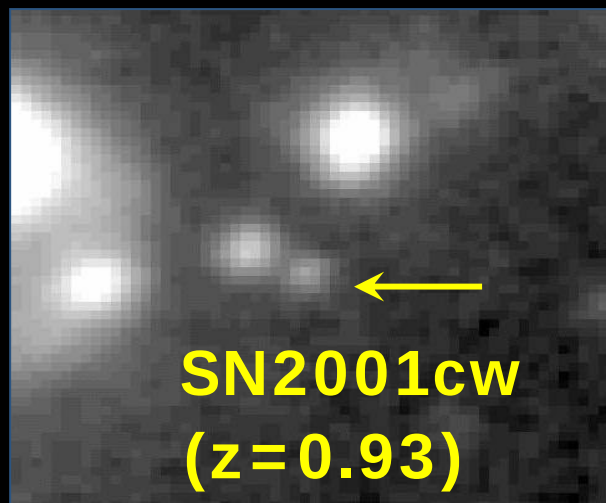
ダークエネルギーの “見え方”

- 宇宙膨張を加速させる
- 宇宙の幾何学を変える
- 宇宙構造の進化を変える
 - 超新星
 - マイクロ波背景輻射
 - 重力レンズ（高田）
 - バリオン振動（樽家）



宇宙の標準光源(ろうそく)

見かけの明るさ: F



絶対光度 L



(光度) 距離: D

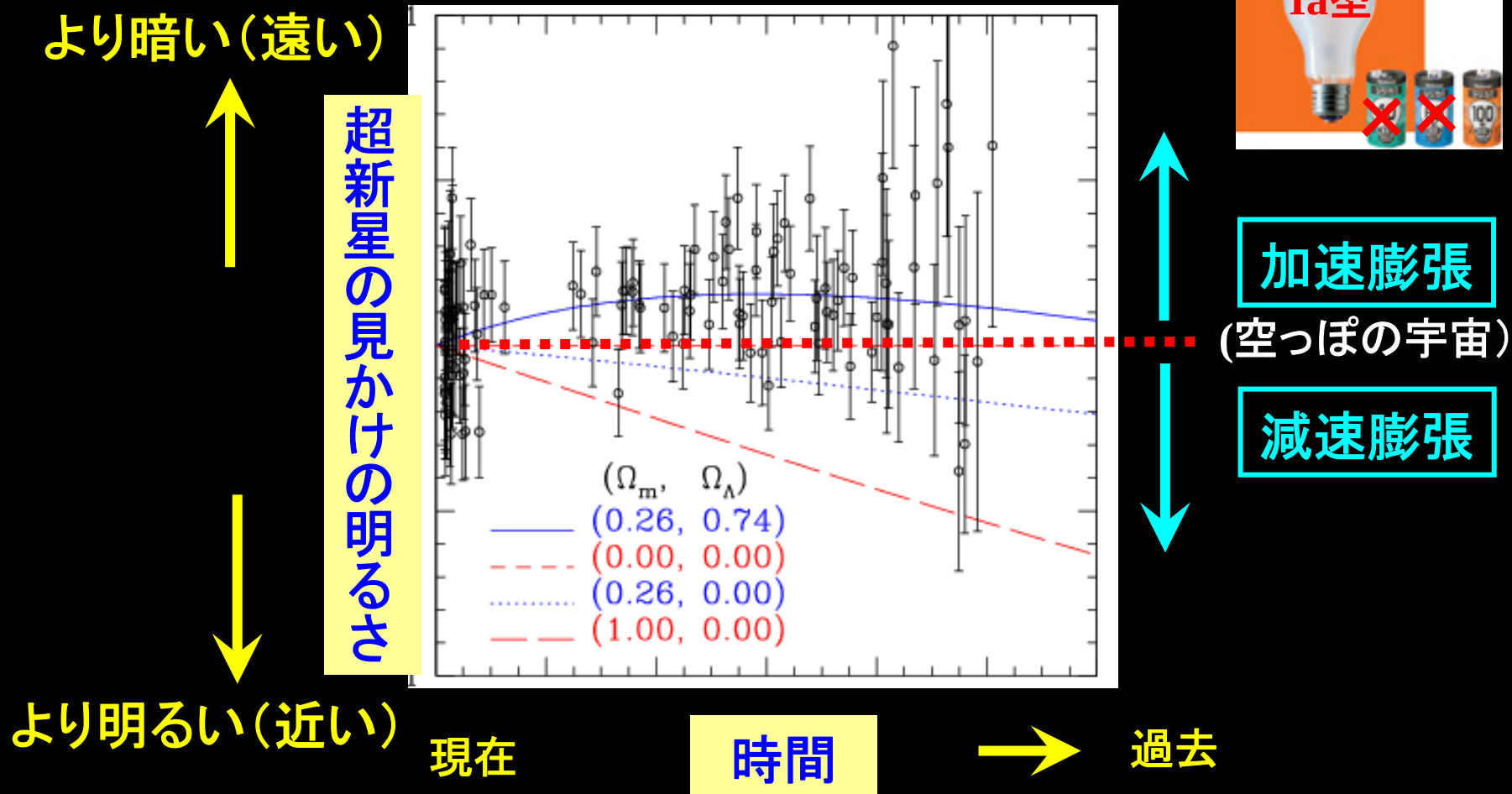


$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

距離の推定値

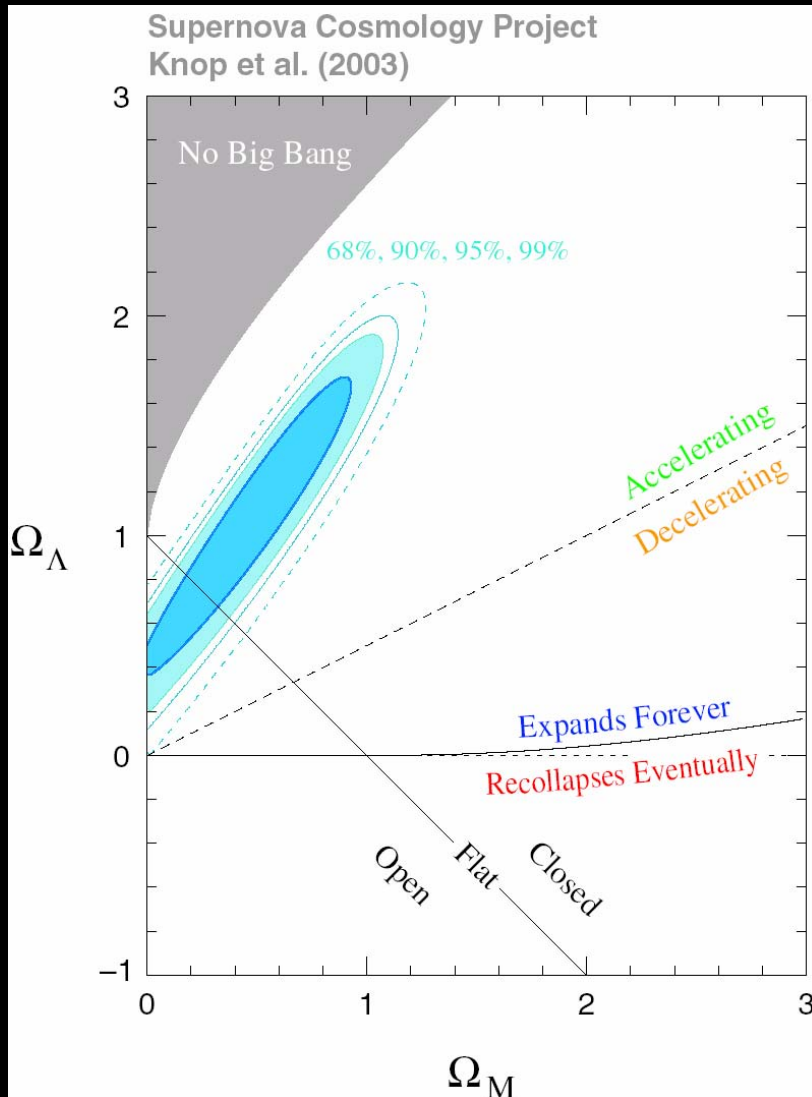
距離を時間の関数として得られれば、それと最も良く合うモデルとして、ダークエネルギーのパラメータが読み取れる

超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！(1998年)

超新星と宇宙の加速膨張



- 超新星から得られた宇宙の質量密度と宇宙定数の値への制限

- 宇宙の膨張加速度

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 現在の宇宙では

$$\left. \frac{\ddot{a}}{a} \right|_0 = H_0^2 \left(\Omega_{\Lambda} - \frac{\Omega_m}{2} \right)$$

- $\Omega_{\Lambda} > \Omega_m / 2$ であれば現在の宇宙は加速膨張

宇宙定数からダークエネルギーへ

■ 宇宙の状態方程式

- 圧力とエネルギー密度の比が $w \Rightarrow p = w \rho$
- $w=0$: ダークマター、 $w=1/3$: 輻射、 $w=-1$: 宇宙定数
- 相対論ではポワソン方程式は
$$\Delta \phi = 4 \pi G (\rho + 3p) = 4 \pi G \rho (1 + 3w)$$
なので
$$w < -1/3 \Rightarrow \text{万有斥力}$$
- w が時間に依存しなければ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
- $-1 < w < 0$: (一般の)ダークエネルギー
- ここまでくると、 w が定数である理由すらなくなる

$$w = w(t)$$

$w = -1$ かどうか、それが問題だ

- 単なるパラメータ化 (物理なし):

$$w(a) = w_0 + w_a(1-a) \quad \text{ここで } a = 1/(1+z)$$

- 宇宙定数 ($w_0 = -1$ & $w_a = 0$) ???

- $w_a = 0$ or $\neq 0$???

- $w_0 = -1$ or $\neq -1$???

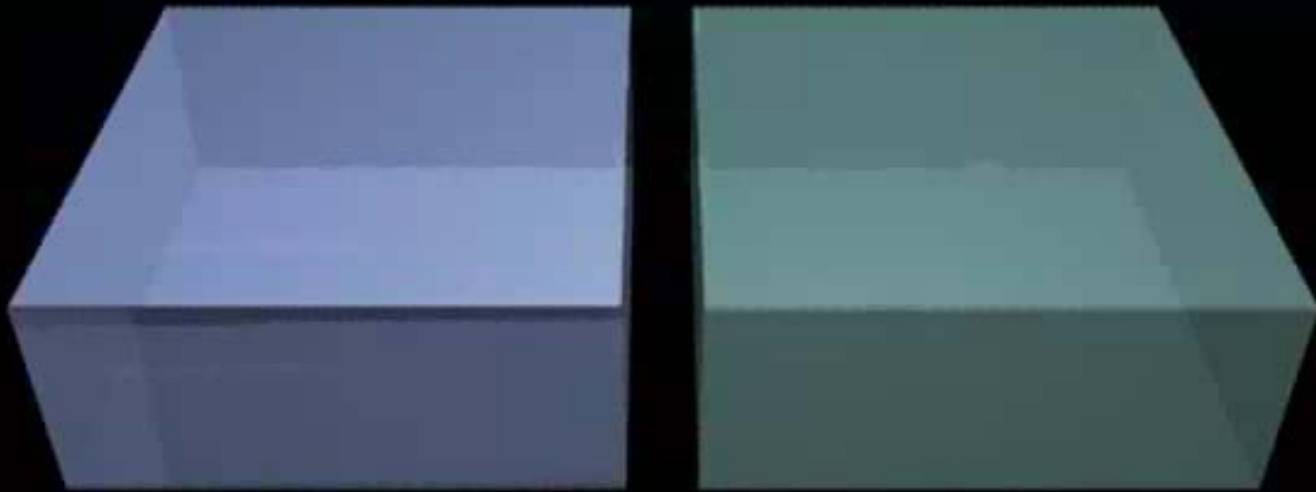
- まっとうな物理的モデルがほしいところだが、、、

- DGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) モデルとやらは、
おおまかには以下で近似できるらしい

$$w(a) = -\frac{1}{1 + \Omega_m(a)} \quad \text{where} \quad \Omega_m(a) = \frac{\Omega_m}{a^3} \left(\frac{H_0}{H(a)} \right)^2$$

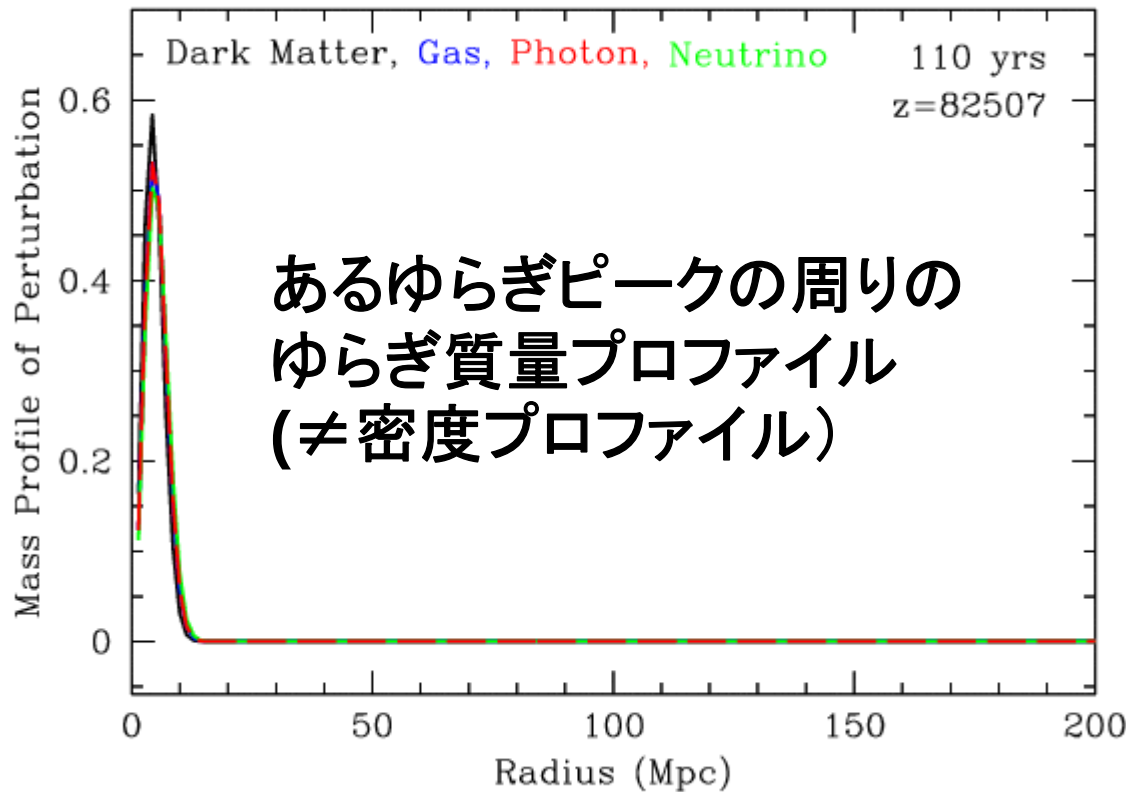
$$\Rightarrow w_0 = -0.78, w_a = 0.32 \quad \text{for} \quad \Omega_m = 0.27$$

CMB 音響振動



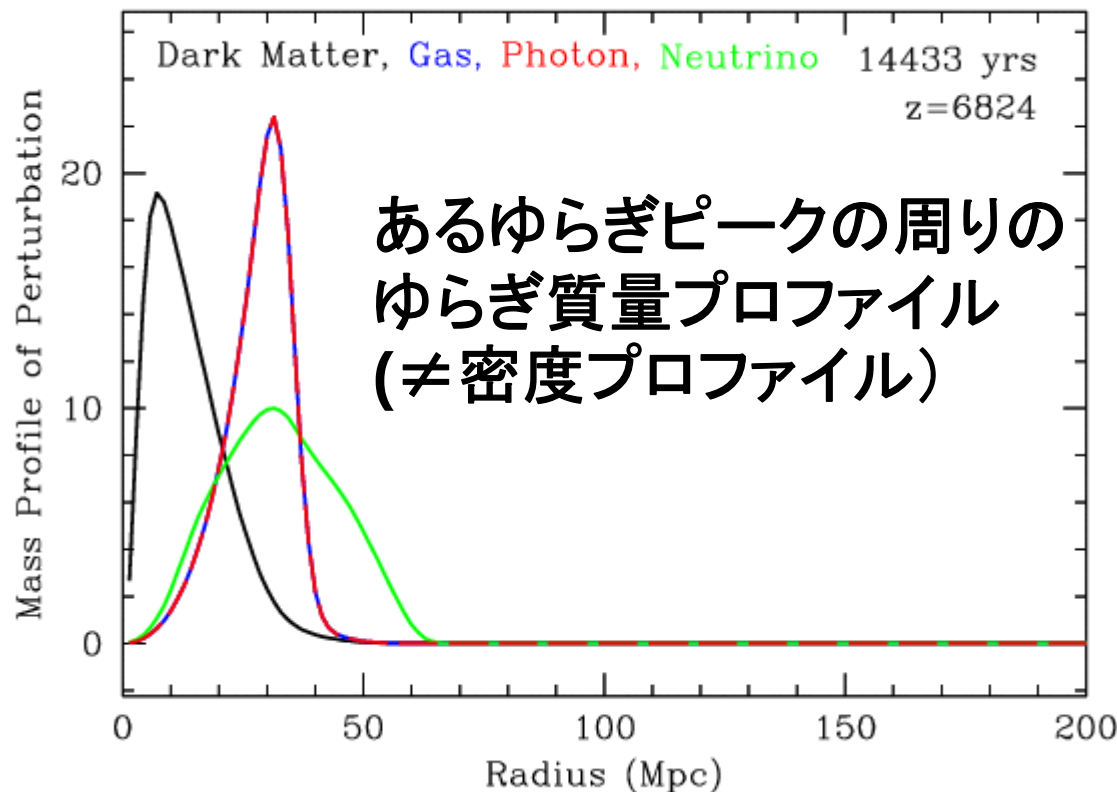
NASA/WMAP Science Team

バリオン振動 (1)



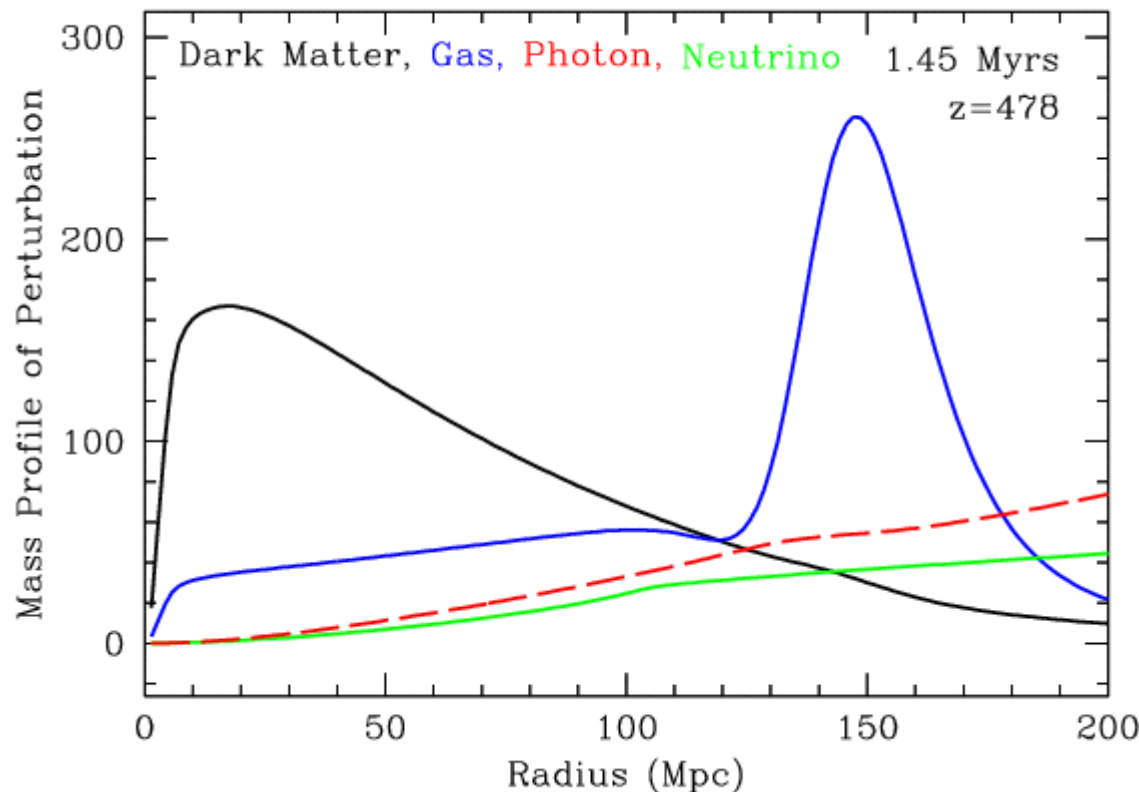
■ 宇宙初期では、
ダークマター、バリ
オンガス、光子、
ニュートリノの4成
分すべてが一流体
として振舞う

バリオン振動 (2)



- ニュートリノはほとんど相互作用しないので、外側へ自由に拡がる。
- **ダークマターは、重力だけを受けて基本的には中心にとどまろうとする。**
- バリオンガスと光子は一流体として振舞う。中心密度揺らぎは圧力でもあるので、それによって外側への弾性球面波として伝わる

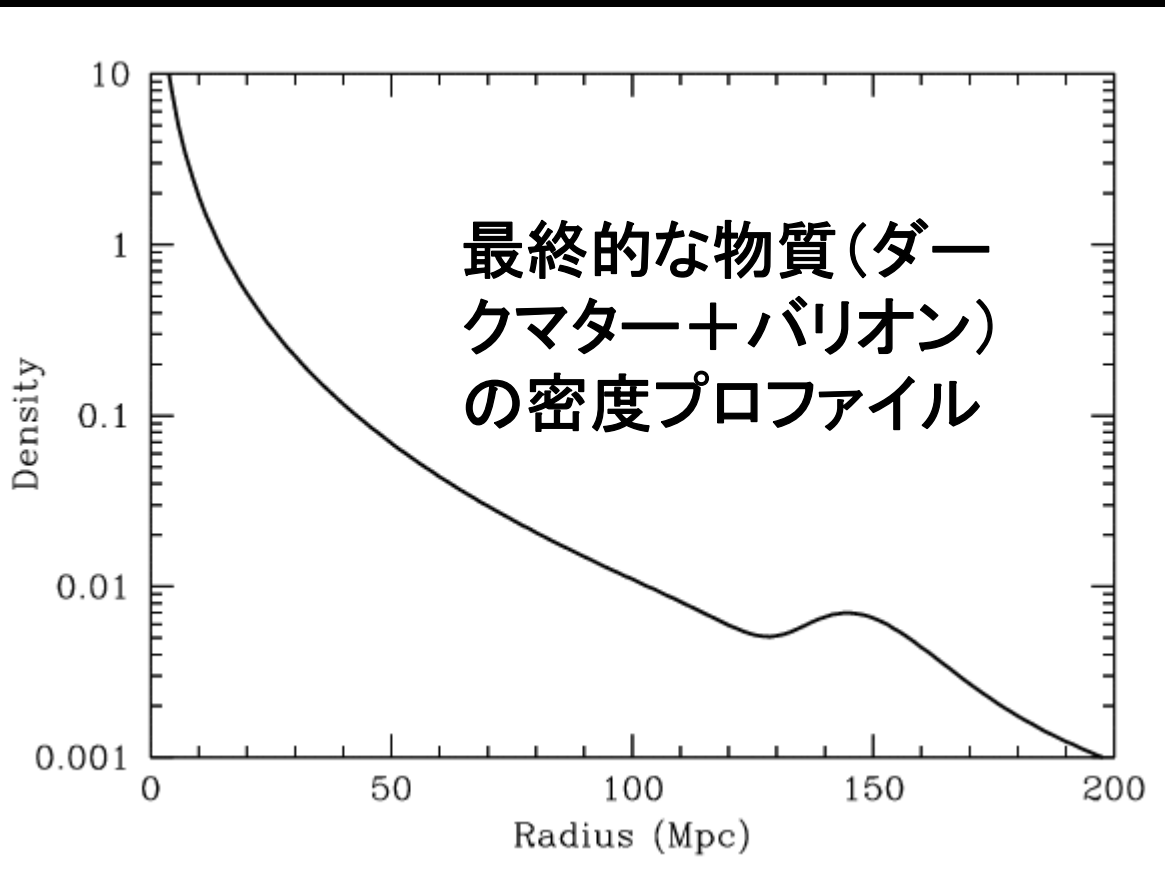
バリオン振動 (3)



■ 再結合($z=1000$)の前までは、バリオンガスと光子は一流体として振舞うが、その後相互作用が切れるにつれ、光子だけが外側へ逃げ始める。

■ **ダークマターのゆらぎは、自己重力によって成長を続ける。**

バリオン振動 (4)



■ バリオンガスと光子の相互作用が切れると、バリオンはダークマターのつくる重力ポテンシャルに落ち込んで揺らぎが成長する。

■ ダークマターは、バリオンゆらぎの作った弾性波ピークの付近での揺らぎの反作用を受け、小さなピークを作る。

音響地平線長

- 時刻 t までに音波が到達できる共動距離

ここで

$$r_s(t_{dec}) = \int_0^t \frac{c_s(t)}{a(t)} dt \quad (t < t_{dec})$$

$$c_s^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{1}{3} \frac{\partial p_\gamma}{\partial (\rho_\gamma + \rho_b)} = \frac{1}{3(1+R)}, \quad R \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma} = \frac{3\Omega_b}{4\Omega_\gamma} a$$

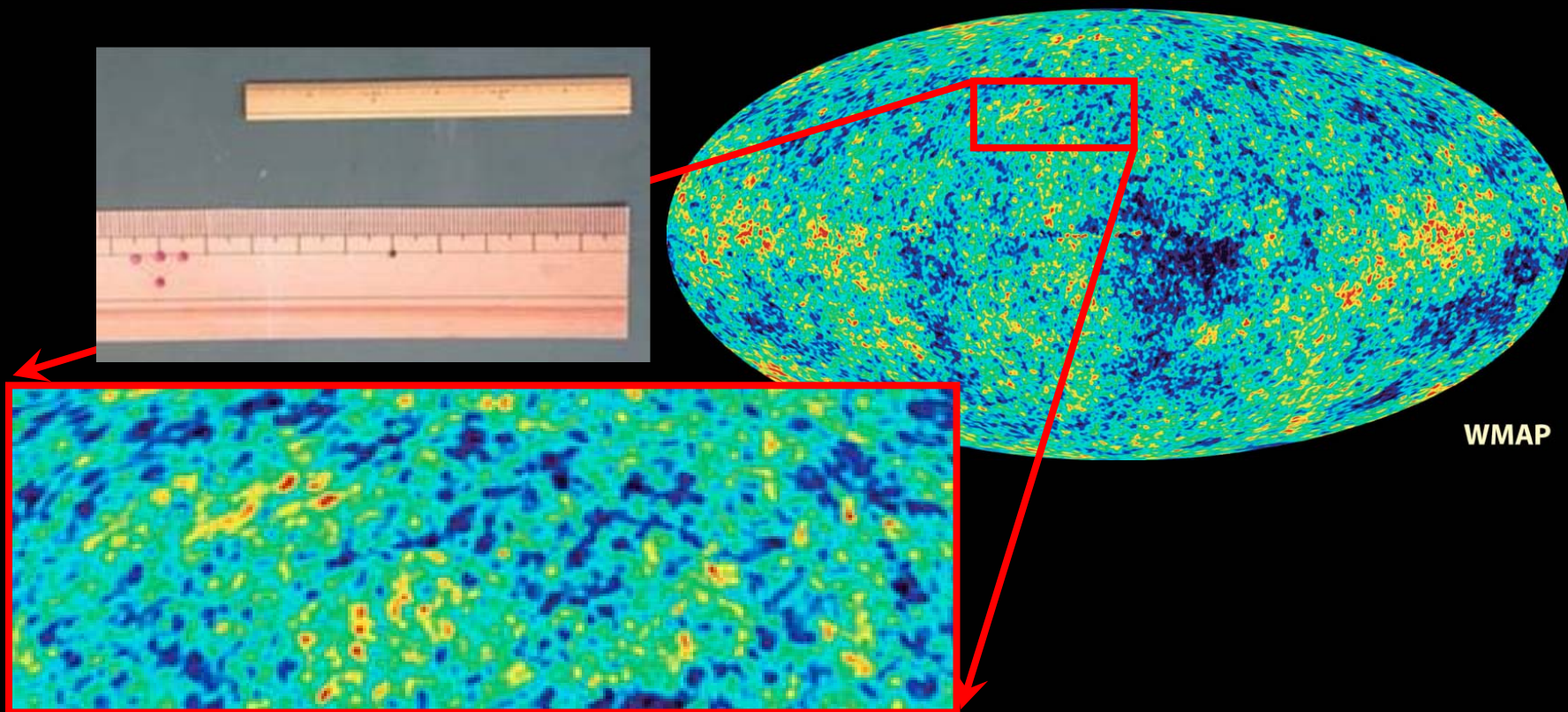
$$\frac{da}{dt} = \frac{H_0}{a} \sqrt{a\Omega_m + \Omega_{rad}}$$

- 具体的に計算すると

$$r_s(t_{dec}) = \frac{4\sqrt{\Omega_\gamma}}{3H_0\sqrt{\Omega_b\Omega_m}} \ln \left(\frac{\sqrt{a + \Omega_{rad}/\Omega_m} + \sqrt{a + 4\Omega_{rad}/3\Omega_b}}{\sqrt{\Omega_{rad}/\Omega_m} + \sqrt{4\Omega_{rad}/3\Omega_b}} \right)$$

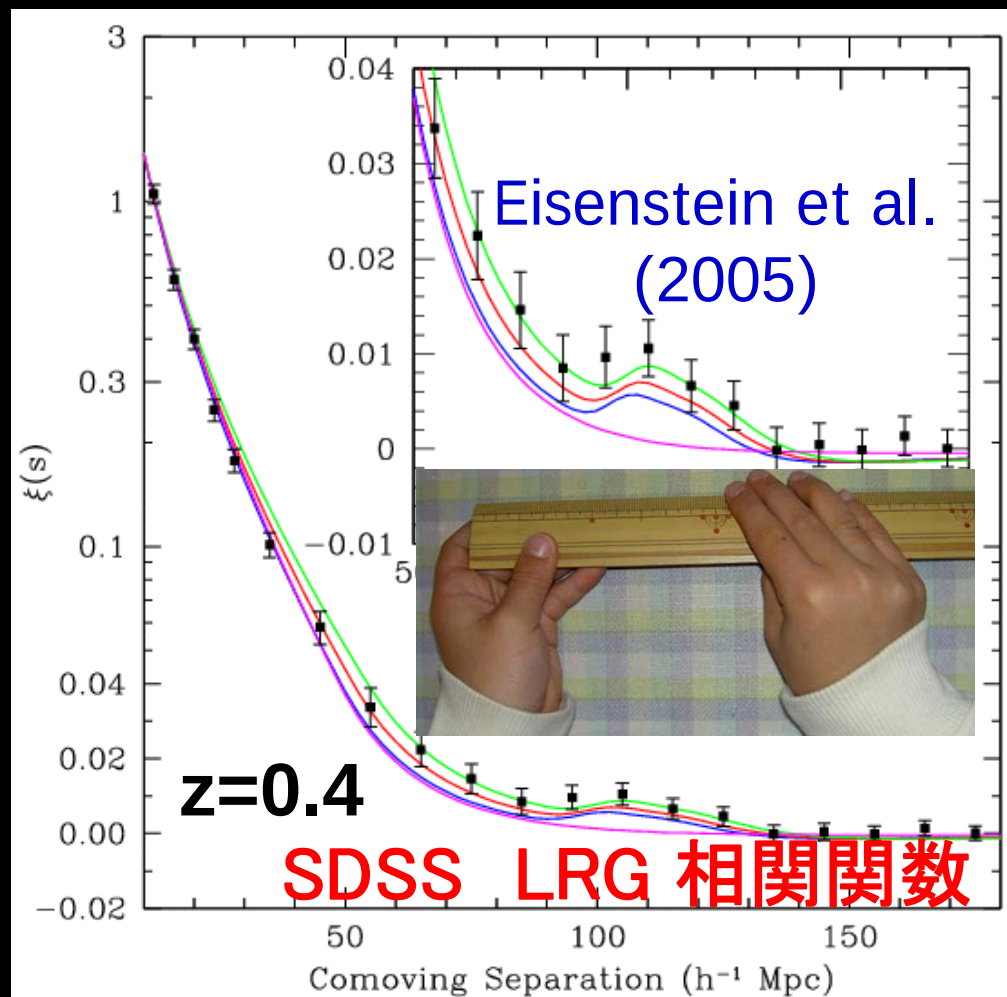
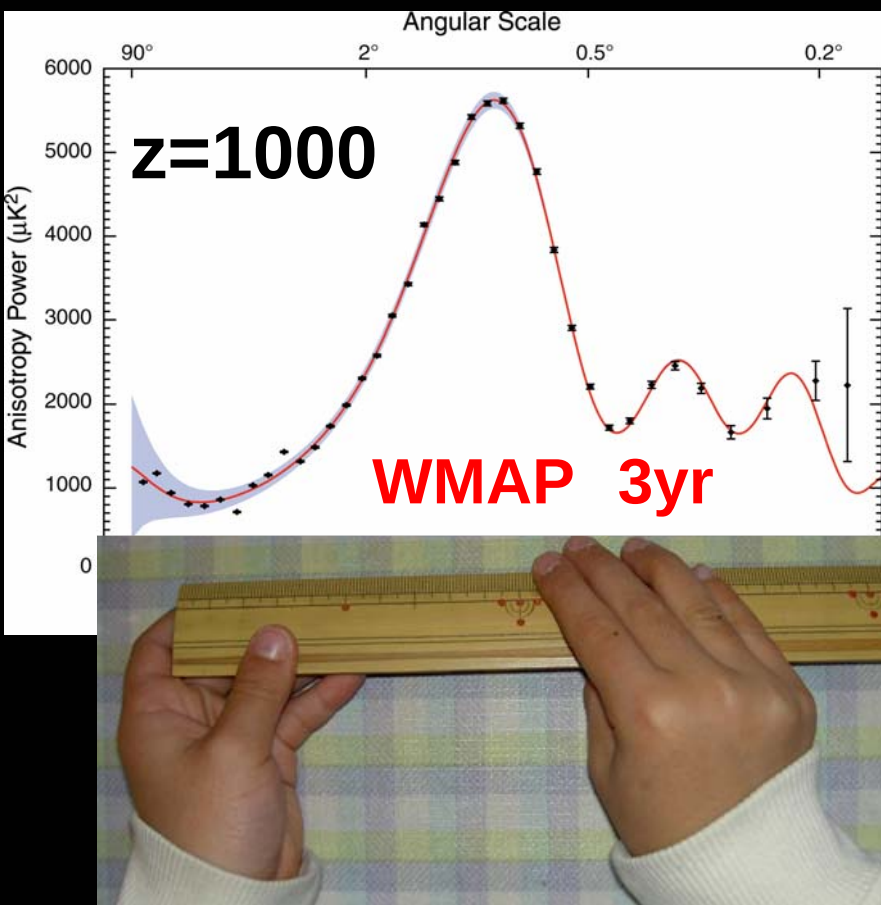
$$\approx 147(0.13/\Omega_m h^2)^{0.25} (0.024/\Omega_b h^2)^{0.08} \text{ Mpc}$$

CMB中のバリオン・光子振動(BAO)の痕跡



- 再結合時の音波の地平線長(=音速×宇宙時刻)
 - $147 (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25} (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08} \text{ Mpc}$
- これを幾何学的な標準もののさしとして、宇宙の距離を決定

CMBとバリオン振動(BAO)

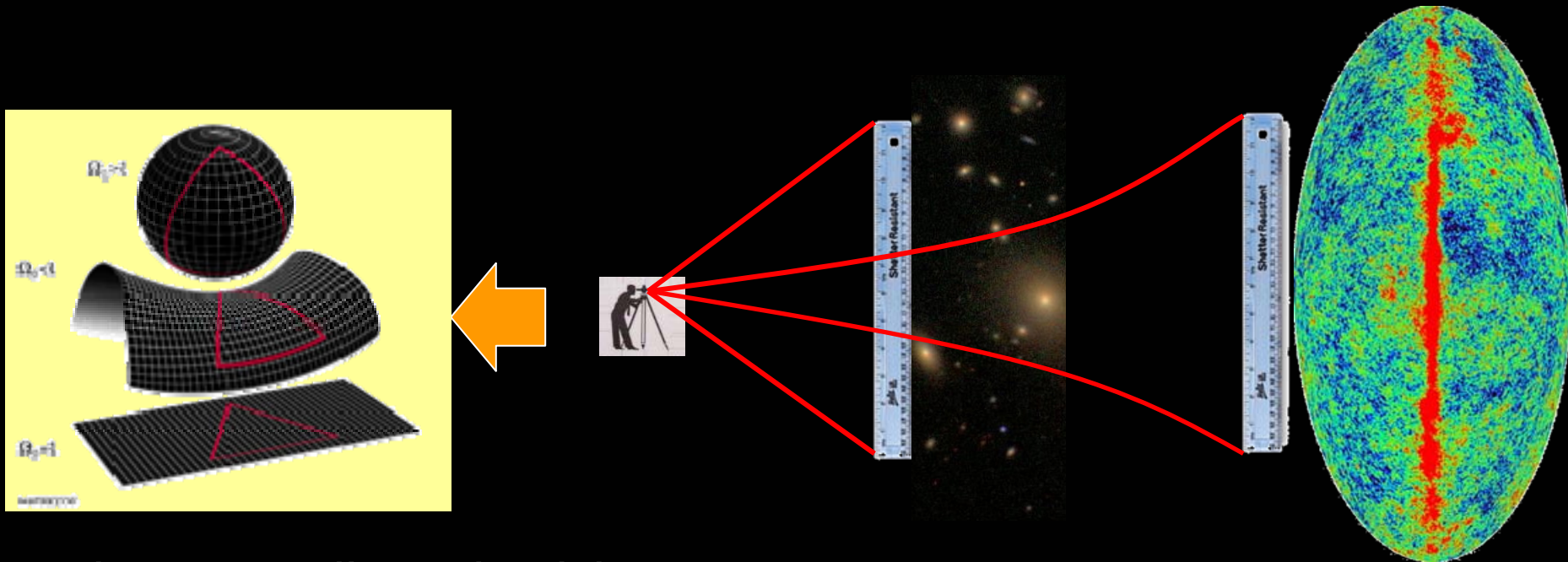


$$147(0.13/\Omega_m h^2)^{0.25} (0.024/\Omega_b h^2)^{0.08} \text{ Mpc}$$

標準ものさしとしてのBAO

$$r_s = 147(0.13/\Omega_m h^2)^{0.25} (0.024/\Omega_b h^2)^{0.08} \text{ Mpc}$$

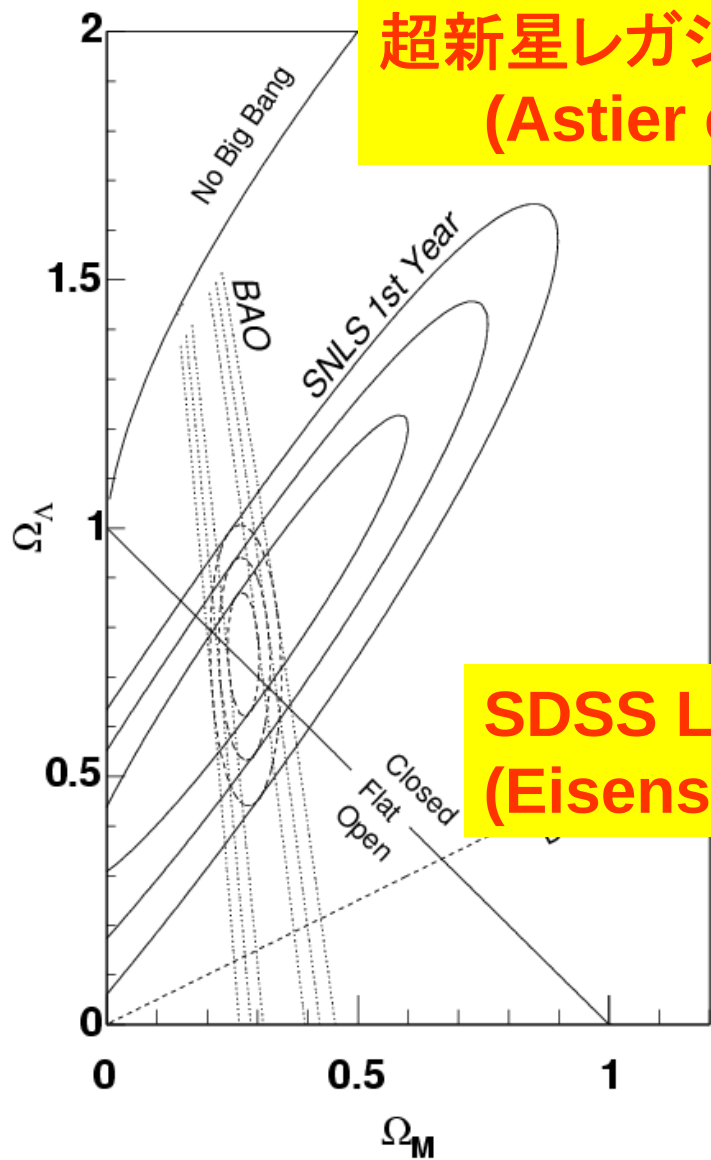
- 異なる時刻の宇宙までの距離を測定
- 観測的にダークエネルギーを制限する有力な方法



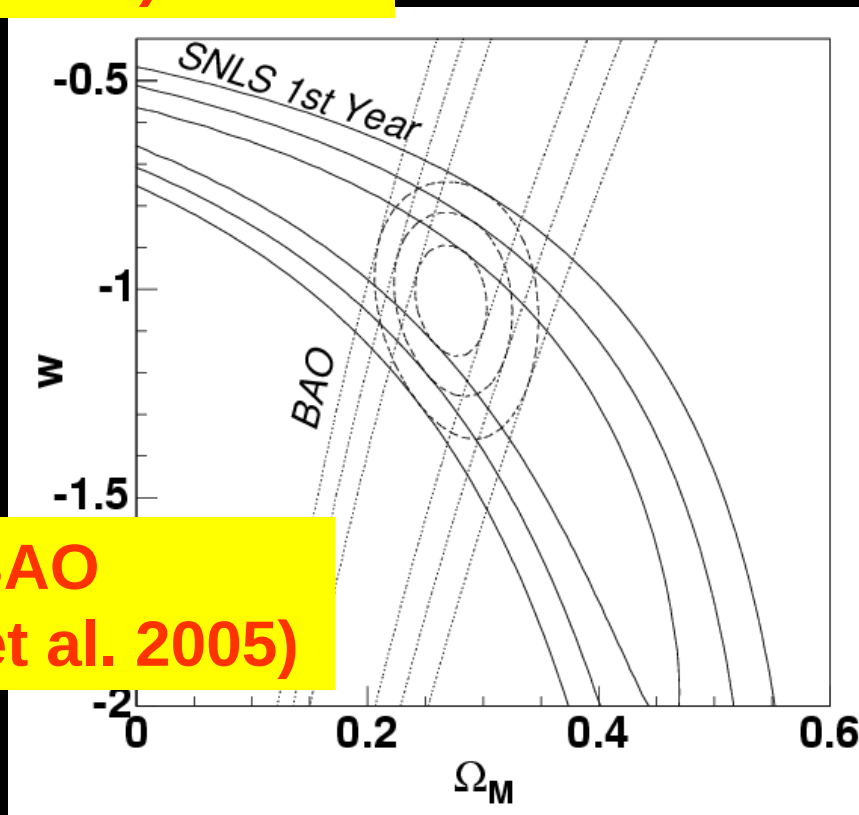
Picture credit: Bob Nichol

超新星とBAOからのダークエネルギーへの制限

超新星レガシーサーベイ1年目
(Astier et al. 2006)



SDSS LRG BAO
(Eisenstein et al. 2005)

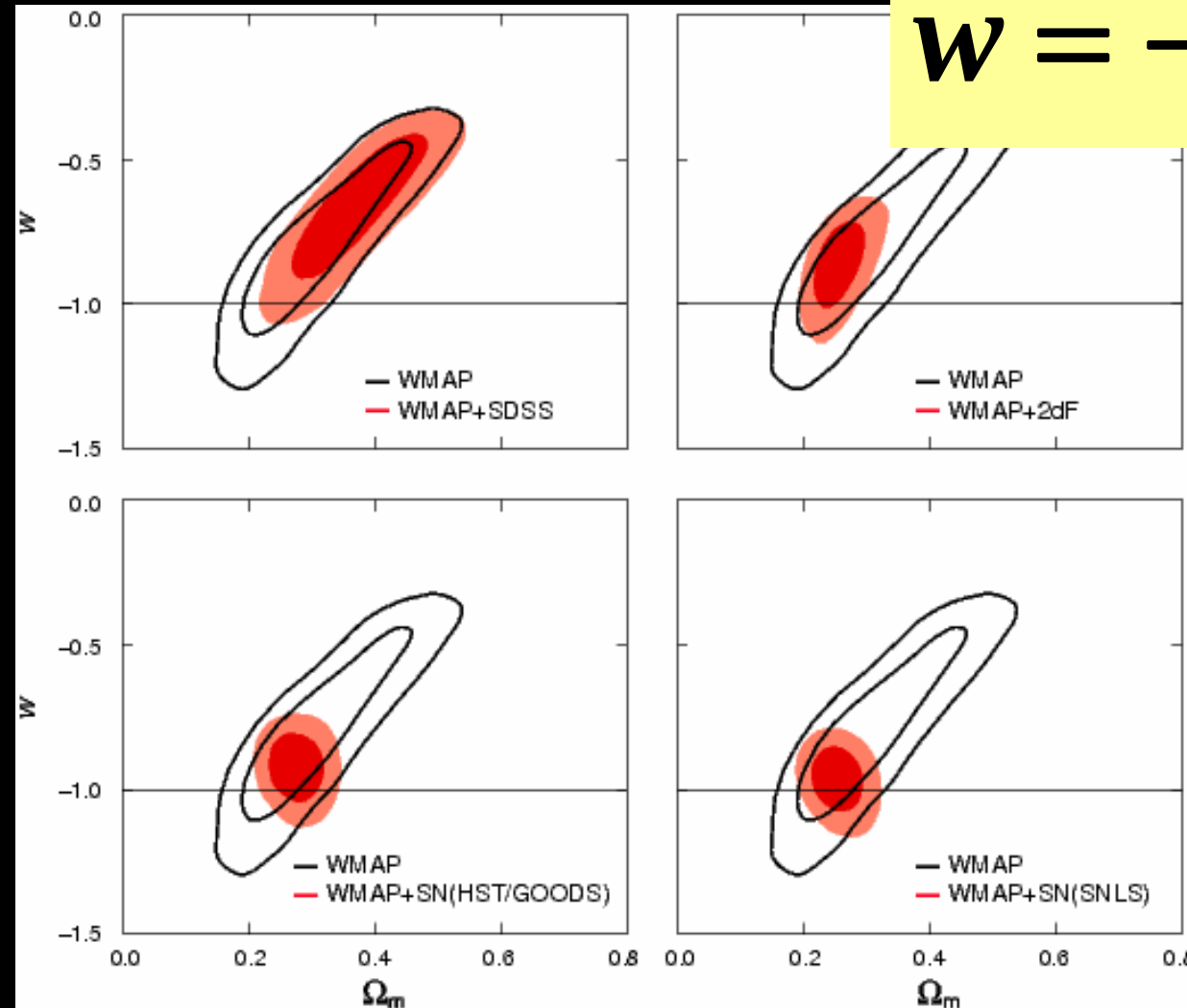


$w = -1.023 \pm 0.090$ (系統誤差)
 ± 0.054 (統計誤差)

WMAP 3yrと他の観測を組み合わせて 得られたダークエネルギーの制限

$$w = -0.926^{+0.051}_{-0.075}$$

1パーセントレ
ベルでの制限
を課せるかど
うかが将来計
画の鍵



特定領域研究「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」

計画研究A01（国立天文台チーム）：重力レンズ効果を用いた

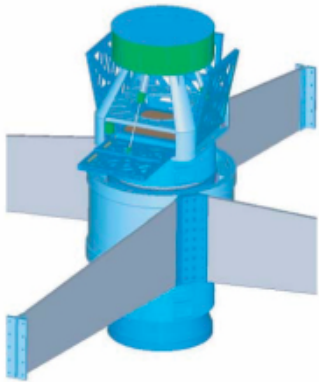
ダークマター探査

計画研究A02（東大 高エネルギー素粒子実験チーム）：重力レンズ

効果を用いたダークエネルギーの研究

超広視野カメラHyperSuprimeの製作

すばる望遠鏡



総括班
調整

計画研究B01（名古屋大理論）：銀河分布を用いた
ダークエネルギーの研究

計画研究B02（東北大理論）：重力レンズ効果による暗黒物質分布
と宇宙の構造形成史の解明

公募研究：超新星探査とダークエネルギー性質解明に関する理論
および観測的研究

- 研究代表者：唐牛宏
- 2006年度採択
- 2006年～2011年の6年計画
- Hyper Suprime-Camを建設し、測光サーベイ観測でダークエネルギーに迫る（宮崎）
 - 宮崎聡：CCD
 - 相原博昭：DAQ
 - 寄生虫；理論？

HSC: 2006年から2011年の年次計画

- 2006-2007年: telescope interface design, optical system + CCD prototype
- 2007-2008年: fabrication of each component
- 2009年: integration of the system
- 2010年: *first light*
- 2011年: 1000 deg² サーベイ終了
- 2012年以降: さらに1000 deg² サーベイの追加観測

暗黒エネルギー研究国際ネットワーク

JSPS 日本学術振興会

先端研究拠点事業

JSPS Core-to-Core Program

暗黒エネルギー研究国際ネットワーク

DENET

2007年4月
～2009年3月



英国

エジンバラ大学
王立天文台

ポーツマス大学
オックスフォード大学
ロンドン大学

東京大学
ビッグバン宇宙
国際研究センター

東北大学

広島大学

名古屋大学

国立天文台

京都大学

米国

カリフォルニア
工科大学
天文学教室

プリンストン大学
宇宙科学教室

マサチューセッツ工科大学
宇宙望遠鏡研究所
シカゴ大学



2007年6月7日 DENET研究会
東大小柴ホール

2007 年 6 月 8 日 (金)

東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター

第二回公開講演会

宇宙の進化とダークエネルギー

17 : 30-17 : 50 須藤靖 (東京大学大学院理学系研究科)

ダークエネルギーの概説・講師紹介

17 : 50-19 : 00 David Spergel
(プリンストン大学宇宙科学教室)

Taking the Universe's Baby Picture

この講演は英語で行いますが講演スライドは日本語訳したものを用います

開場 17:00

会場前に茶菓を用意してお待ちしています

入場無料、申し込み不要

定員 170 名 (当日先着順)

場所 : 東京大学本郷キャンパス
理学部一号館 2 階小柴ホール

URL : <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/denet>

問合せ : toiawase@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



WF MOS: すばる+Geminiの分光サーベイ

- すばる主焦点に口径 1.5° の広視野カメラ
- 4000天体分光器による赤方偏移サーベイ
 - $0.5 < z < 1.3$: emission line galaxies
 - 2×10^6 個/2000平方度 $\Rightarrow$ 1400ポインティング(900時間)
 - $2.3 < z < 3.3$: Lyman-break galaxies
 - 6×10^5 個/300平方度 $\Rightarrow$ 200ポインティング(800時間)
- 銀河空間分布のバリオン振動スケールを決定し、 $H(z)$, $D_A(z)$ を1%レベルで決定
- w を $\pm 3\%$?, dw/dz を $\pm 25\%$?の精度で決定
 - $\Rightarrow$ ダークエネルギーを観測的に絞り込む

ダークエネルギー or 一般相対論の限界？

Yamamoto, Bassett, Nichol, Suto & Yahata
PRD 74(2006)063525, astro-ph/0605278

■ フリードマン方程式の変更をパラメータ化

$$H^2 - \frac{H^{2/n}}{r_c^{2-2/n}} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

■ $n=2$: DGP model, $n=\infty$: 宇宙定数

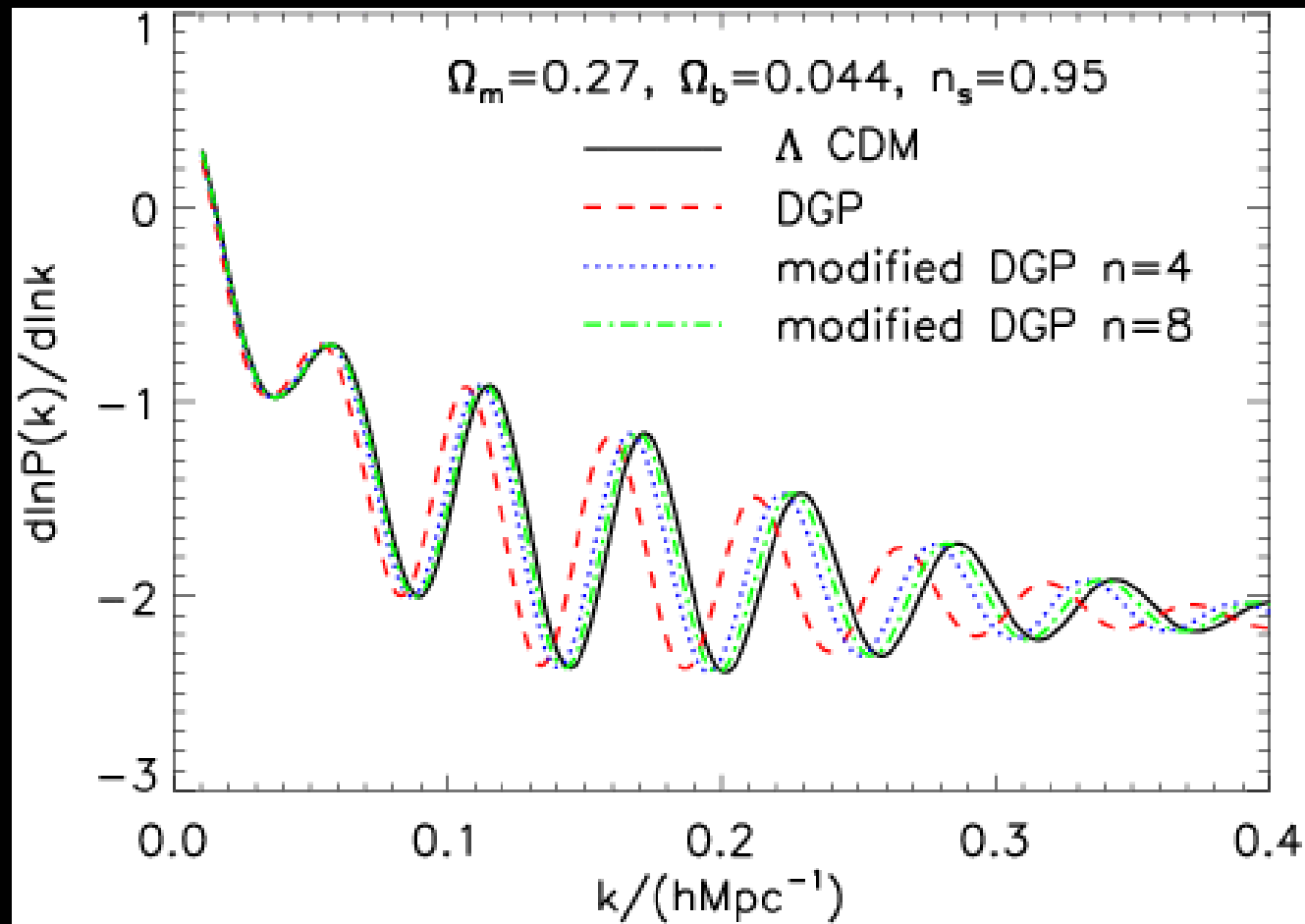
■ r_c がスケールを与える $\sim 1/H_0$

■ $r < r_c$: 4D時空的重力, $r > r_c$: 5D時空的重力

■ 平坦な宇宙では

$$(H_0 r_c)^{2/n-2} = 1 - \Omega_m$$

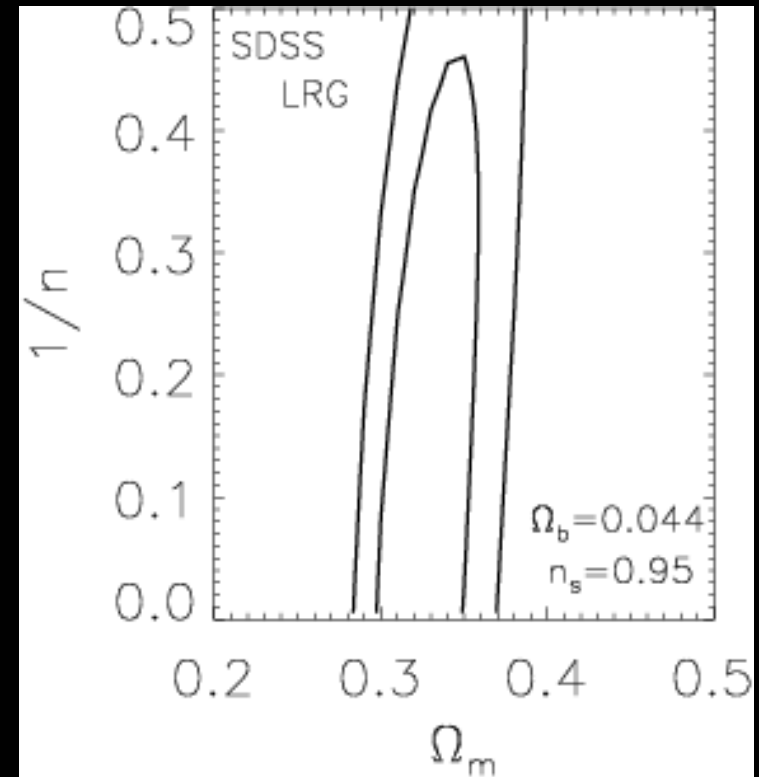
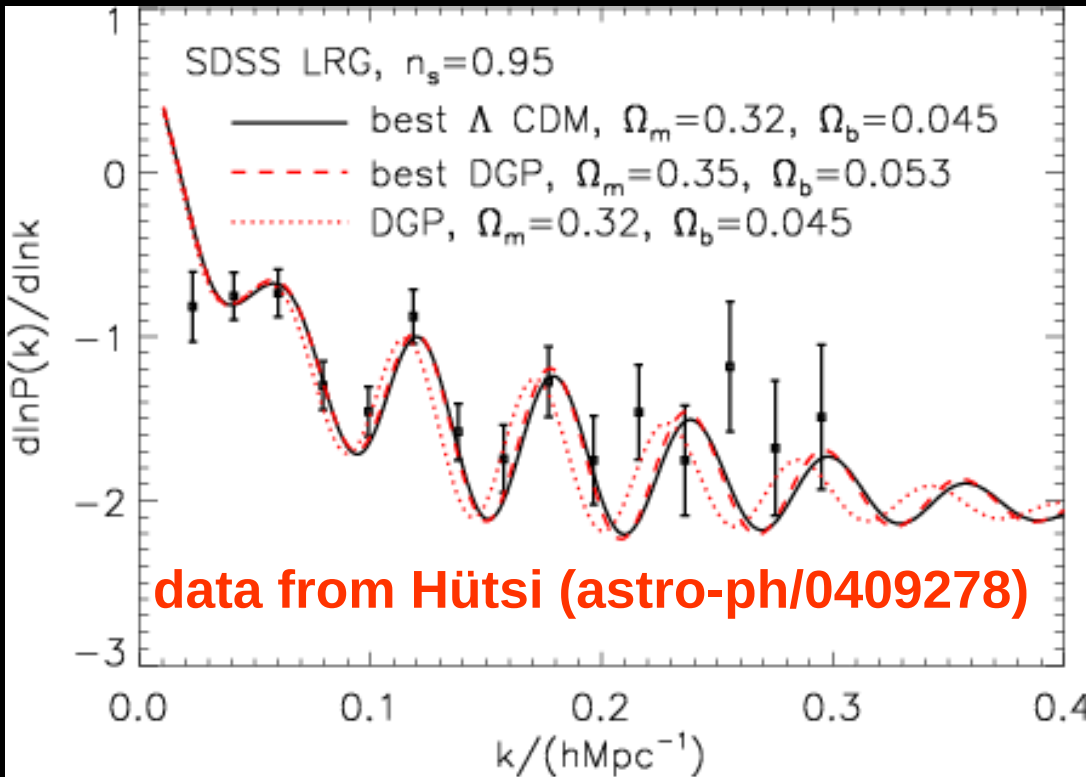
予言されるBAO の位相のずれ



線形理論（ Λ CDM パラメータを仮定したときの観測結果の予言）

Yamamoto et al. PRD 74 (2006) 063525

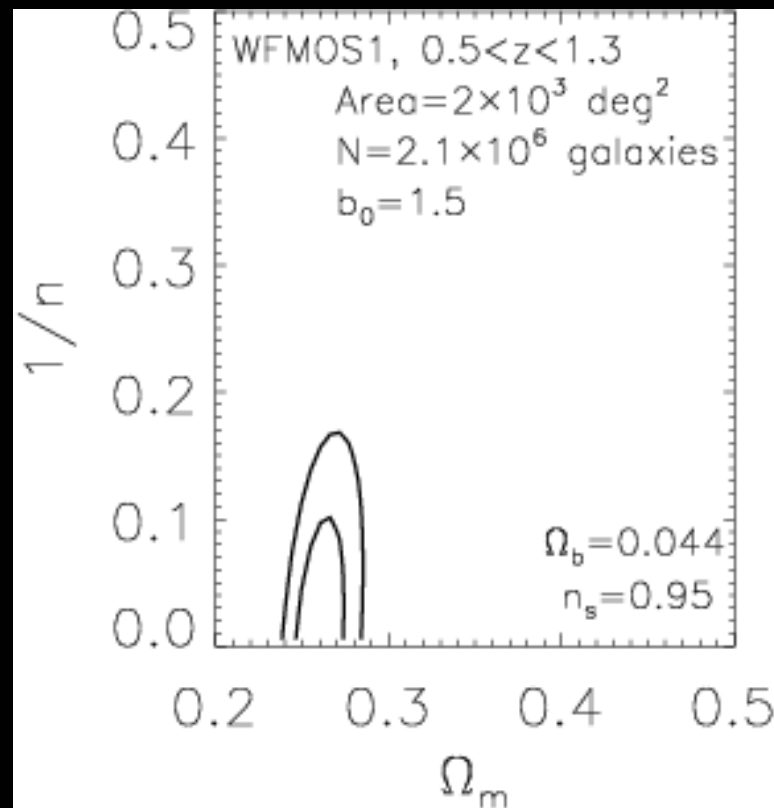
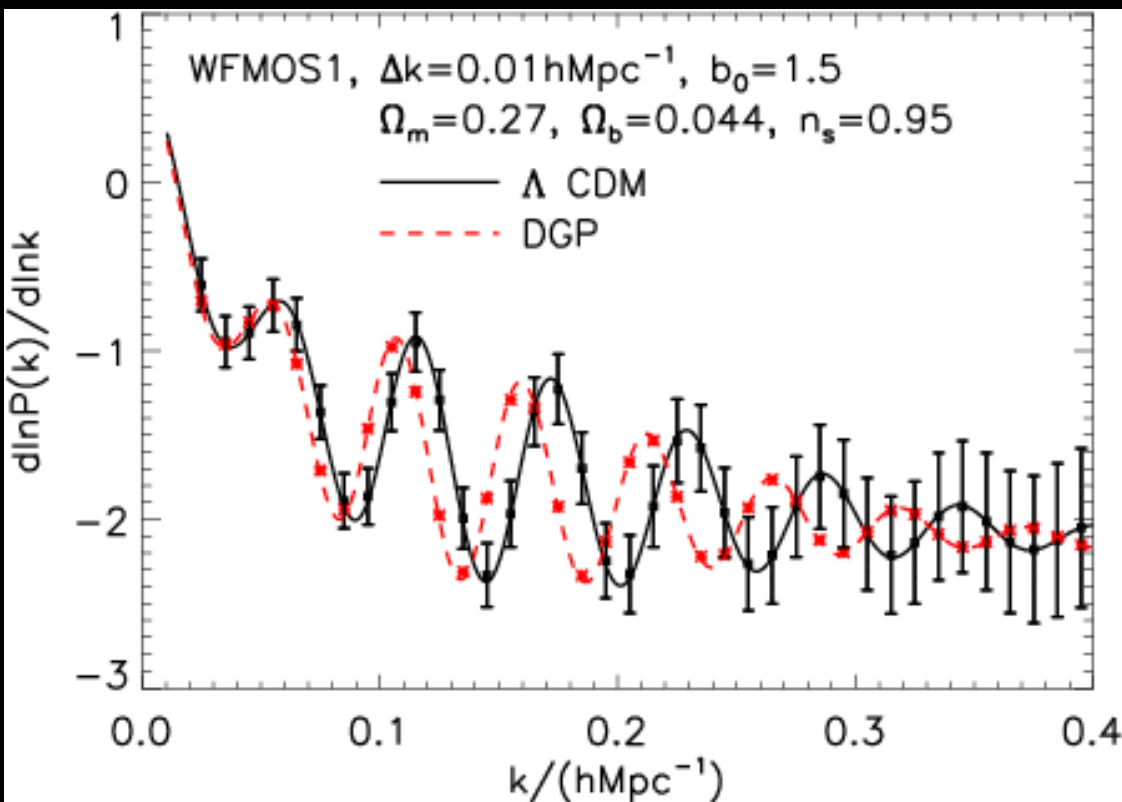
SDSS銀河データを用いた現時点での制限



fit to linear theory for $k < 0.2 h \text{Mpc}^{-1}$
observation in Λ CDM assumed

Yamamoto et al. PRD 74 (2006) 063525

WFMOS $z=1$ 銀河データから予想される フリードマン方程式からのずれへの制限



ダークエネルギー探査は天文学にとってプラスかマイナスか？

Fundamental physics: why dark energy is bad for astronomy

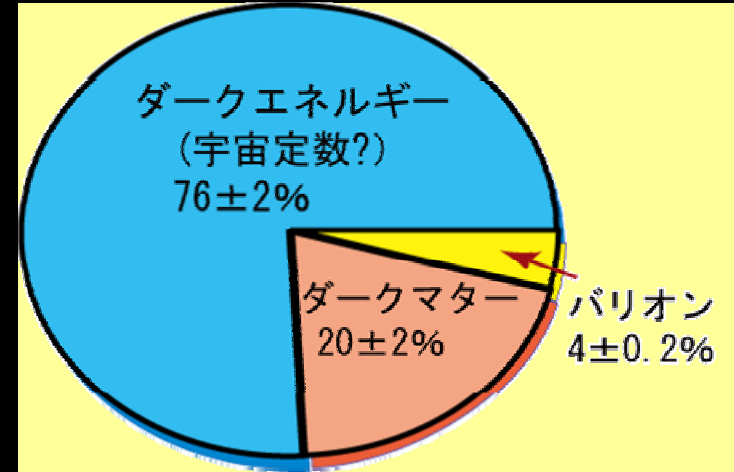
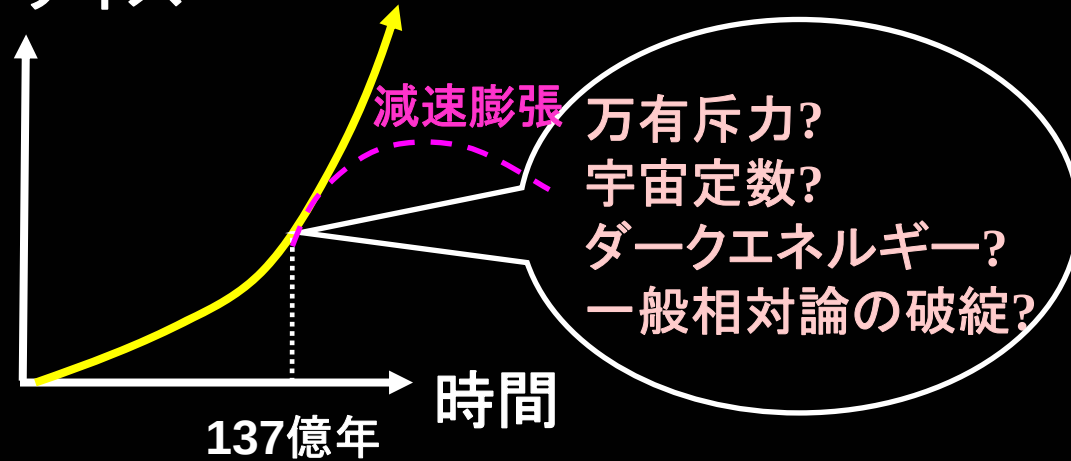
Simon D.M. White, astro-ph/0704.2291

- **原理主義者（例：高エネルギー物理学）**
 - 唯一の明確なゴールの探求 (LHC, WMAP)
 - 大人数による国際共同研究 (意見調整が難しい)
- **博物学者（例：天文学）**
 - 多種多様の用途 (ハッブル宇宙望遠鏡, SDSS)
 - 比較的少人数 (家族的、和気藹々、ちまちま)
- **文化・価値観・趣味の違い**
- **ダークエネルギー探査と従来の天文学の共生**

ダークエネルギーの未来は明るい！

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



- 宇宙の加速膨張の原因は何か？
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- いずれであろうと21世紀の物理学を切り拓く鍵