

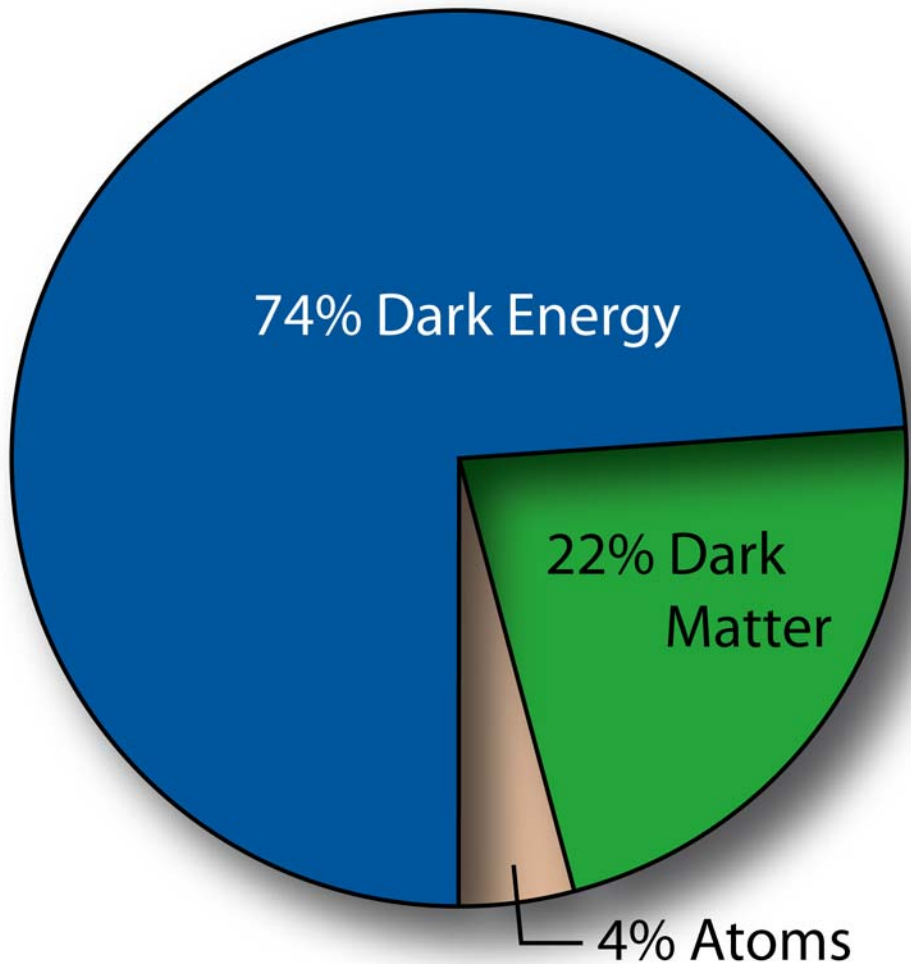
ダークエネルギー観測： 現状と展望

高田 昌広

(東北大)

May 28, 07 @ U. Tokyo

加速宇宙膨張



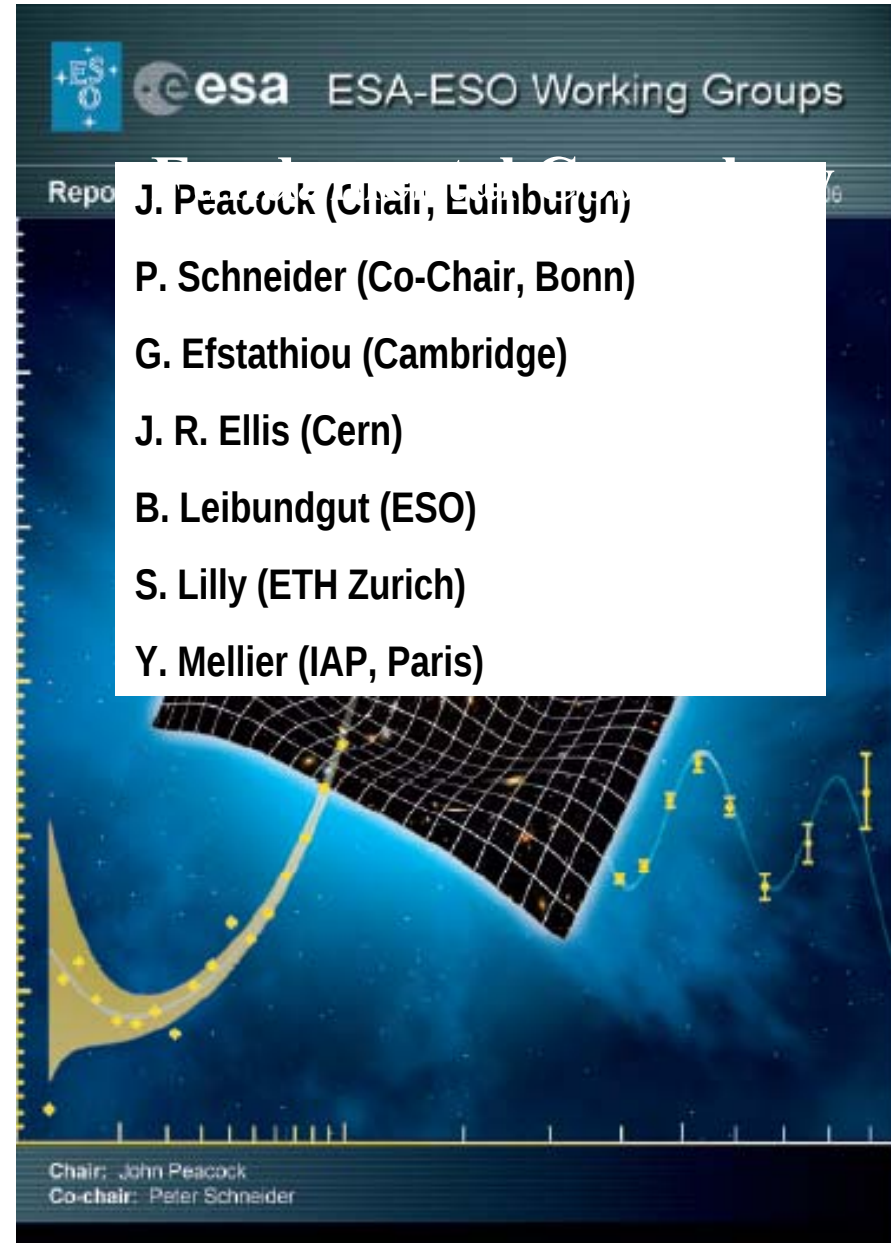
From WMAP website

- 宇宙のエネルギーの約96%が **Dark Matter + DE**
- 暗黒成分の解明が、来る10年(?)の最重要課題
- 特に、DEの制限は天文学観測だけが唯一の手段

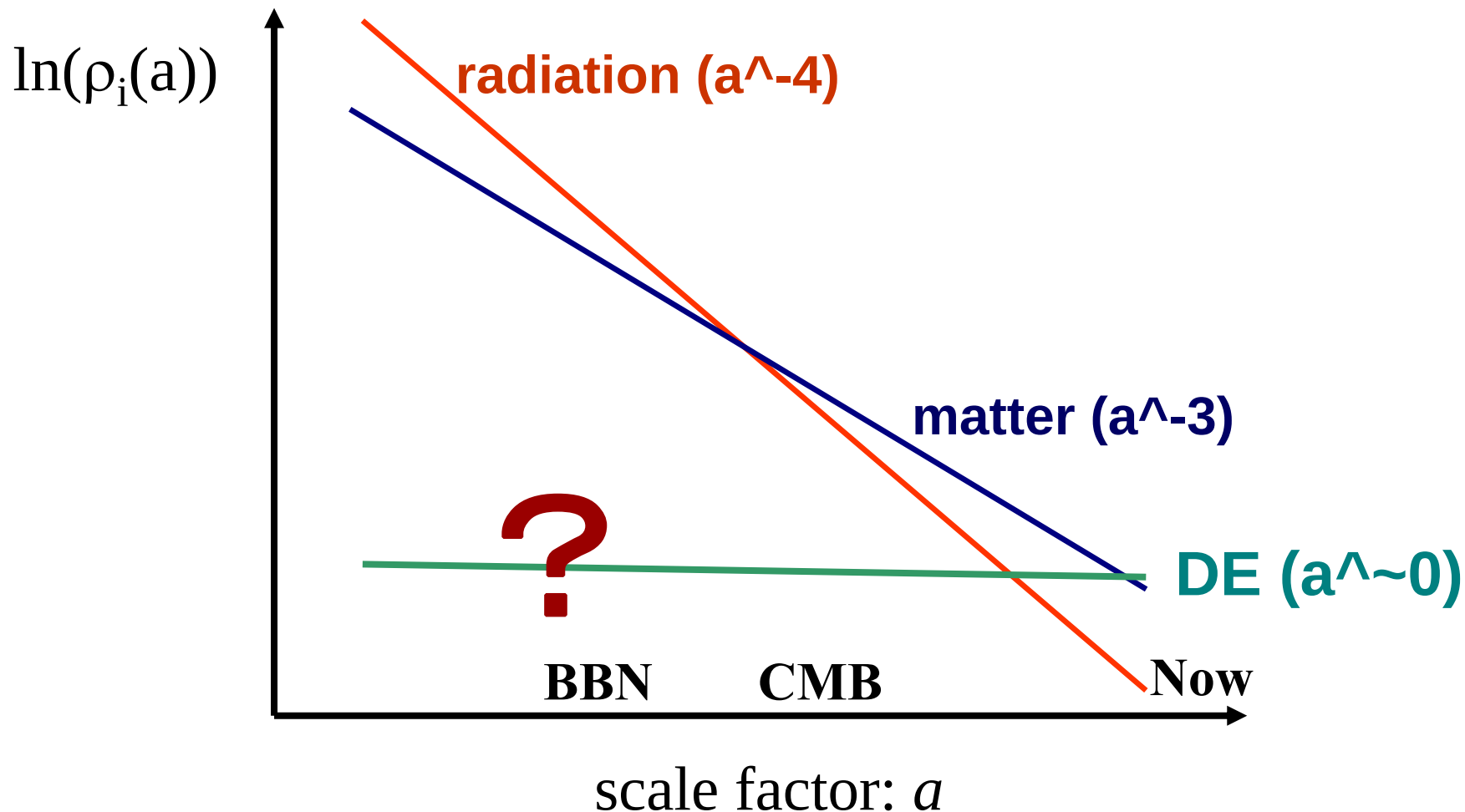
Dark Energy Task Force

REPORT OF THE

A. Albrecht (UC Davis)
G. Bernstein (Penn)
R. Chan (LBNL)
W. Freedman (Carnegie)
J. Hewitt (MIT)
W. Hu (Chicago)
J. Huth (Harvard)
M. Kamionkowski (Caltech)
E. Kolb (Chair, Chicago)
L. Knox (UC Davis)
J. Mather (Goddard)
S. Staggs (Princeton)
N. Suntzeff (Texas A&M)



Coincidence problem



- Late-time DEは、宇宙の膨張史において現在近くでのみ支配的になる

ダークエネルギー探査

$$\text{検証: } \rho_{\text{de}} = \rho_{\text{de}}(t)$$

- 状態方程式パラメータ: $w = p_{\text{de}}/\rho_{\text{de}}$, **検証 $w \neq -1$**
- ハッブル膨張

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_{de} (1+z)^{3(1+w)} \right]$$

- 角径距離

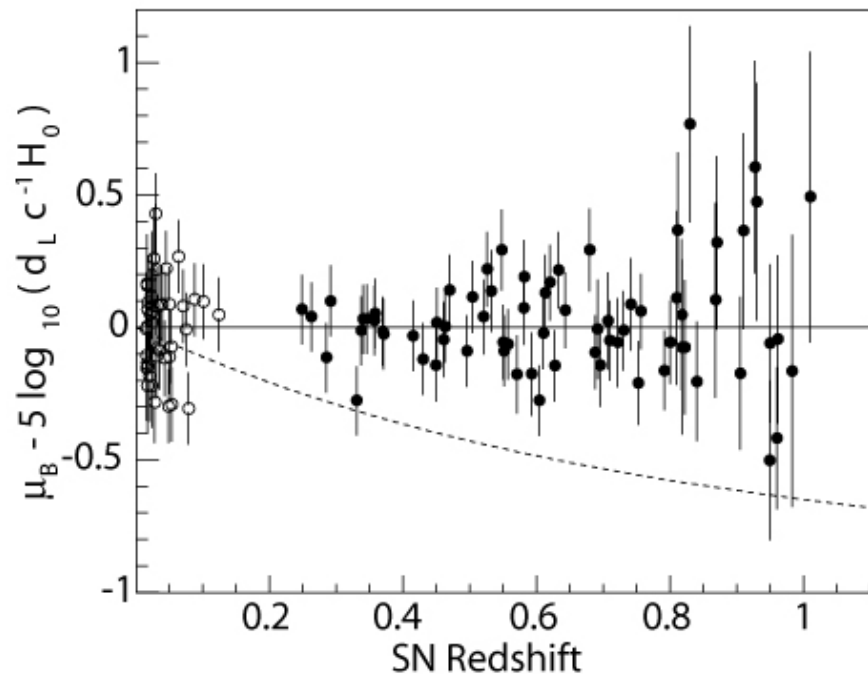
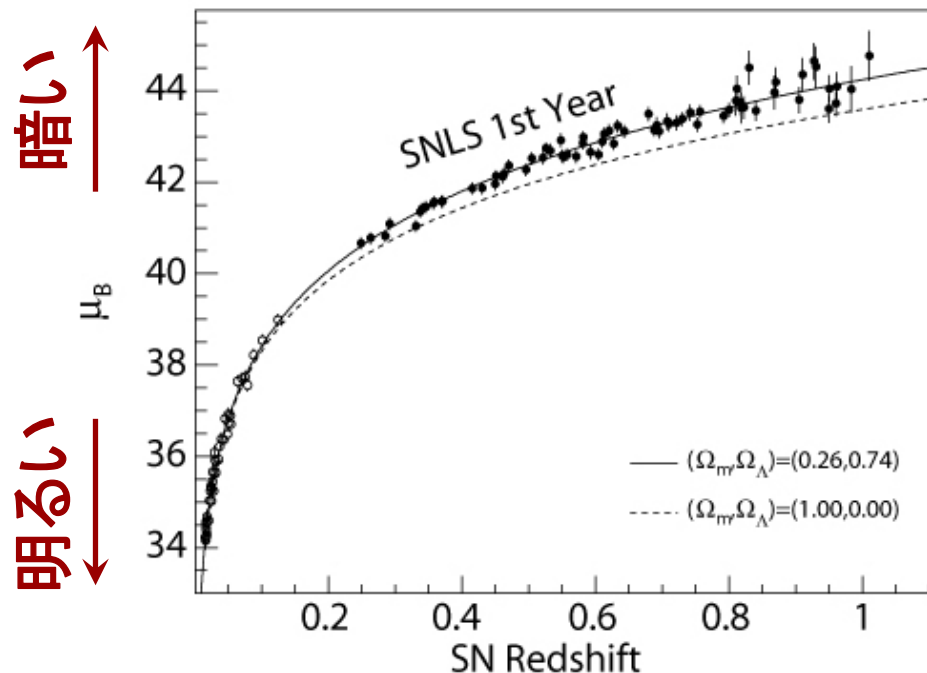
$$D_A(z) = (1+z)^{-1} \int_0^z dz' \frac{1}{H(z')}$$

- 光度距離

$$D_L(z) = (1+z)^2 D_A(z)$$

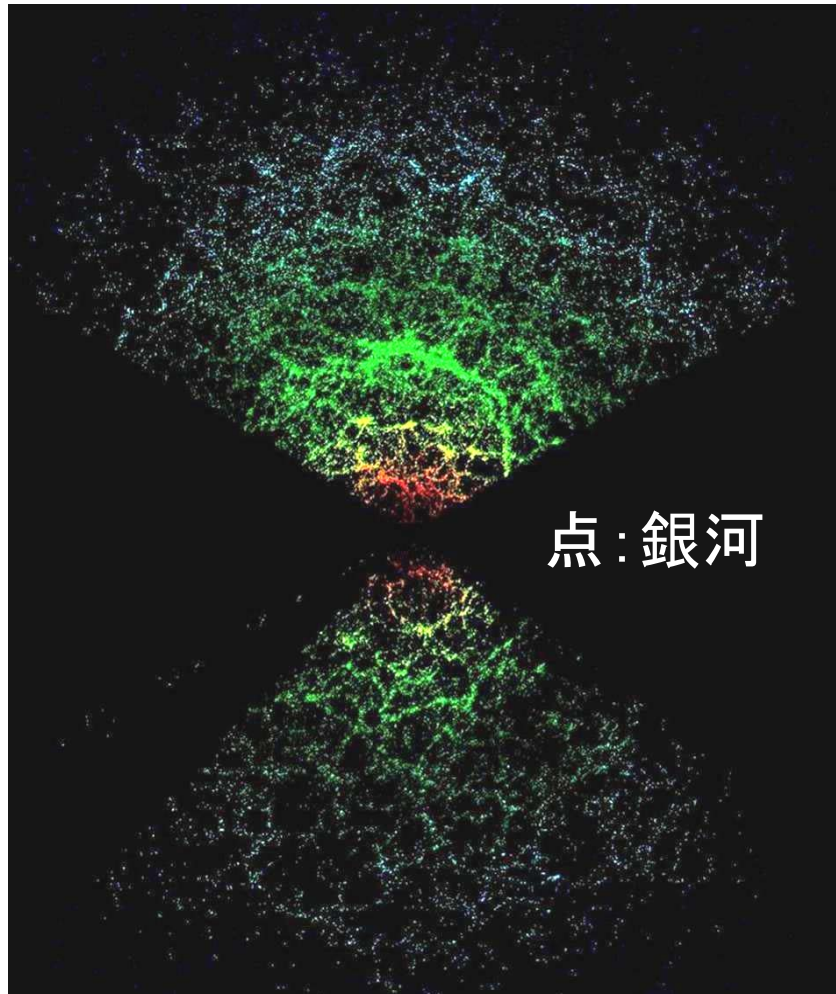
Type Ia SNe

- Astier et al. 06
 - SNLS: CFHT(4m)による超新星サーベイ
 - 71個の超新星を最初の1年間(計5年間計画)で発見
- Type Ia SNeの方法は、経験則に基づく
- すでに系統誤差リミット(?)



ダークエネルギー探査: 宇宙の構造形成

SDSS survey (ongoing, -2008):
>10⁶ galaxies @ $z < 0.2$

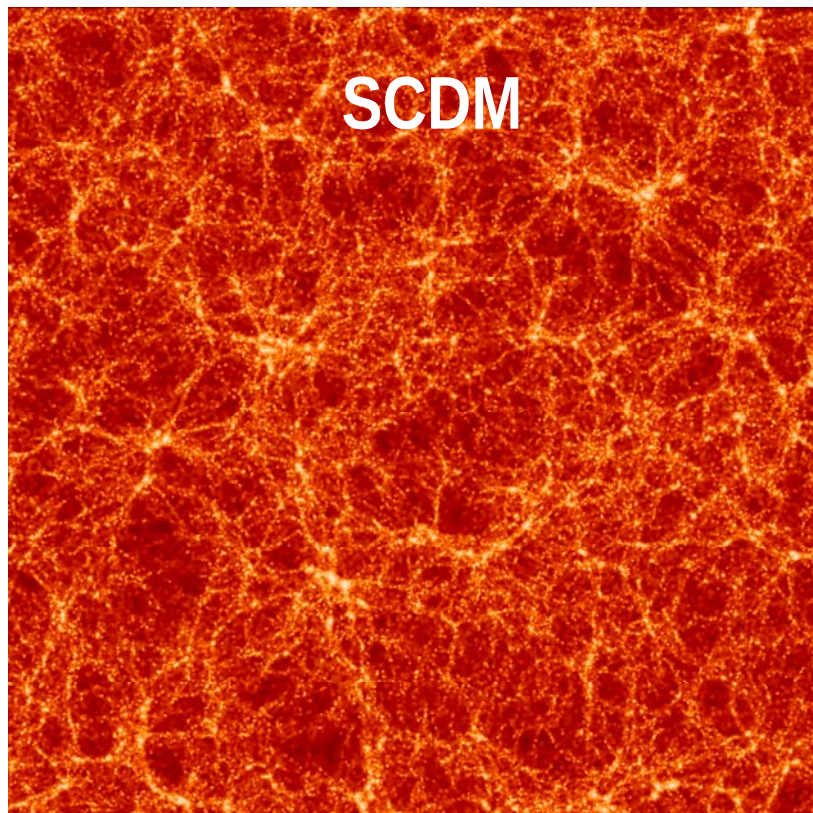


- 大規模銀河サーベイから質量密度ゆらぎ場を探る
- **CMB + 銀河サーベイ**が極めて強力な暗黒エネルギーの新探査法

構造形成(ゆらぎの進化)

- 銀河分布($\Leftrightarrow$ 密度ゆらぎ)

$$\delta(z) \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = D(z)\delta(z \approx 1000)$$

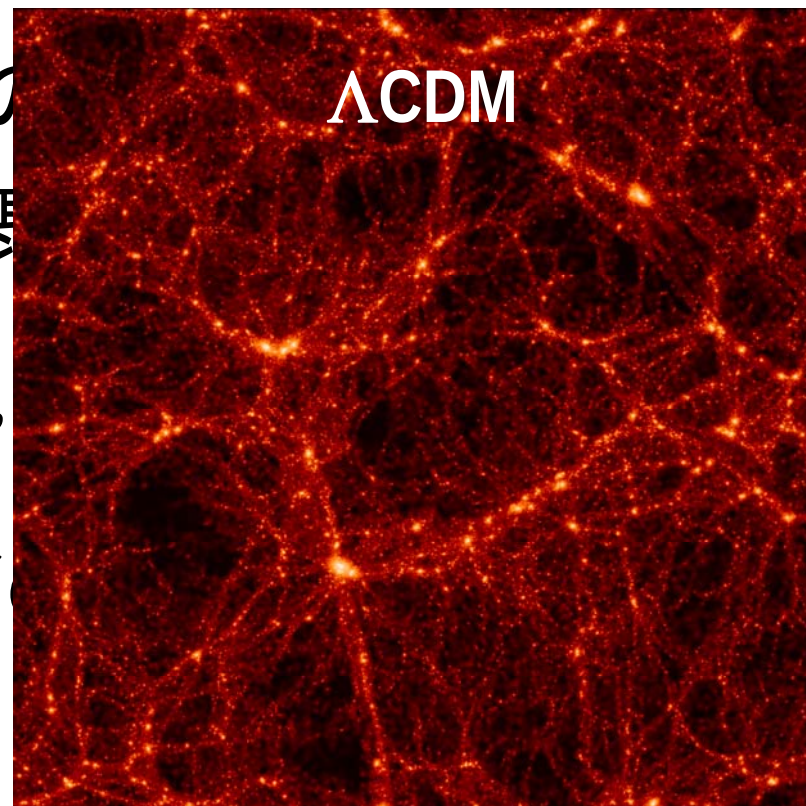


ぎの

形提

= 0,

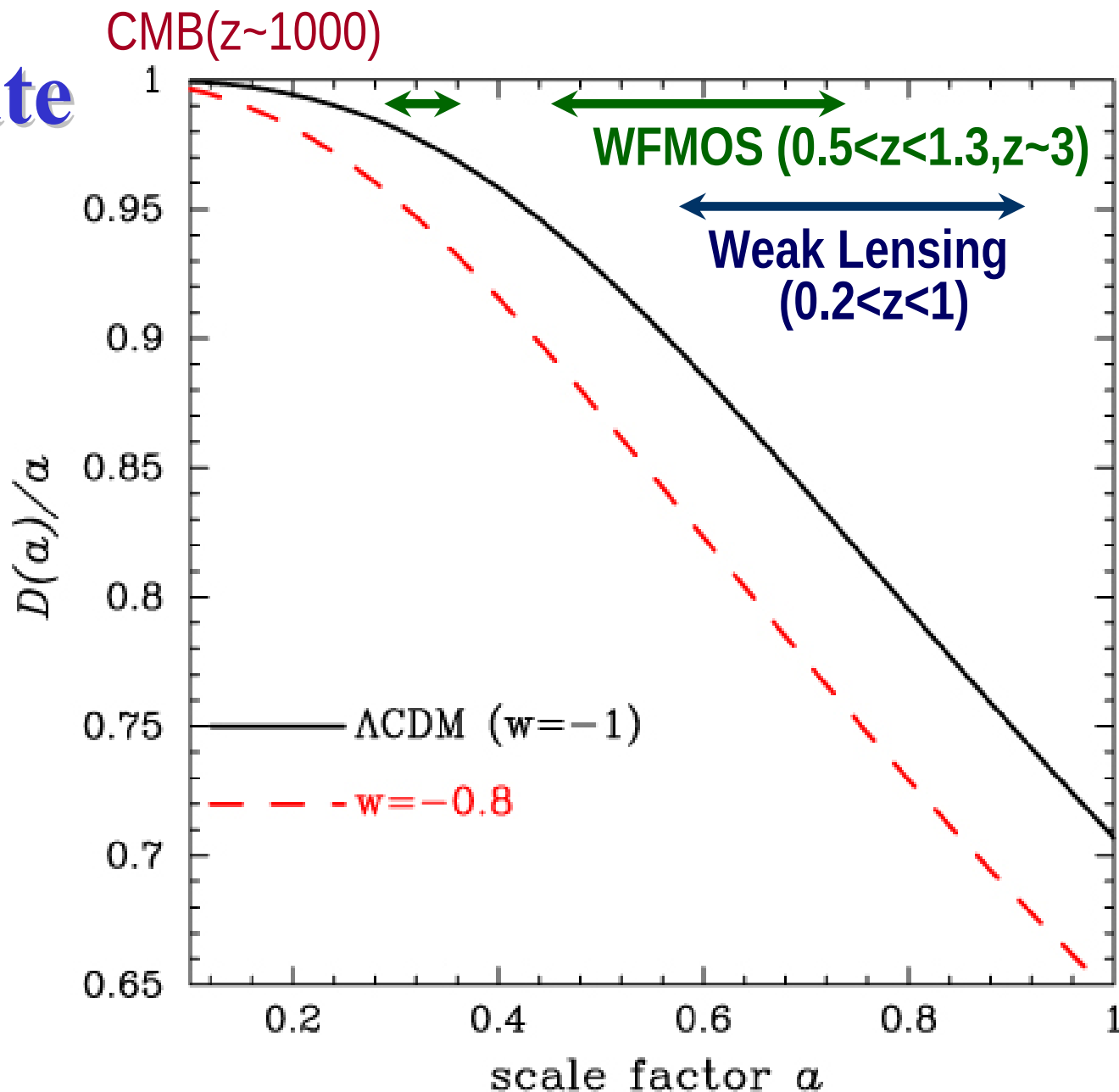
ぎ



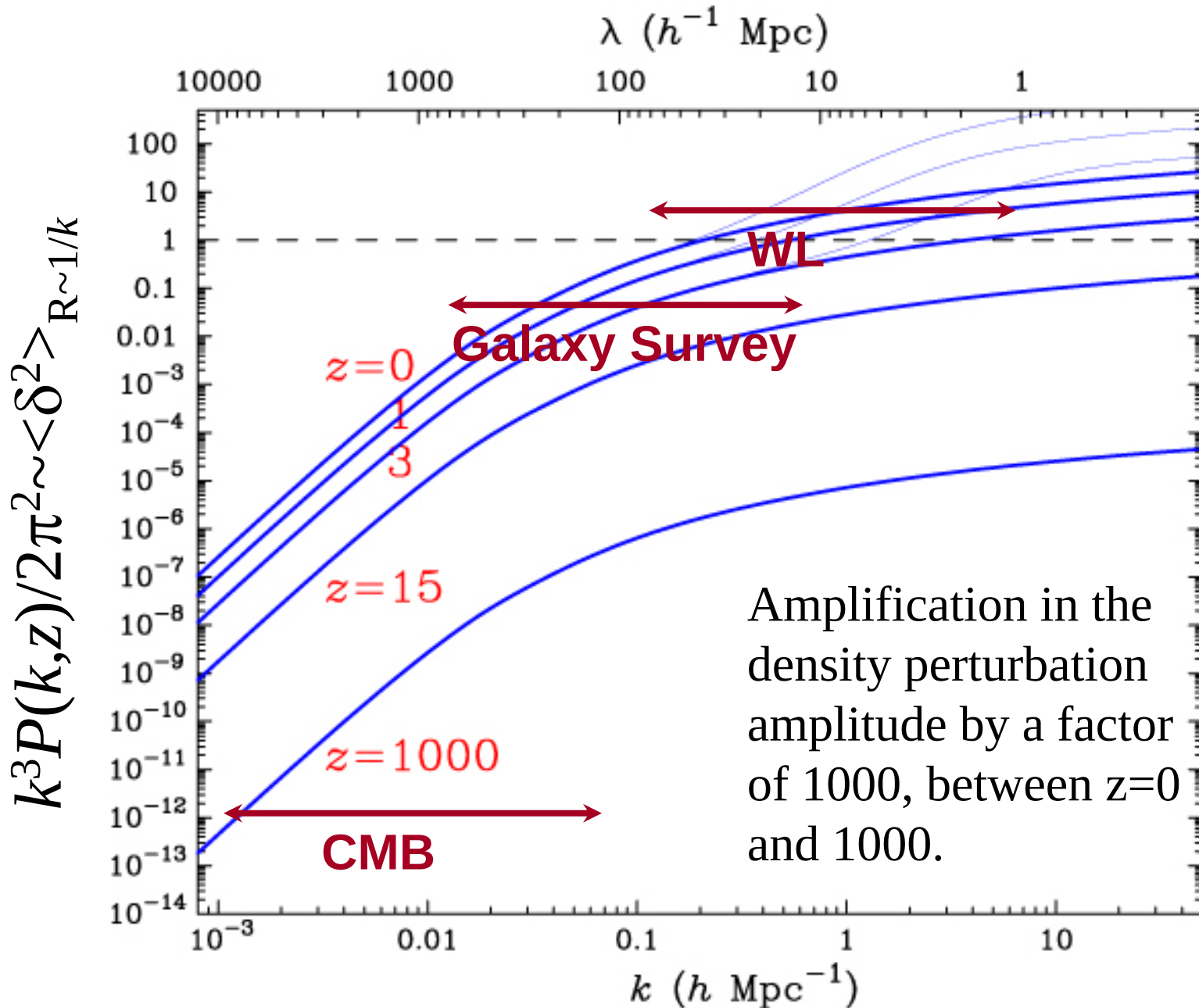
)

Growth Rate

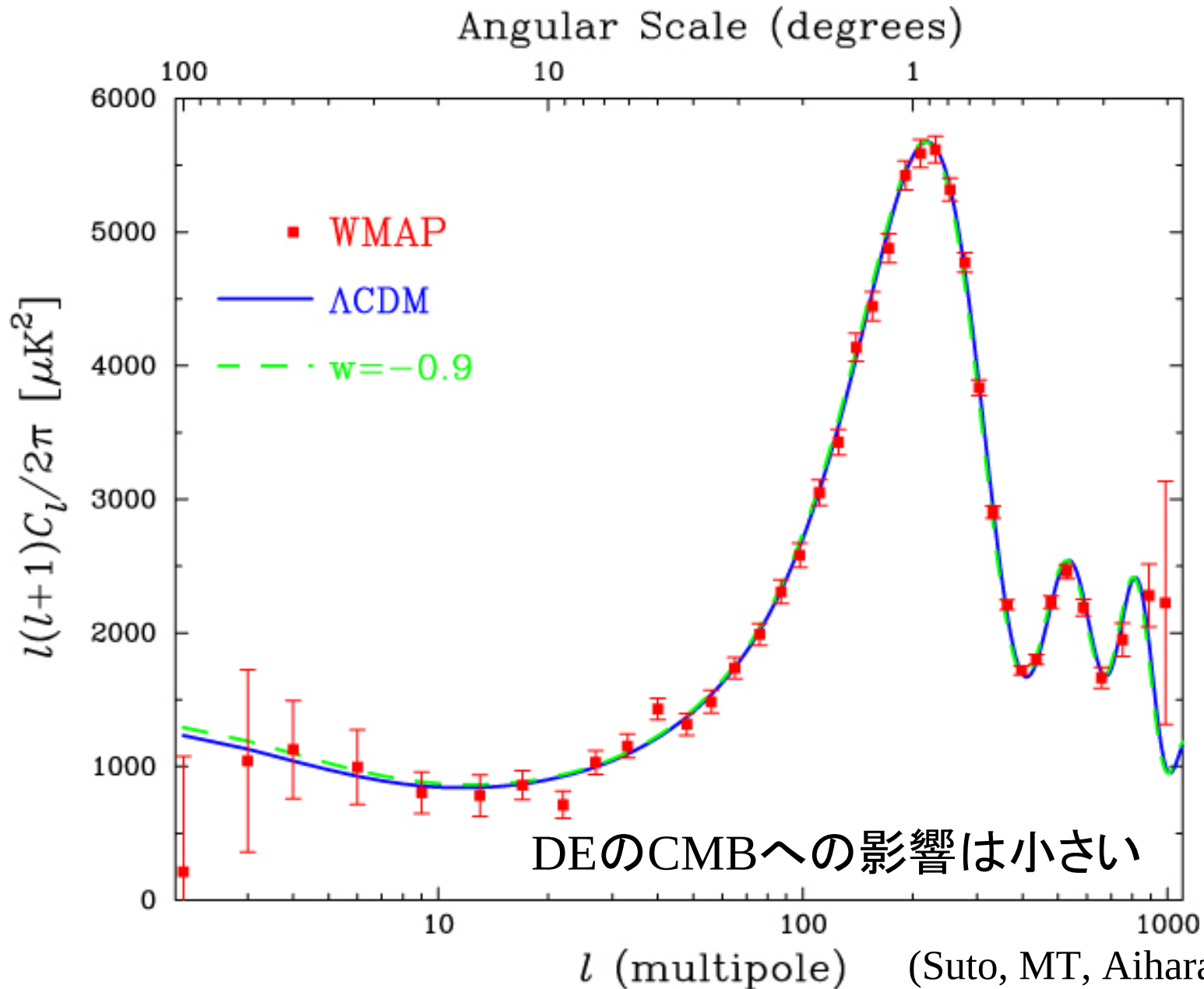
- 初期振幅はCMB観測によって精密に制限
- ダークエネルギーはゆらぎの成長を抑制
- 類似例) ニュートリノの質量、SDSS+WMAP: $m_{\text{tot}} < 0.6 \text{ eV}$



CDM Structure Formation Scenarios: $P(k)$



Note: DE Effect on CMB



DE (cosmic acceleration) Probes

- Type Ia SNe: $D_L(z)$
- Integrated Sachs-Wolfe効果: $g(z)$
- 銀河のクラスタリング統計(バリオン振動):
 $D_A(z) + H(z)$, $+ g(z)$
- 宇宙論的な重力レンズ効果: $f(D_A) + g(z)$
- 銀河団統計: $D_A^2/H(z) + g(z)$

CMB(e.g, WMAP)とこれらを組み合わせることは、
DEの性質を調べる強力な手法

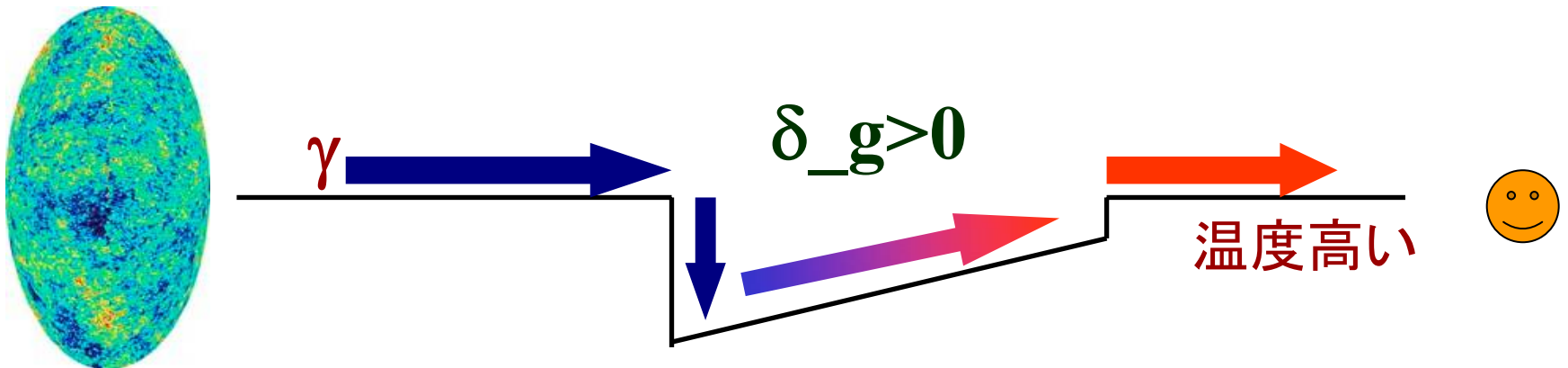
ISW効果: CMB-銀河サーベイ相相関

- 大規模構造の重力ポテンシャルの減衰が、2次的CMB温度揺らぎを誘発

$$\frac{\delta T}{T} = 2 \int_0^{r_{\text{LSS}}} dr \dot{\Phi}$$

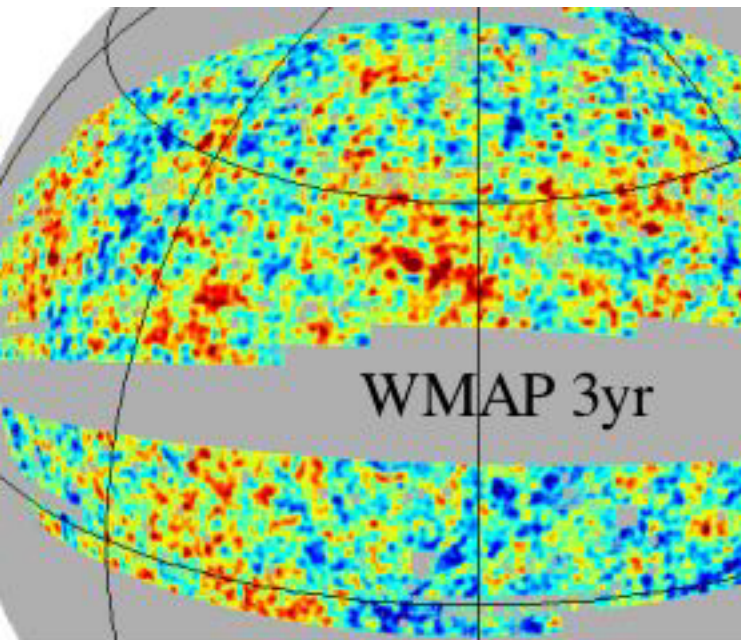
$$\Delta\Phi = 4\pi G \bar{\rho}_m a^2 \delta \propto \frac{\delta}{a}$$

- ISW効果 $\neq 0$ は、FRW宇宙ではDEあるいは負の曲率
- CMB-銀河サーベイの相相関により、ISW効果をSW効果から検出できる

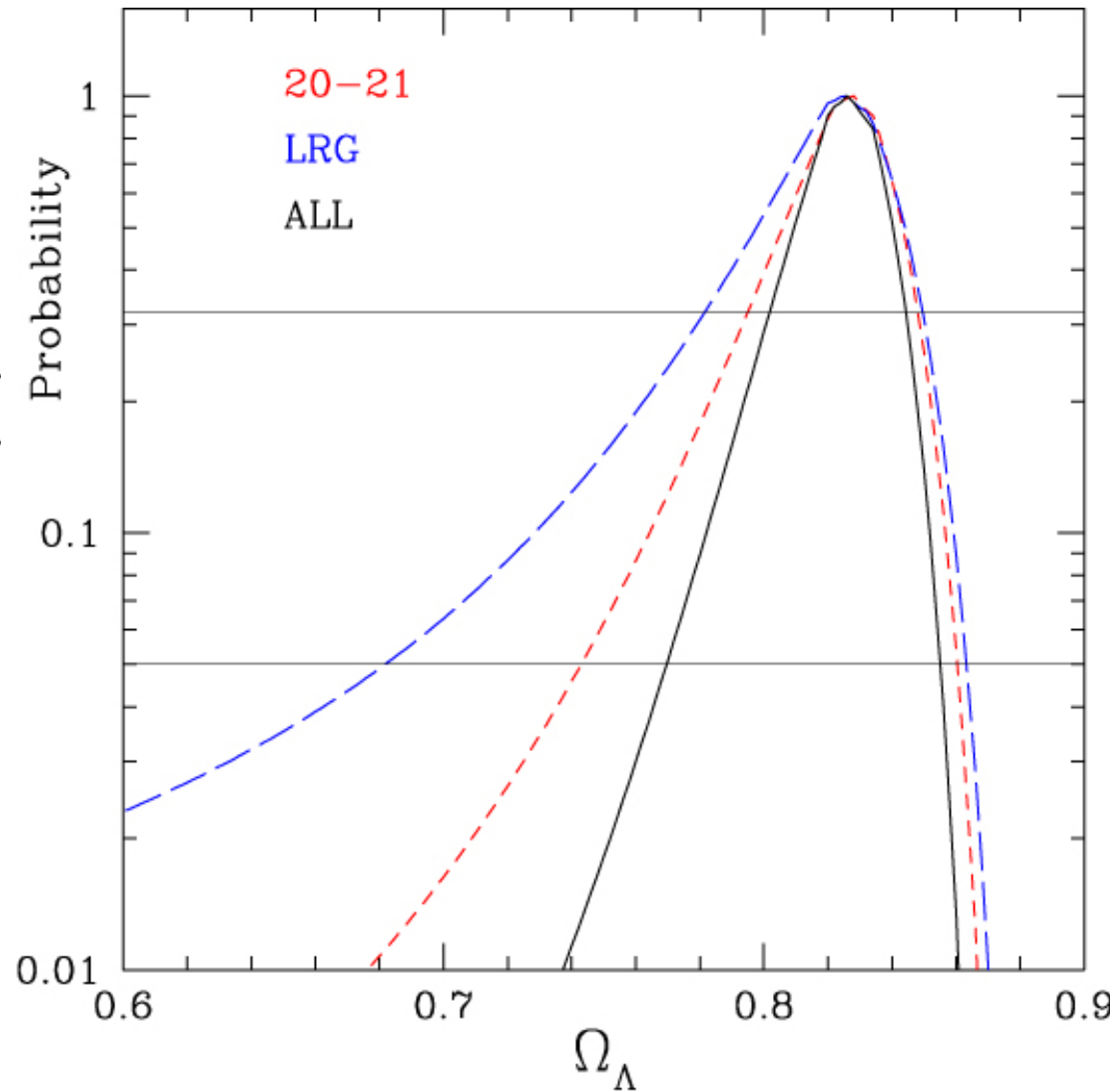


WMAP + SDSS 相関

- Cabre, Gaztanaga et al.(06)



- ~5 sigma detection
- Non-zero Λ is strongly favored



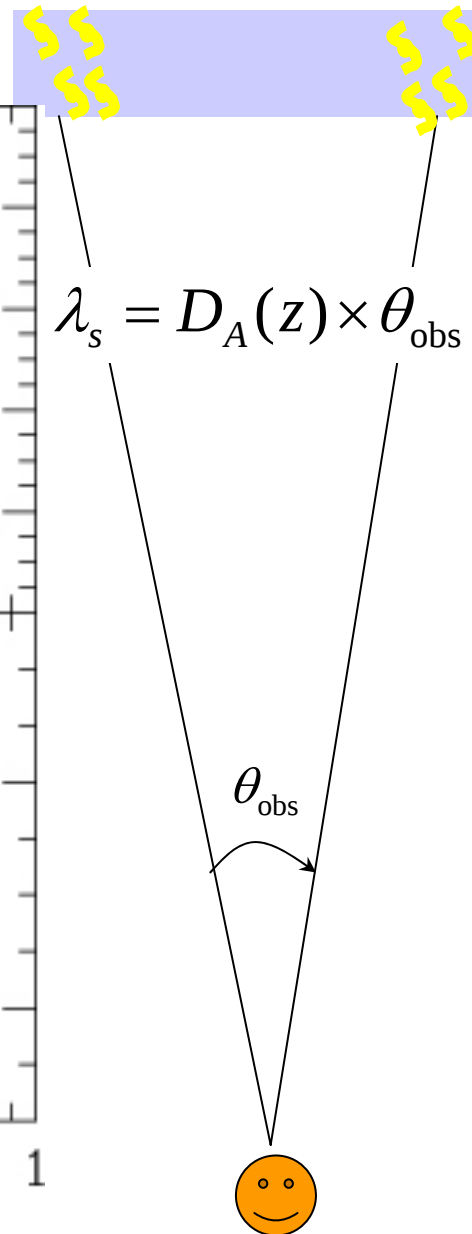
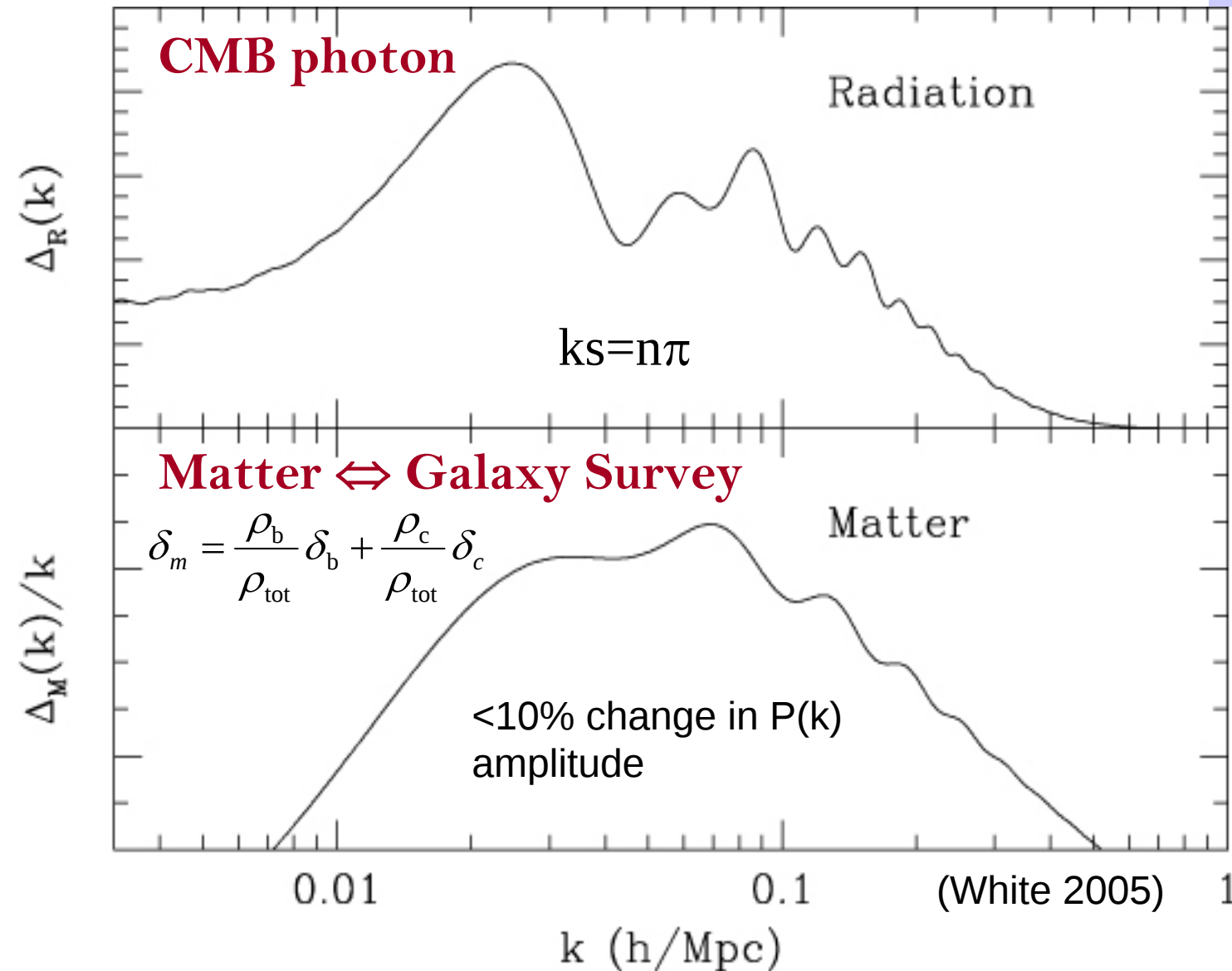
ISW effect (contd.)

- CMB-銀河サーベイ相相関を測定するときの signal-to-noise ratio (S/N)

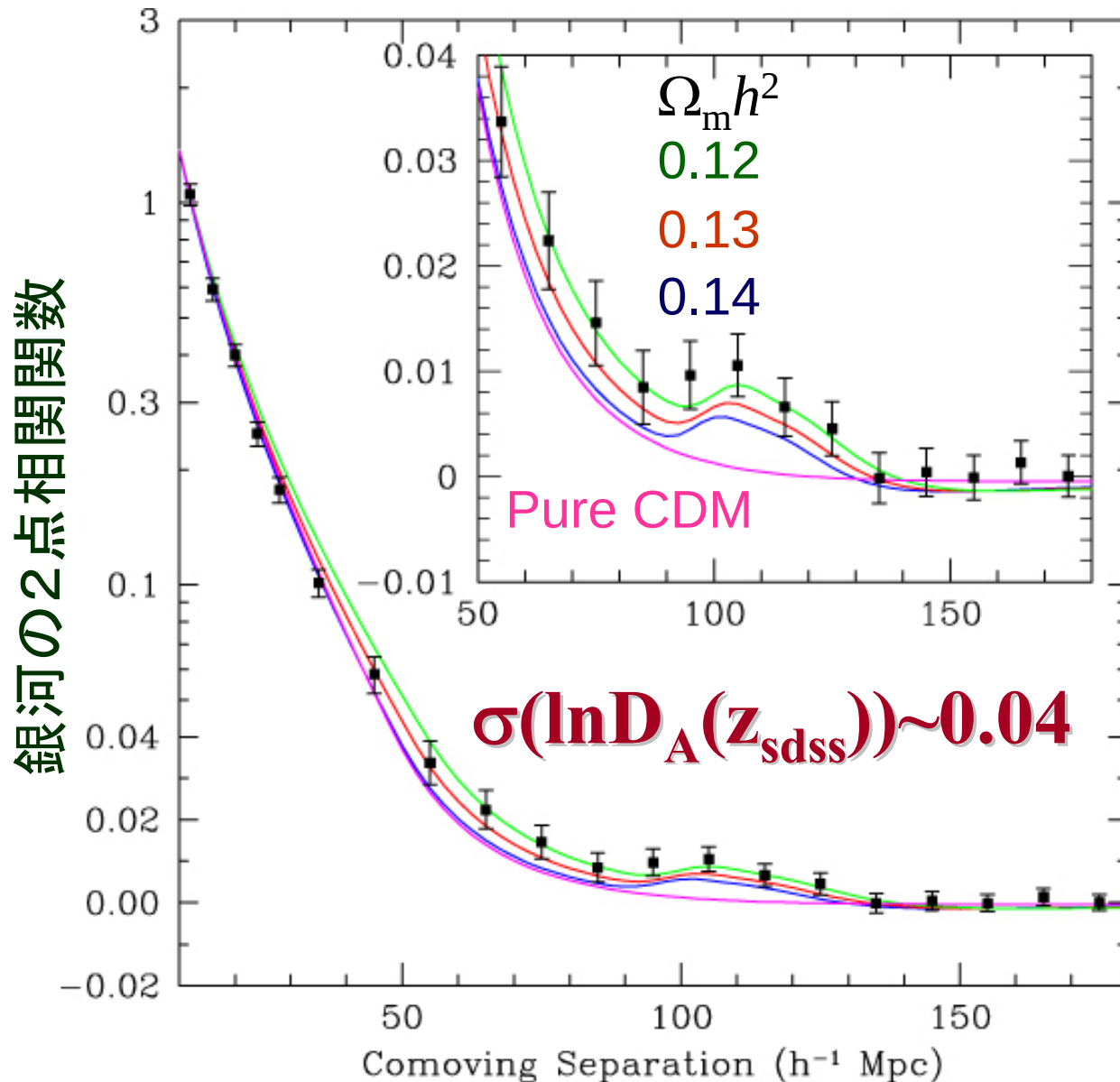
$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 \sim (2l+1) \frac{\langle \Delta_{\text{CMB}} \delta_g \rangle^2}{\langle \Delta_{\text{CMB}} \delta_g \rangle^2 + \langle \Delta_{\text{CMB}}^2 \rangle \langle \delta_g^2 \rangle}$$

- SW効果による温度揺らぎがノイズとなる
 - SW:ISW~1:1@ $l=2$, 10:1@ $l \sim 10$
 - 全天銀河サーベイでも、最大で(S/N)~15
 - DEの状態方程式 $w(z)$ を精密に測定する方法としては、限界がある
 - $\sigma(w) \sim 0.2$ 程度が最善

BAO(バリオン振動実験)

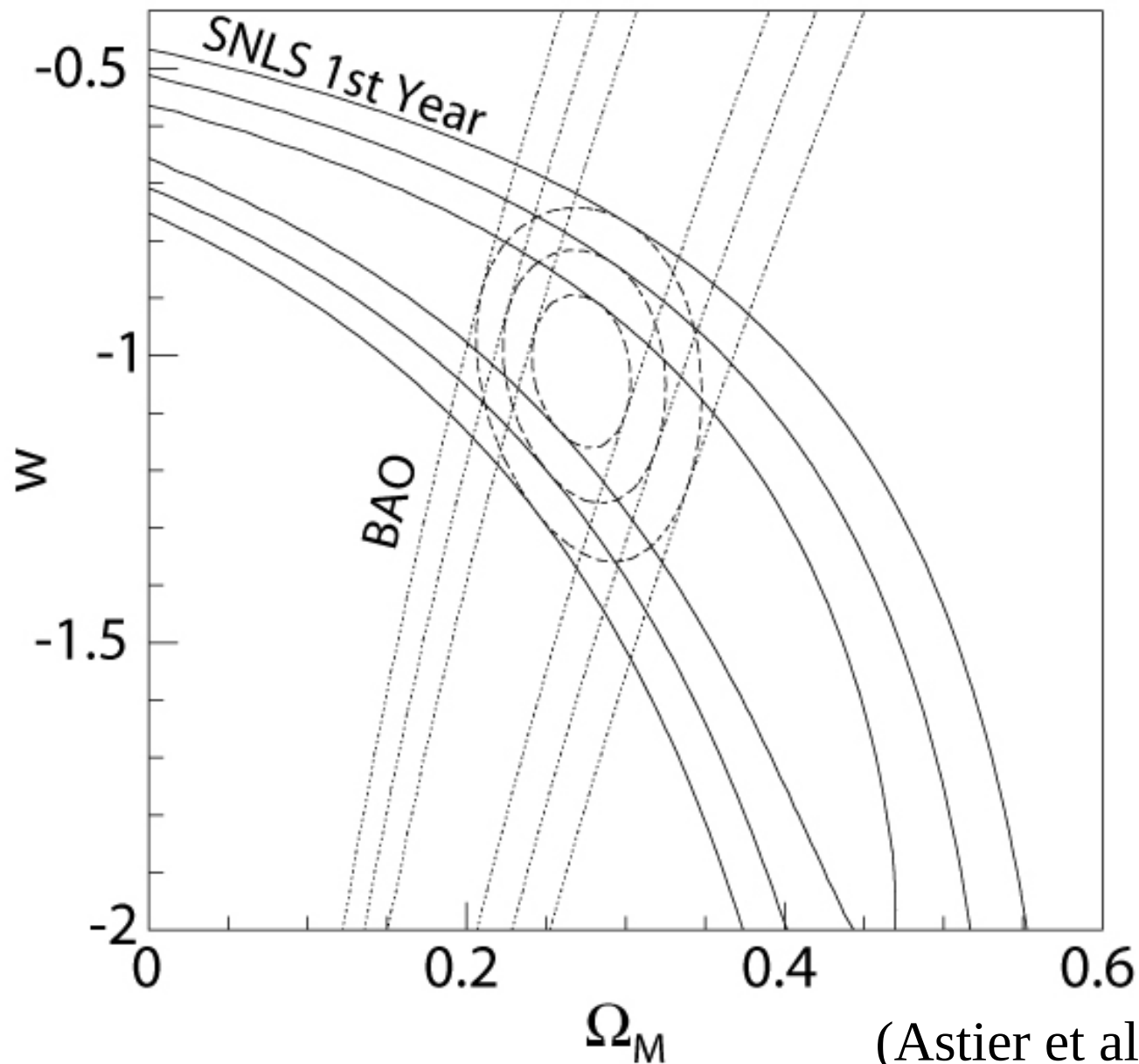


Detection of BAO (Eisentein et al. 05)



- ~ 4000 平方度、 $0.72h^{-3}$ Gpc³、50,000銀河
- SDSSからバリオン振動を検出 ($\sim 3\sigma$)
- SDSS銀河までの距離($z \sim 0.35$)とWMAPの結果から、 Λ が必要

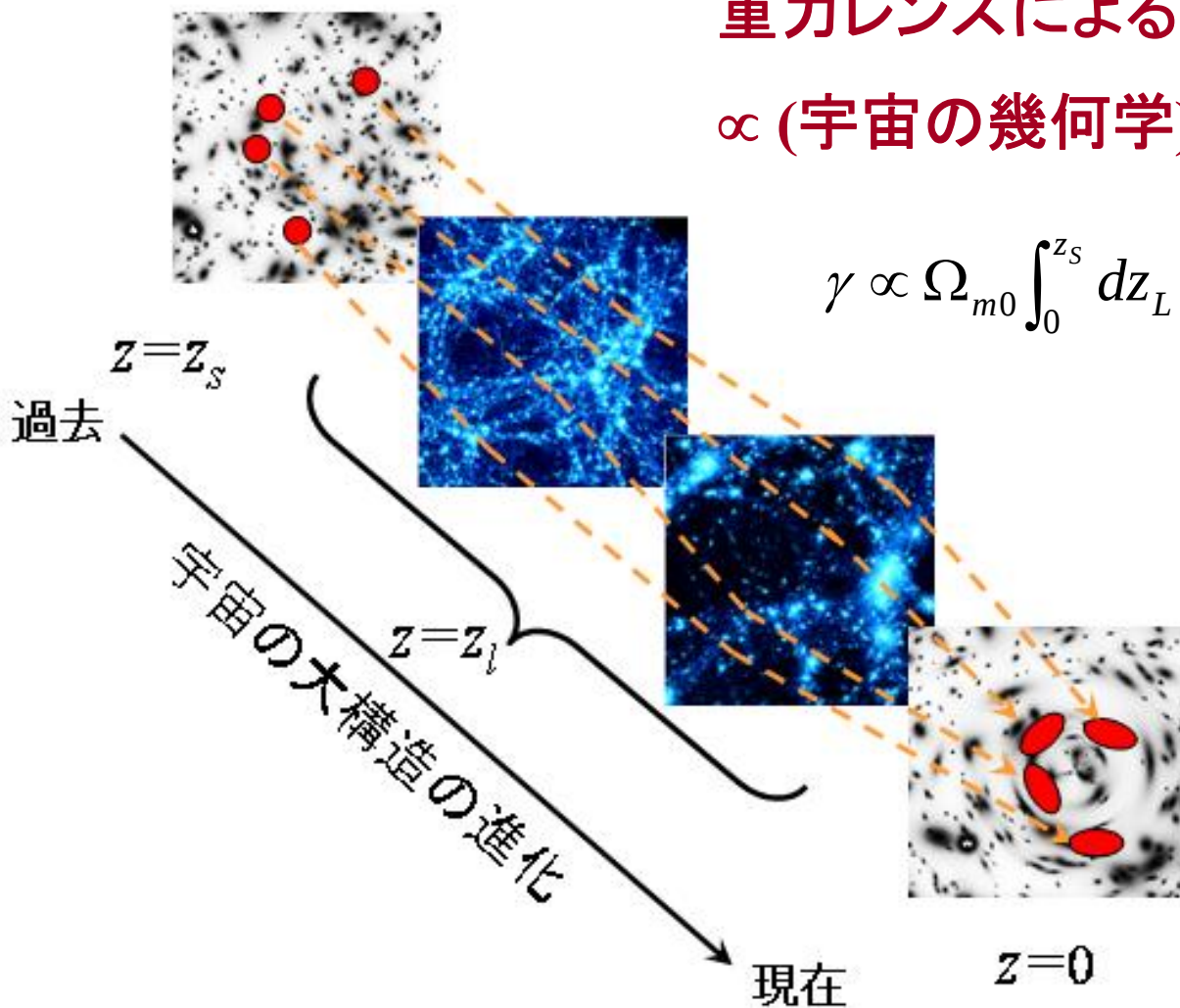
SNLS + SDSS BAO



宇宙論的重力レンズ効果

重力レンズによる誘発される楕円率

$\propto$ (宇宙の幾何学) $\times$ (構造形成の度合い)



$$\gamma \propto \Omega_{m0} \int_0^{z_s} dz_L \frac{d_{LS}(z_L, z_S) d_L(z_L)}{d_S(z_S)} \delta(z_L, \theta)$$

観測量

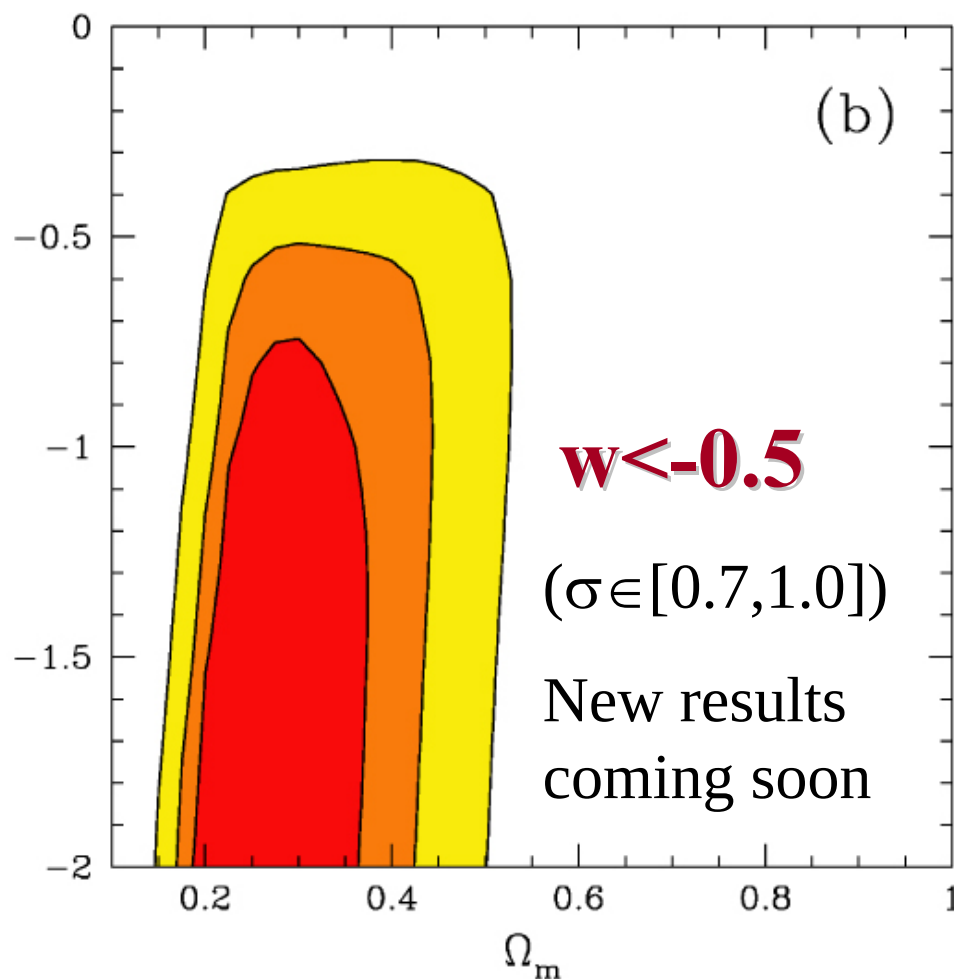
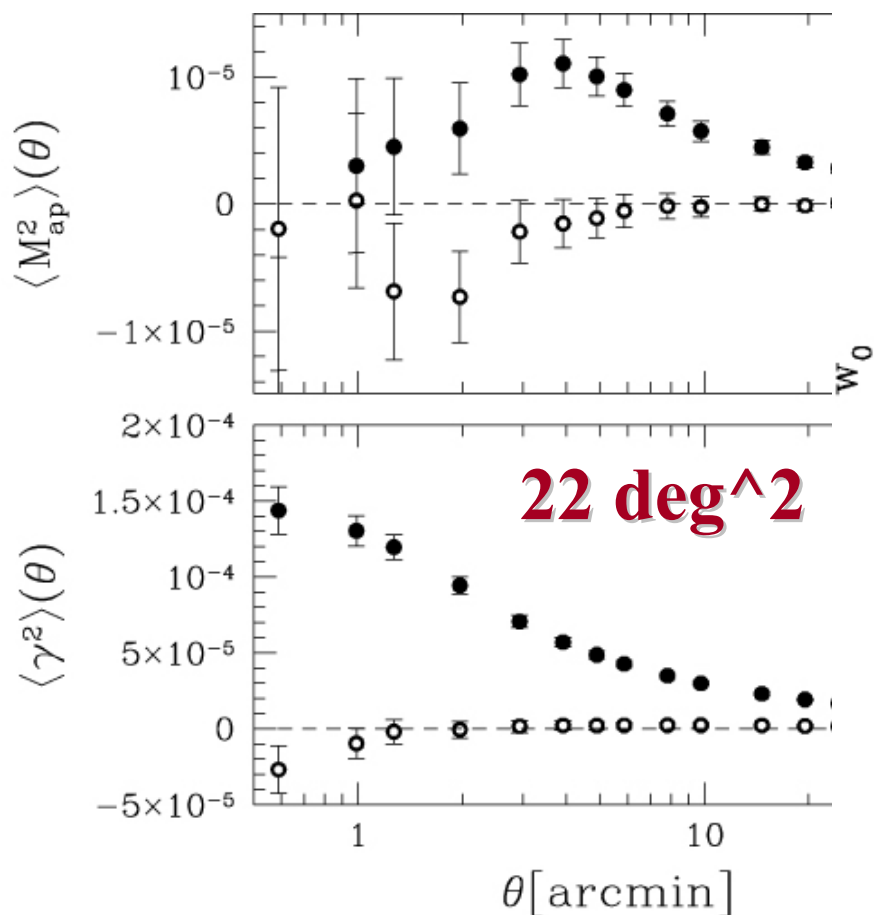
$$\gamma = \frac{a-b}{a+b}$$

$$\gamma_1 = \gamma \cos 2\varphi$$

$$\gamma_2 = \gamma \sin 2\varphi$$

Cosmic Shear (contd.)

- CFHT Legacy Survey



- $>5\sigma$ detection at each angular bin
- Consistent with a concordance Λ CDM model

DE探査の将来計画

- SDSS銀河サーベイ($z \sim 0.2$)を拡張した高赤方偏移($z \sim 1$)の大規模サーベイ
 - 高赤方偏移サーベイ: 与えられた立体角に対して、より大きな3Dサーベイ体積, e.g., **>10V_{sdss}**
 - DE probes の高精度測定
 - 世界中で計画: KIDS(ESO; 2008-), DES(Fermi; 13?-), HETDEX (Texas; 10?-), Pan-Starrs(Hawaii; 13?-), SNAP(LBL; 15?-), DUNE(EU; 15?-), LSST(Stanford; 15?-)
 - $\sigma(w) = \text{a few \%}$ を目指す
- Remarks:
 - A wide redshift coverage: $z \sim 10^3$, $z=0-3$, CMB+SDSS+?
 - A wide wavenumber coverage: 1Mpc-1Gpc

Subaru HSC/WFMOS Survey

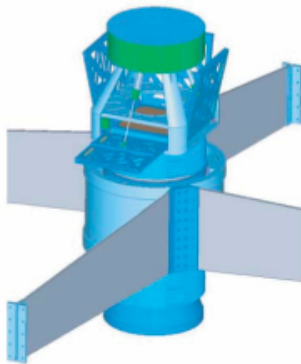
広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究

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

研究項目AとB合同の広視野サーベイの実施
ダークエネルギーの解明へ

- 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**」(代表: 唐牛宏)

- 2006年度採択、06–11年の6年計画
- Hyper Suprime Cameraを開発し、数千平方度のサーベイ(2011-)を遂行; WL, Cluster, Galaxy clustering
- 6/7,8に研究会@東大

- 国際共同研究、分光サーベイWFMOSへ発展?

DE clustering

(MT PRD043505 06)

- DEが宇宙定数ではない場合、DEの空間クラスタリングが自然に期待される:

$$w \neq -1 \Rightarrow \text{検証: } \rho_{\text{de}}(\mathbf{x}, t)$$

- 状態方程式とは独立な情報
- 銀河のクラスタリングは、重力ポテンシャル場に従う

$$\Delta\Phi = 4\pi G a^2 \delta\rho_t \Rightarrow \delta\rho_t = \rho_m \delta_m + \rho_{\text{de}} \delta_{\text{de}}$$

- インフレーション初期条件: $\delta_{\text{de}}(t_i) \sim \delta_m(t_i)$
- 低赤方偏移 $z < 1$ で ($\rho_{\text{de}} > \rho_m$)、DE perturbationが重要になる
- CMBへの影響は小さい

DE clustering (contd.)

- 現象論的アプローチ: DEの流体的性質($\delta\rho_{\text{de}}, \delta p_{\text{de}}, \pi_{\text{de}}, \dots$)を仮定 $\Leftrightarrow$ Lagrangian of DE
 - DE の一様密度成分、ゆらぎ成分の時間進化を、 w_{de} , sound speed c_e (δp_{de}), $\pi_{\text{de}}=0$ の関数として記述
- Sound speed c_e defines the free-streaming scale of DE clustering (e.g., quintessence, $c_e=1$)

$$\lambda_{\text{de}}(a) = \int_0^a da \frac{c_e}{H(a)a}$$

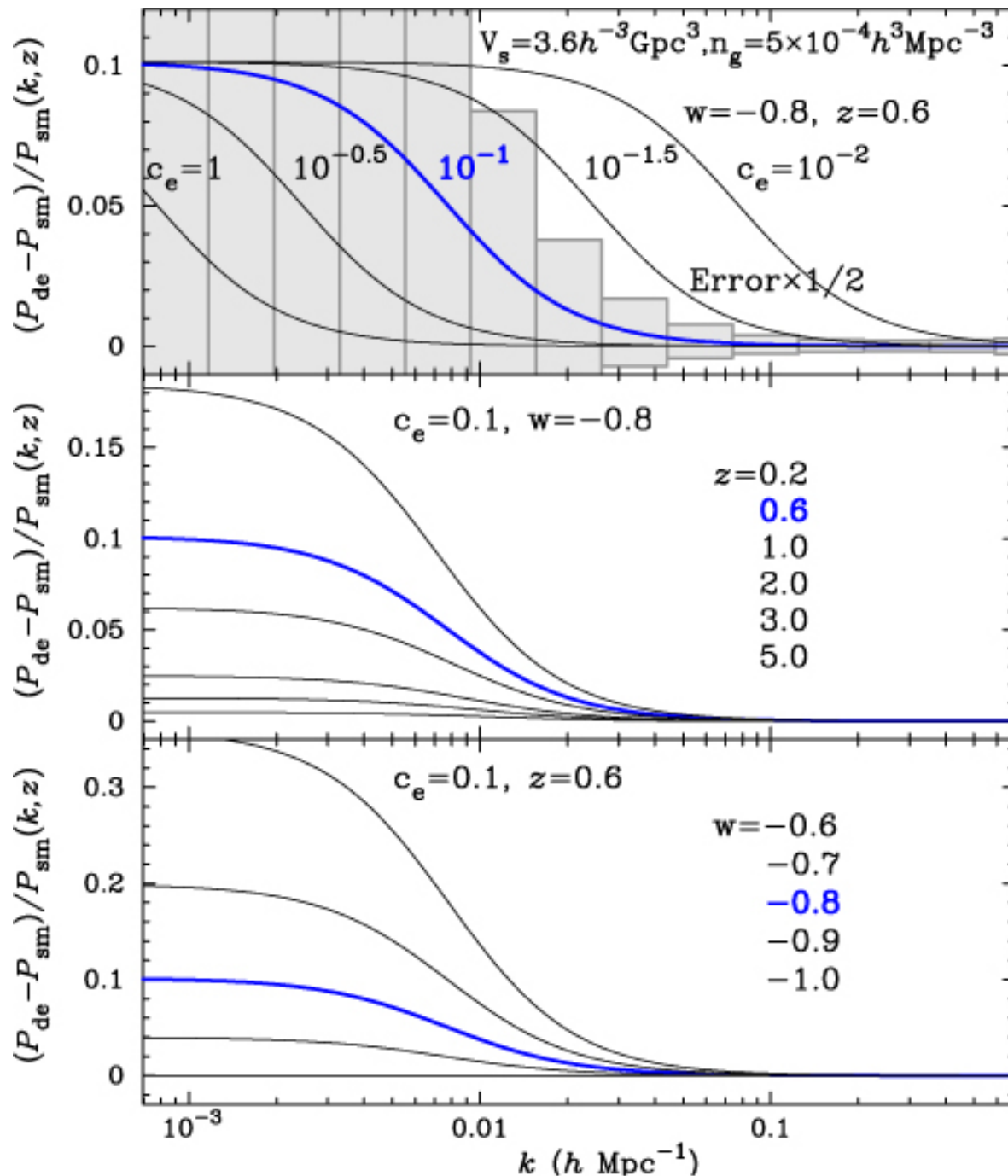
- $\lambda > \lambda_{\text{fs}}$: DE can cluster with DM

$$\delta\rho_t = \rho_{\text{m}}\delta_{\text{m}} + \rho_{\text{de}}\delta_{\text{de}}$$

- $\lambda < \lambda_{\text{fs}}$: DE perturbations are smooth ($\delta_{\text{de}}=0$)

$$\delta\rho_t \approx \rho_{\text{m}}\delta_{\text{m}}$$

MT(06)



- DE clusteringの効果は、大スケールで銀河のクラスタリング強度を増幅
- 特徴的なスケール、赤方偏移依存性
- WFMOSでは、 $c_e < 0.04$ (if $w = -0.9$) ならば、その効果が見えるかもしれない

DE clustering:

Alternative proof of inflation?

- ゆらぎの初期条件は adiabatic? (DEは、inflaton の崩壊によって生成?)
- DE場が、inflation時から存在していたら(ただしinflatonではない)、...

- Primordial GW

$$\ddot{h} + 2aH\dot{h} + k^2 h = 0$$

- 例えば、DE場がスカラー場なら

$$\ddot{\delta\phi}_{\text{de}} + 2aH\dot{\delta\phi}_{\text{de}} + k^2\delta\phi_{\text{de}} + F(V(\phi_{\text{de}})) = 0$$

➡ DE clustering成分は自然にiso-curvature modeを持つ (Moroi & Takahashi 04): $\delta_\gamma(\zeta_i)$, $\delta_m\zeta_i$, $\delta_{\text{de}}(\zeta_i, \delta\phi_{\text{de},i})$

- 構造形成への影響、およびその観測可能性、特にBAOについて(Saito, Taruya & MT 07)

Modified gravity vs. DE

- 立場: DEなし、暗黒物質だけを仮定し、宇宙論的スケールでの重力の修正が加速度膨張を説明できるか？
 - DGP, $f(R)$ 重力
- 重力を修正するなら、太陽系＋宇宙論スケールの観測で両方で検証(Chiba+06,07)
 - 宇宙論観測のほうが強力？ (Hu & Sawicki 07)
 - 一般に、 $w < -1$ を予言
- 膨張則＋宇宙の構造形成の測定により、DEの制限と同時に、重力理論のテストも可能！(e.g., Yamamoto et al. 07)

まとめ

- 様々な、独立な宇宙論的観測が宇宙の加速度膨張を強く示唆
 - 標準光源、標準物差による宇宙膨張の測定 + 宇宙の構造形成の測定
 - すばる望遠鏡のサーベイにより、この分野をリードできる！
 - マンパワーが不足、若手研究者の参加大歓迎
- まず検証すべきは、観測量が宇宙項($w=-1$)モデルで説明できるか？
- DEであれば、DE clusteringも自然な帰結
- さらに、cosmological modified gravity(?)のテスト
 - Solar system + cosmological probes