

2007/11/17

「高エネルギー天体現象と重力波」

@東大本郷

観測的宇宙論： 宇宙のダークエネルギー

樽家 篤史

(東大理, ビッグバン)

内容

ダークエネルギーとは？

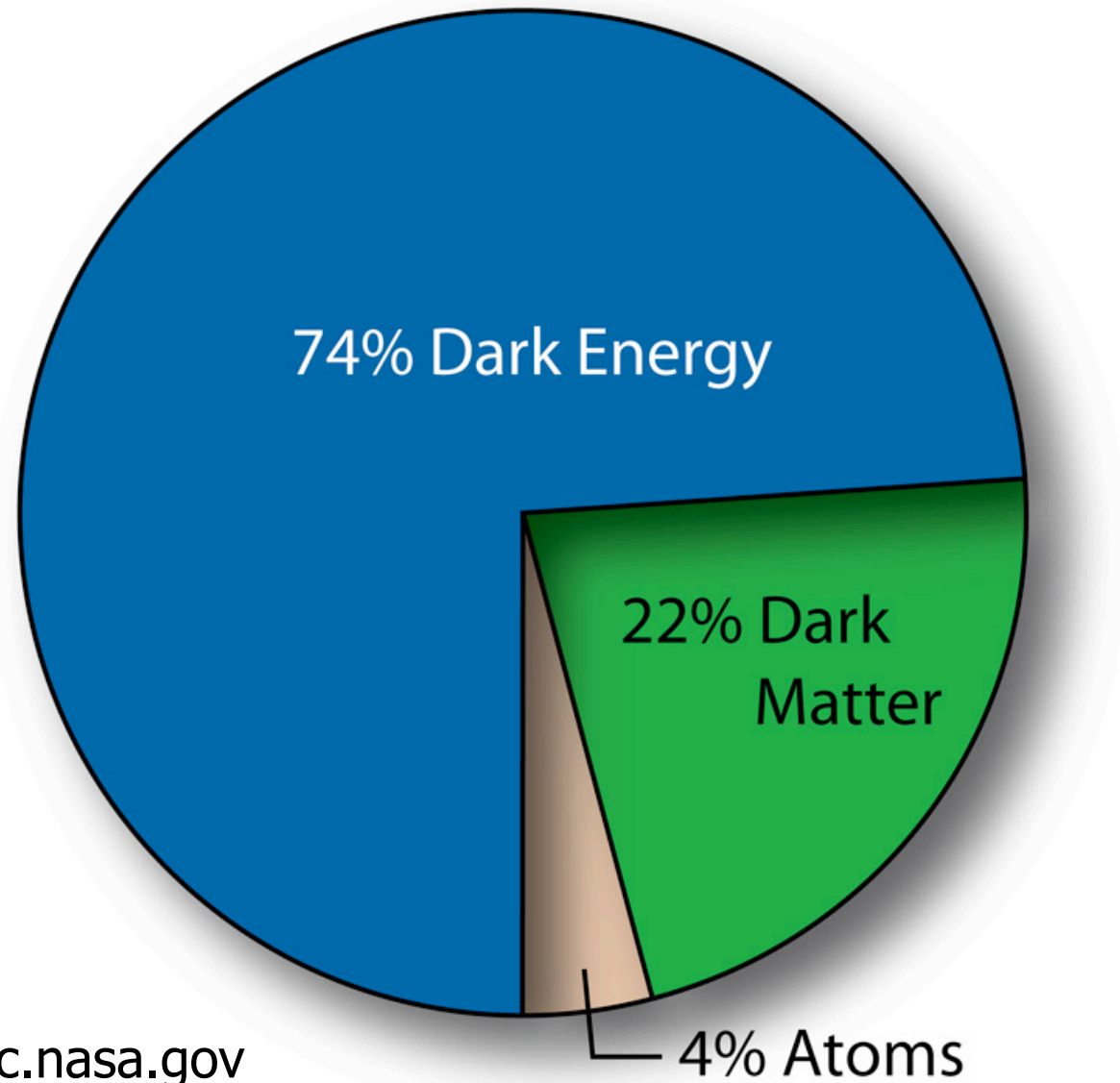
ダークエネルギーの探査方法

将来計画と展望

まとめ

ダークエネルギーとは？

現代宇宙論の到達点



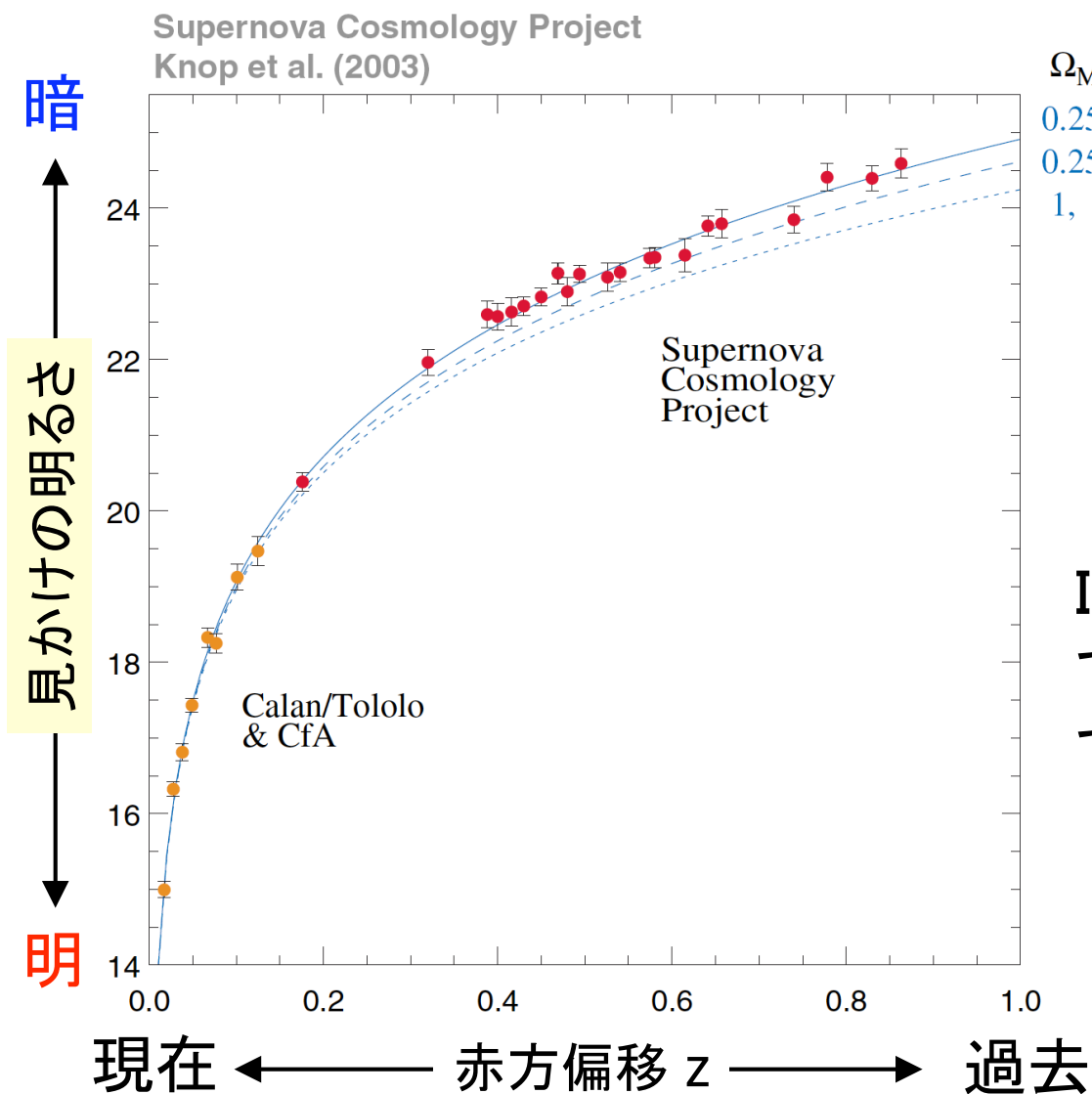
<http://map.gsfc.nasa.gov>

暗黒面が支配する宇宙

宇宙の全エネルギー密度のうち、
96パーセントが未知の物質・エネルギーで満ちている

	ダークエネルギー	ダークマター
基本的 特徴	斥力として宇宙膨張に のみ寄与する	重力を介して、 バリオンと相互作用
正体	真空のエネルギー、 動的スカラー場、もしくは...	未発見粒子 (アクシオン、ニュートラリーノ)
観測的 証拠	加速膨張 (宇宙年齢)	銀河の回転曲線 構造形成

Ia型超新星による観測



Ω_M, Ω_Λ
0.25, 0.75
0.25, 0
1, 0

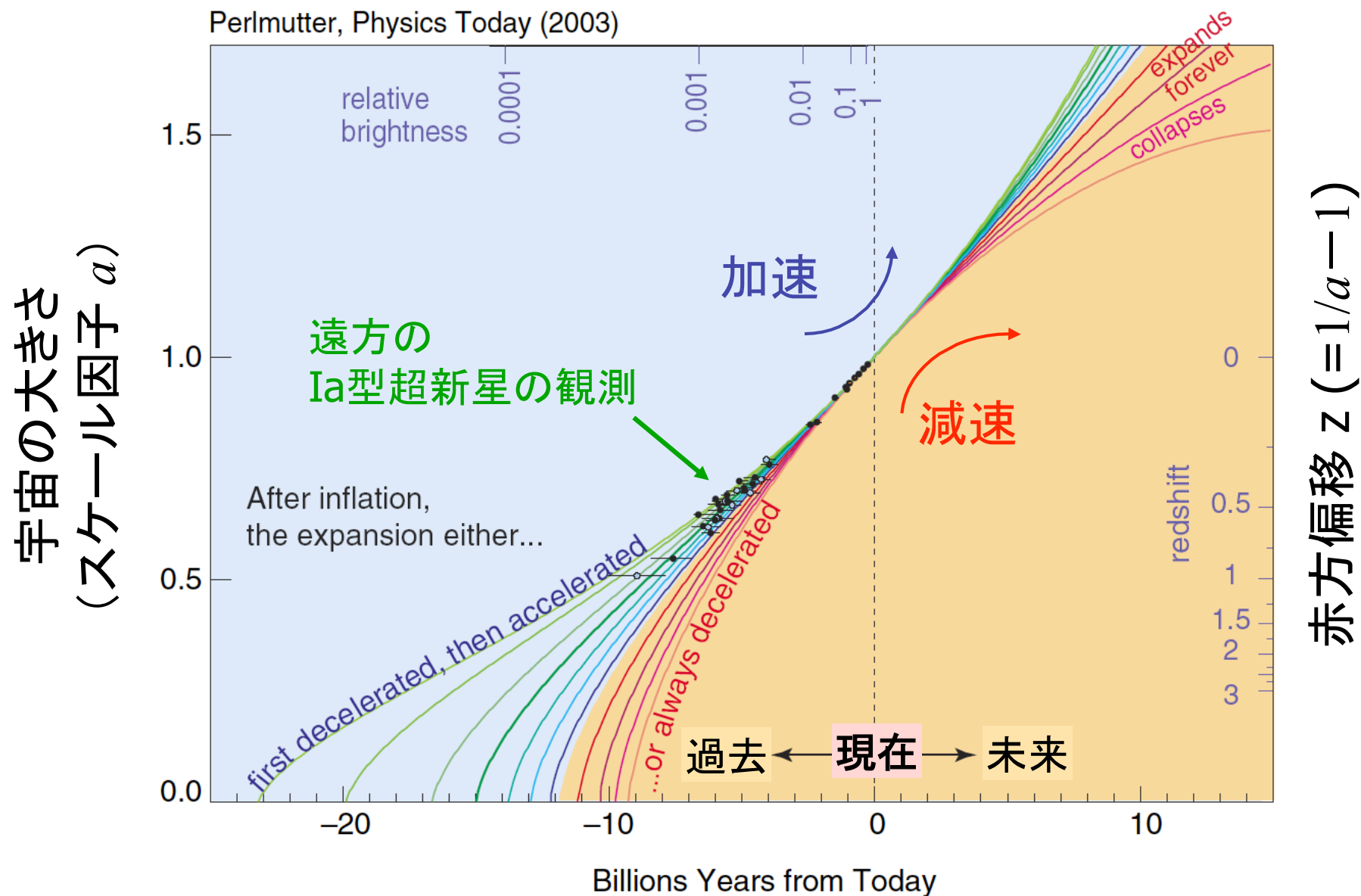


Ia型超新星

Ia型超新星を「標準光源」として利用することで、各超新星までの宇宙論的距離を決定

宇宙膨張の変化が明らかに

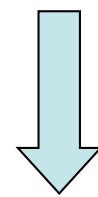
宇宙の加速膨張



ダークエネルギーと加速膨張

アインシュタイン
方程式
($c=1$)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \{ dr^2 / (1 - K r^2) + r^2 d\Omega^2 \}$$

$$T_{\mu\nu} = \text{diag}[\rho, P, P, P]$$

フリードマン
方程式

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2} \quad ; \quad H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3c^2} (\rho + 3P)$$

宇宙の加速膨張には ($\ddot{a} > 0$)、

宇宙項 $\Lambda (> 0)$ か、 $P < -r/3$ を満たす 物質(エネルギー)が必要

ダークエネルギーの正体

アインシュタイン方程式の物質項としてのダークエネルギー

宇宙項(宇宙定数)

1917年にアインシュタインが導入

状態方程式 $P = -\rho$ に従う物質場と等価
(=真空のエネルギー) $\left(P = -\rho = -\frac{\Lambda}{8\pi G} \right)$

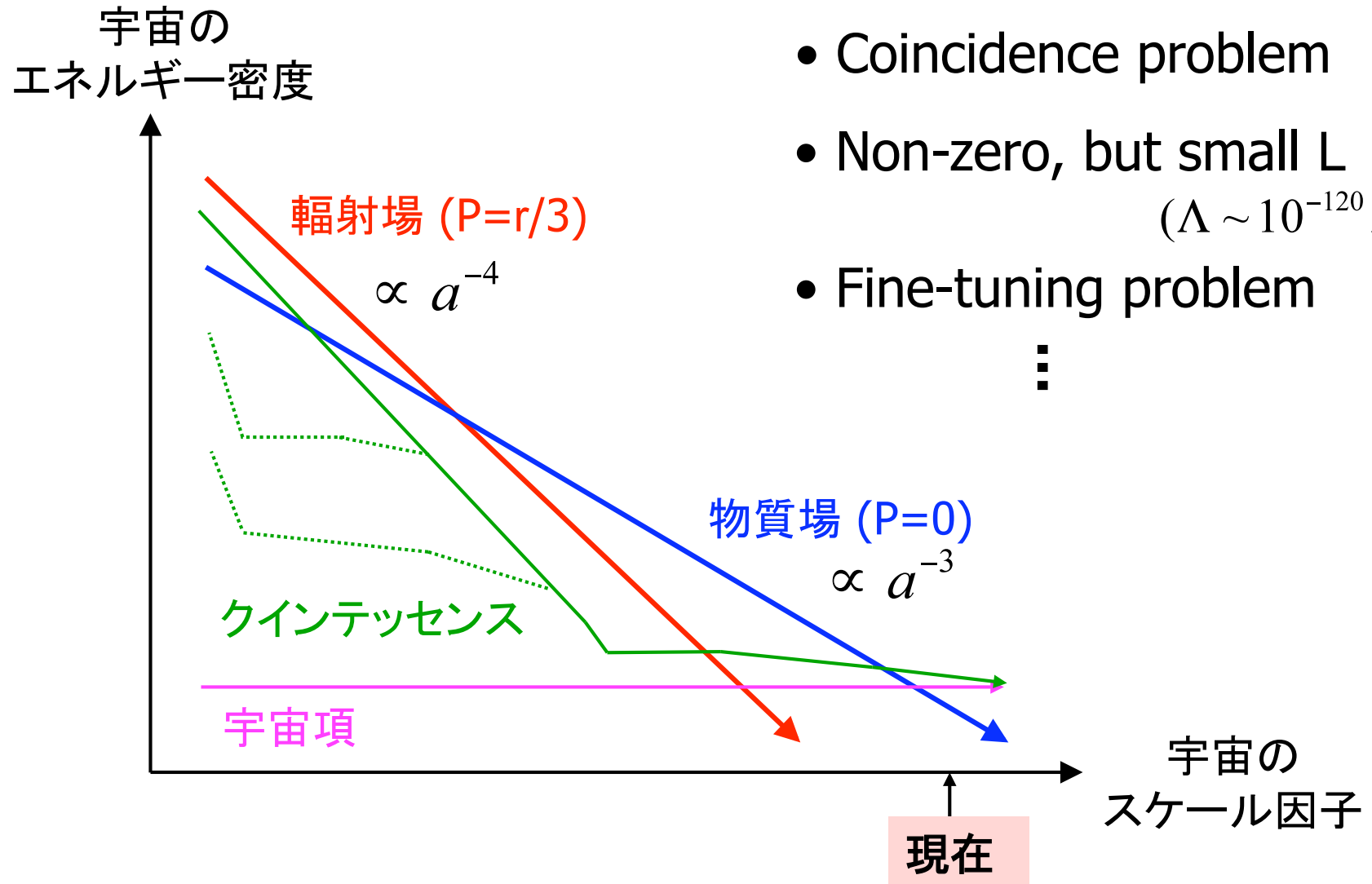
動的スカラー場

クインテッセンス $L_{\text{matter}} = \dot{\phi}^2 / 2 - V(\phi)$

状態方程式 $P_{\phi} = w(t) \rho_{\phi}$; $w(t) \equiv \frac{\dot{\phi}^2 / 2 - V(\phi)}{\dot{\phi}^2 / 2 + V(\phi)} < -\frac{1}{3}$

※ その他、ファントム、ゴースト凝縮などなど...

宇宙のエネルギー密度



- Coincidence problem
- Non-zero, but small Λ
($\Lambda \sim 10^{-120} M_{pl}^4$)
- Fine-tuning problem
- \vdots

重力理論の変更？

アインシュタイン方程式の重力パートを変更

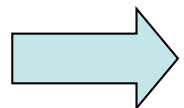
4次元重力

f(R) 重力 $L_{\text{gravity}} = f(R)$

スカラーテンソル重力 $L_{\text{gravity}} = F(\phi)R - (\nabla\phi)^2 - 2U(\phi)$

高次元重力(ブレーンワールド)

DGP モデル



フリードマン方程式を変える、ゆらぎの進化も変える

太陽系・地上実験との無矛盾性

理論としての整合性(量子補正)

現状のまとめ

- ダークエネルギーが何なのか、
その正体を解き明かす理論的手がかりは未だ不明
- そもそも、ダークエネルギーの性質自体がよくわかっていない

天文学的観測からダークエネルギーの性質を探る

宇宙の組成のうち9割が「よくわからないもの」、
では恥ずかしい

ダークエネルギーの探査方法

Step by step questions

現象論的モデル $P_{\text{DE}} = w \rho_{\text{DE}}$; $w(t) = w_0 + w_a(1 - a)$

1. ダークエネルギーは、宇宙定数か？ $w = -1$ or $\neq -1$
2. ダークエネルギーは、ダイナミカルか？ $w(t)$
3. 一般相対論の検証 (or 重力理論の変更に対する制限)

ダークエネルギーを探る

直接検出ができない以上、

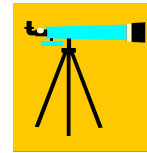
膨張宇宙のダイナミクスを通じた時間進化の違いから、
ダークエネルギーの性質を探る

宇宙の膨張史



「距離-赤方偏移関係」

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \{ \rho_m(t) + \rho_{DE}(t) \}$$



距離 $D(z)$



後退速度 $c z$

$$\left[1 + z \equiv 1/a(t) \right]$$

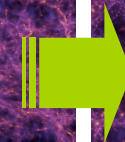
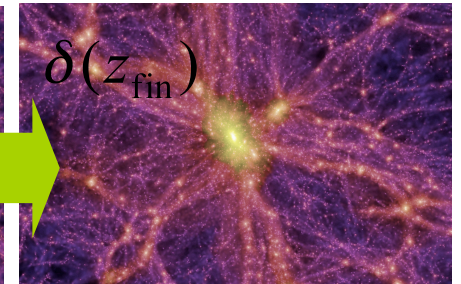
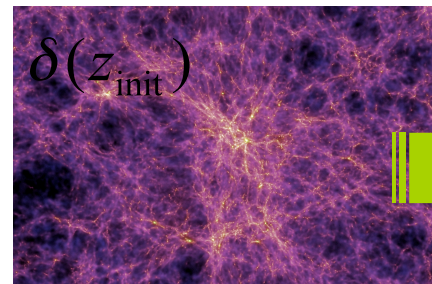
構造の進化



「ゆらぎの成長率」

$$\ddot{\delta} + 2H \dot{\delta} - 4\pi G \rho_m \delta = 0$$

質量密度ゆらぎ



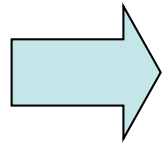
代表的手法

● 「距離-赤方偏移関係」
● 「ゆらぎの成長率」

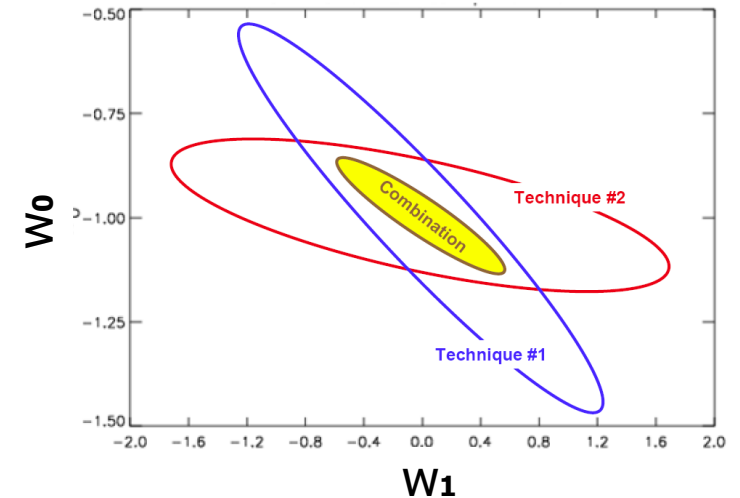
名称	観測対象	方法の種類	備考
Ia型超新星	遠方の超新星の光度曲線	●	測光観測 $D_L(z)$
宇宙論的重力レンズ	銀河一個一個の歪み具合	● ●	測光観測 $D_A(z)$ $g(z)$
バリオン振動	銀河分布の空間パターン	●	分光観測 $D_A(z)$ $H(z)$
クラスター (銀河団)	銀河団の個数密度	● ●	SZ / WL / X-ray

Remarks

★ 単独の観測手法だけでは、十分な制限は得られない

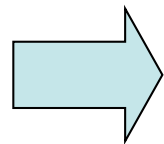


Joint analysis が不可欠



★ ダークエネルギー以外の宇宙論パラメータも同時に決定

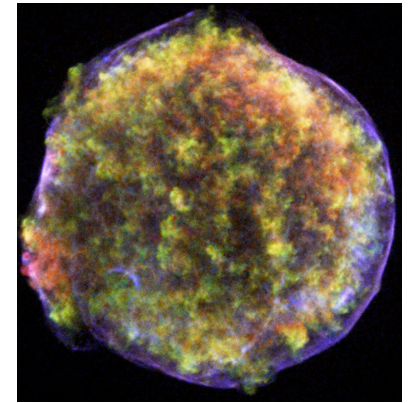
$\Omega_{\text{DE}}, \Omega_{\text{m}}, \Omega_{\text{b}}, h, \sigma_8, \dots$



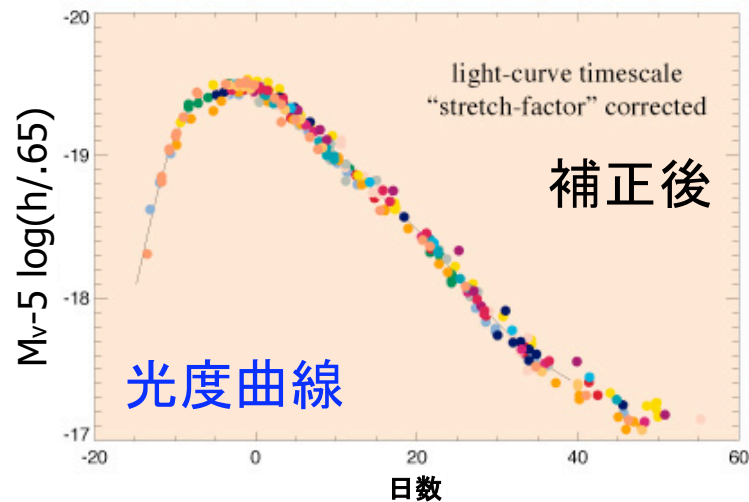
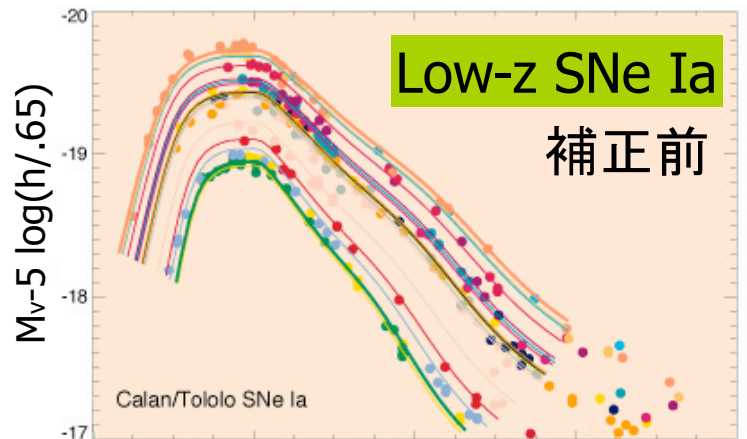
CMB非等方性の観測データにもとづく事前情報を用いる

$\Omega_i \equiv (8\pi G/3H_0^2)\rho_i$
: 密度パラメータ
 $h \equiv H_0/(100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Mpc})$
: ハッブルパラメータ
 σ_8 : 密度ゆらぎの振幅

Ia型超新星

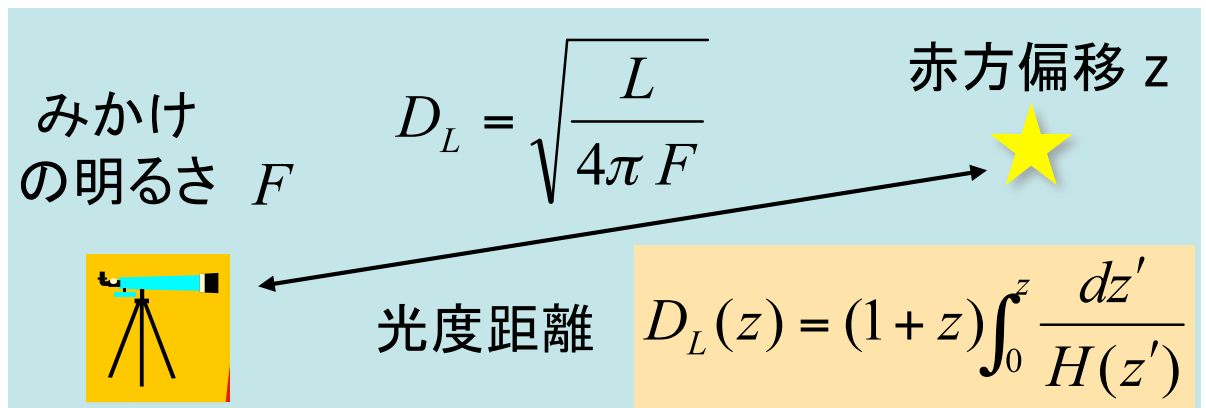


チャンドラセカル質量付近の質量を
持った、連星系中の白色矮星が引き起こす爆発



- 最大絶対光度 L がほぼ同じ
- 経験則による補正でばらつきを抑えることが可能

宇宙の「標準光源」



観測ステップ

広視野撮像観測

～1ヶ月の間隔で撮像から 超新星の候補探し

分光観測

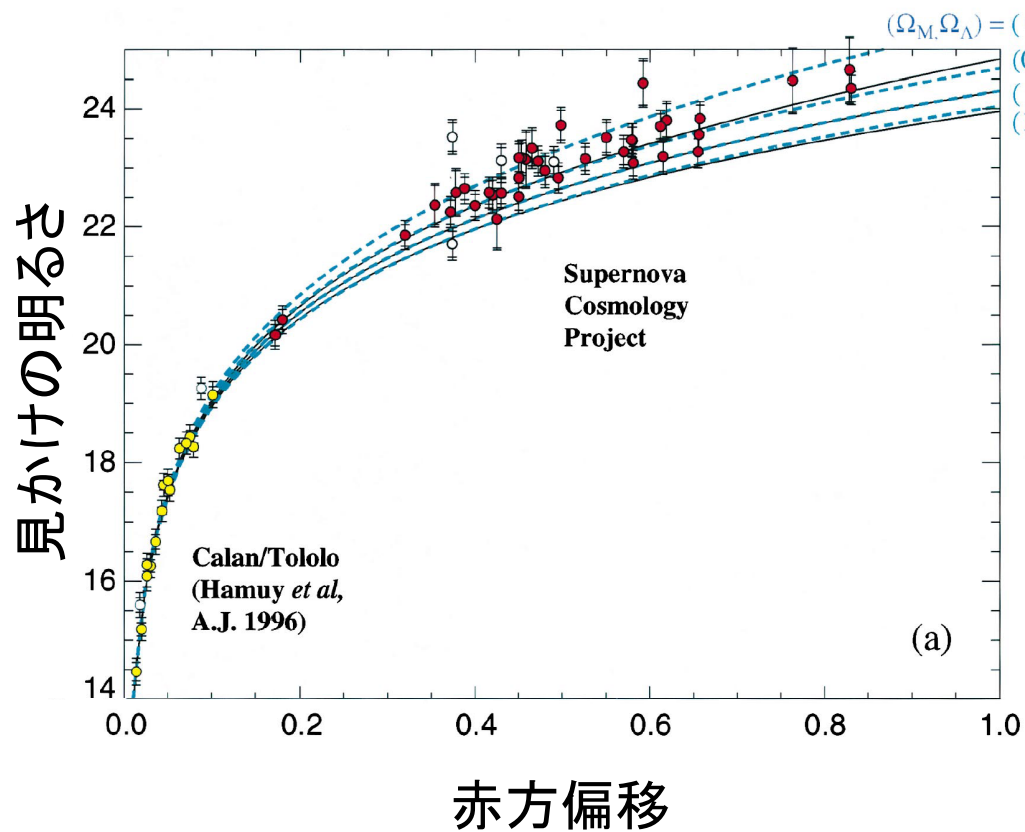
スペクトルタイプから { Ia型超新星を同定
赤方偏移の決定

測光観測(多色)

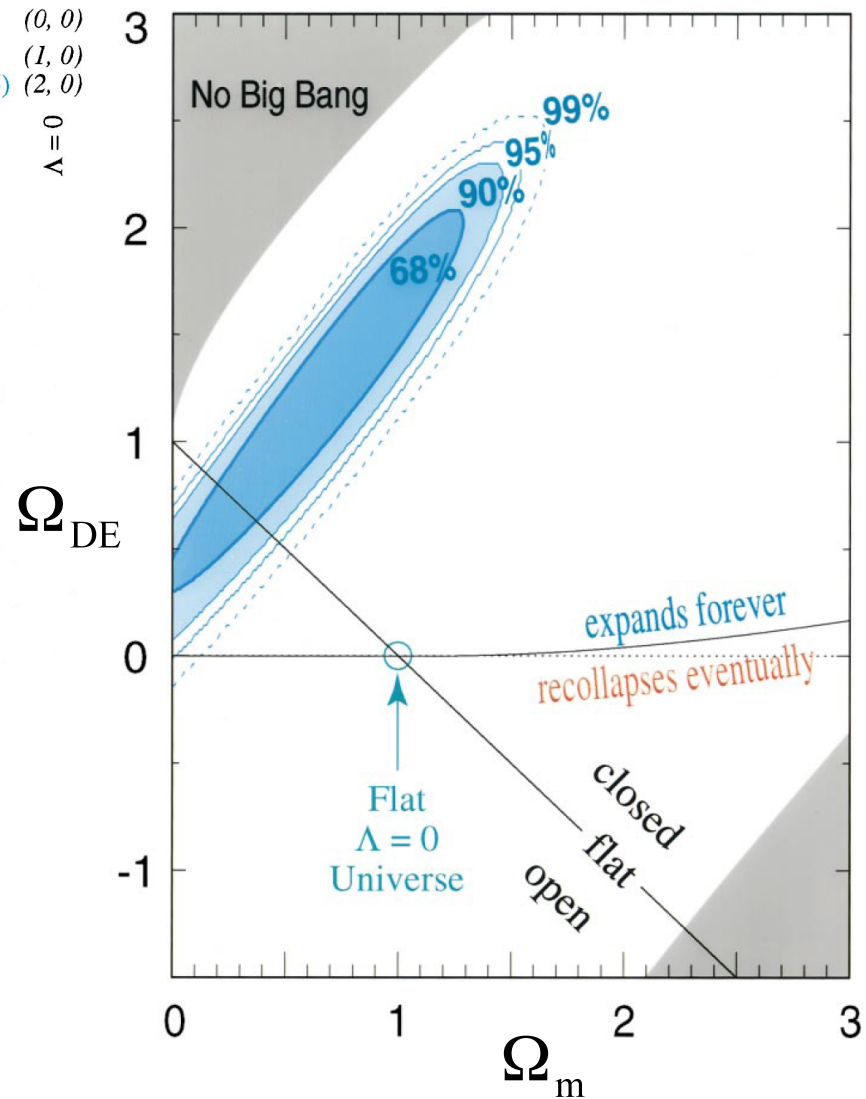
光度曲線を求めることで 絶対光度の決定

(K-補正, ダスト減光の影響評価)

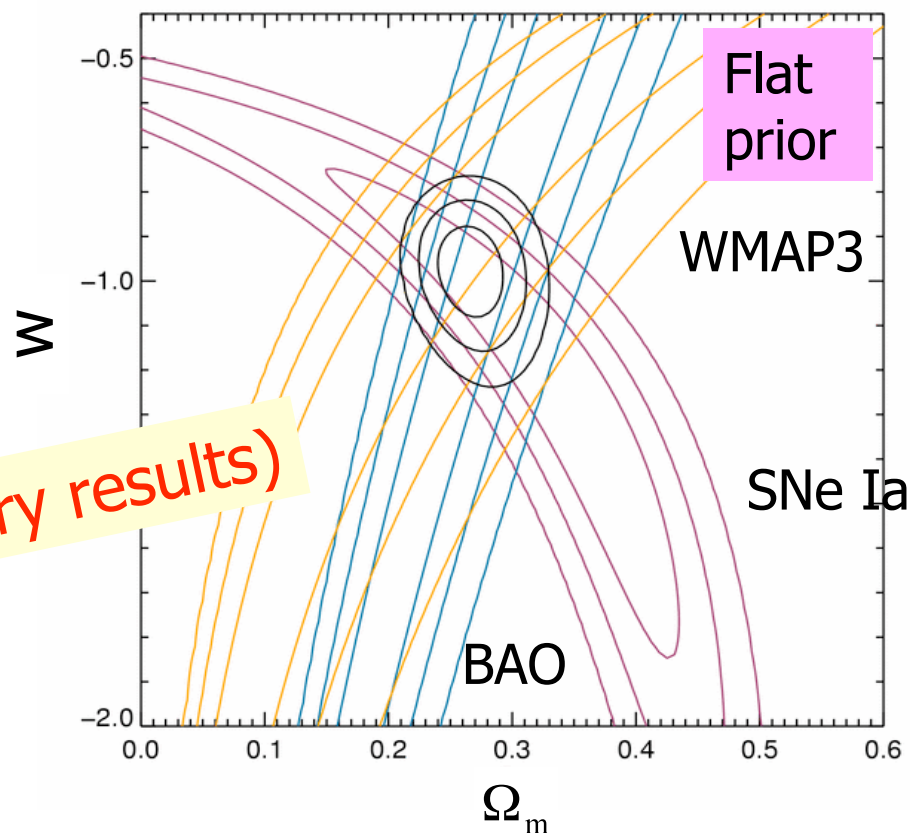
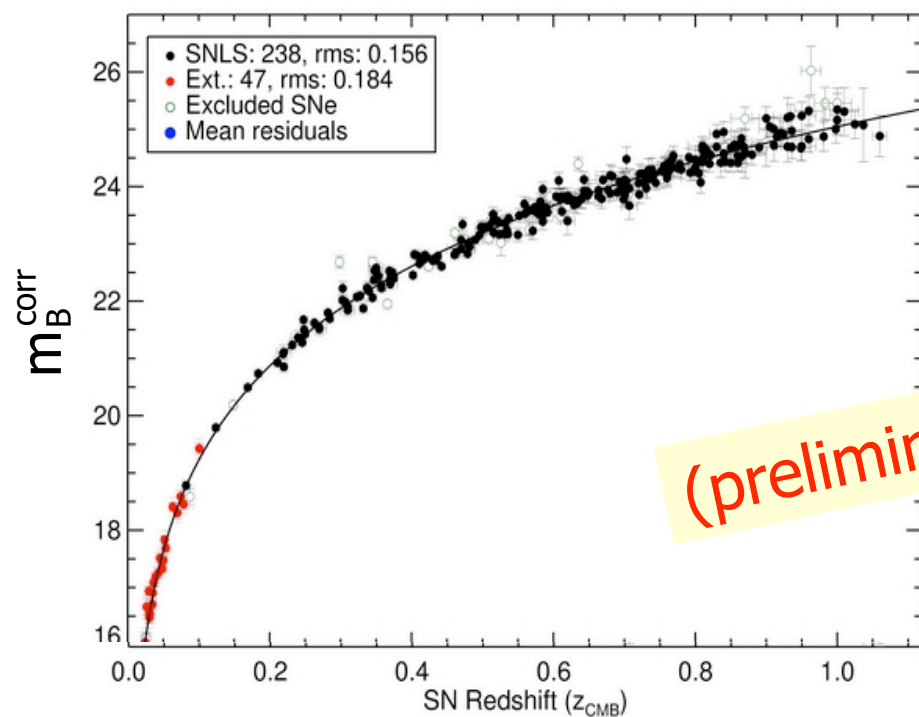
宇宙は加速膨張している



Perlmutter et al. (1999)



Supernova Legacy Survey (SNLS)



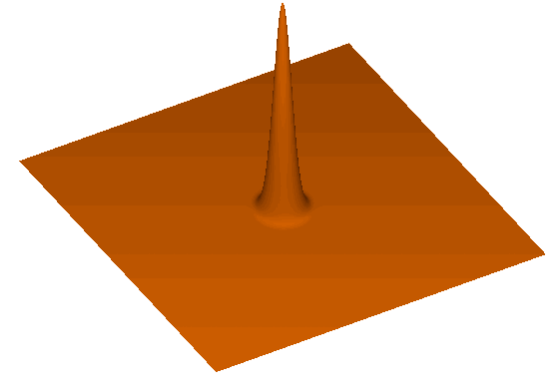
(preliminary results)

さらに3年間の観測で、
71個 \rightarrow \sim 240個 SNe Ia

Talk given by Sullivan
@ ROE-JSPS workshop

Sullivan et al. in prep.

バリオン振動



質量密度ゆらぎの空間分布に刻まれた

宇宙の晴れ上がり時の光子・バリオン流体の音響振動
($z \approx 1100$)

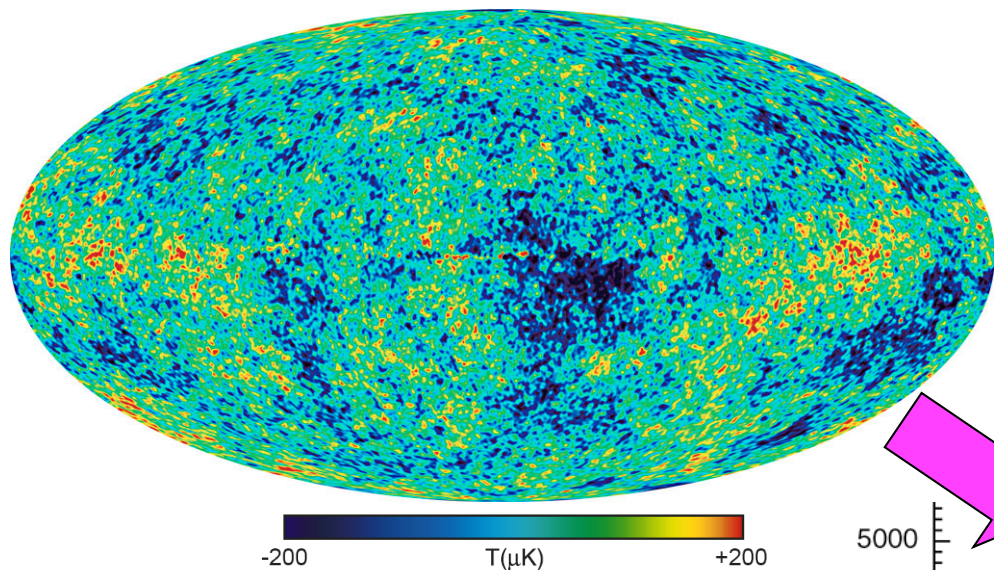
晴れ上がり前

- トムソン散乱を通じて、光子・バリオンが強く結合、
一成分流体として振る舞う

- 音波モードの存在 \Rightarrow 音速: $c_s = \frac{1}{\sqrt{3 \{1 + (3/4)(\rho_{\text{baryon}} / \rho_{\text{rad}})\}}}$

こうした振動の痕跡が、晴れ上がり後の宇宙を通して観測できる

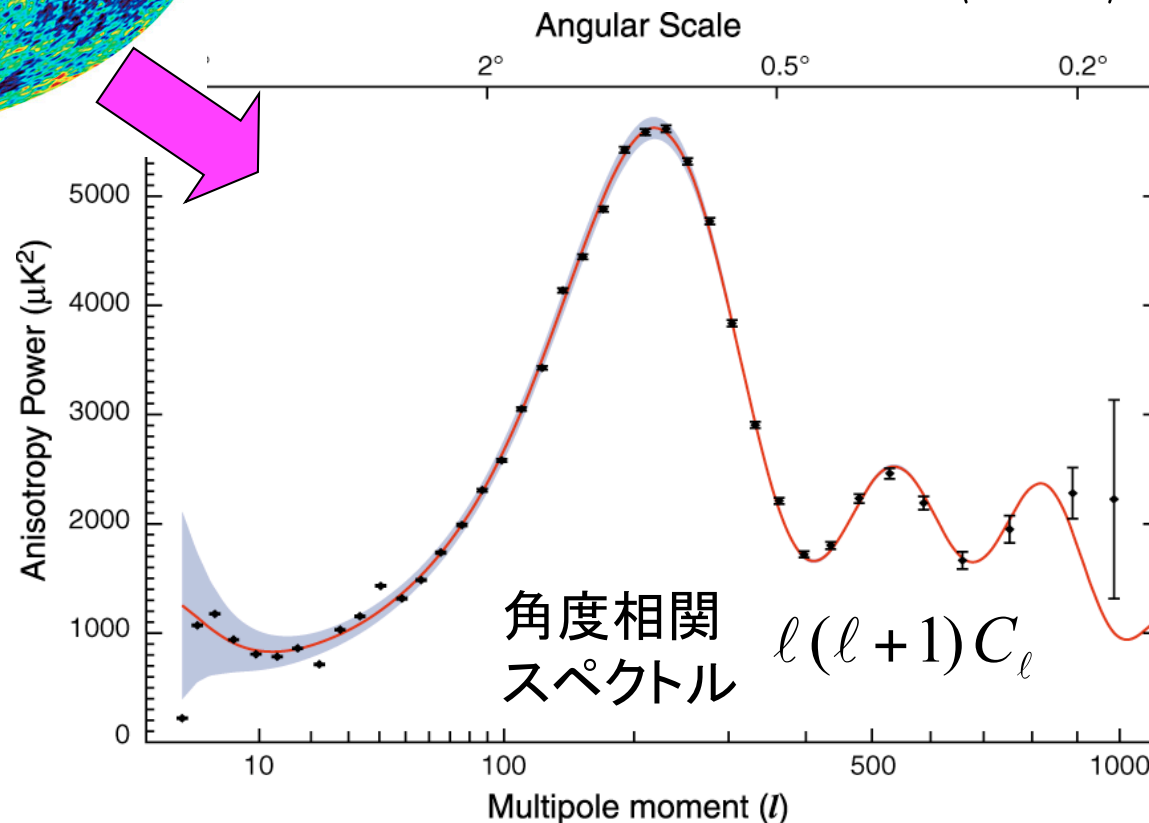
音響振動の痕跡: CMB非等方性



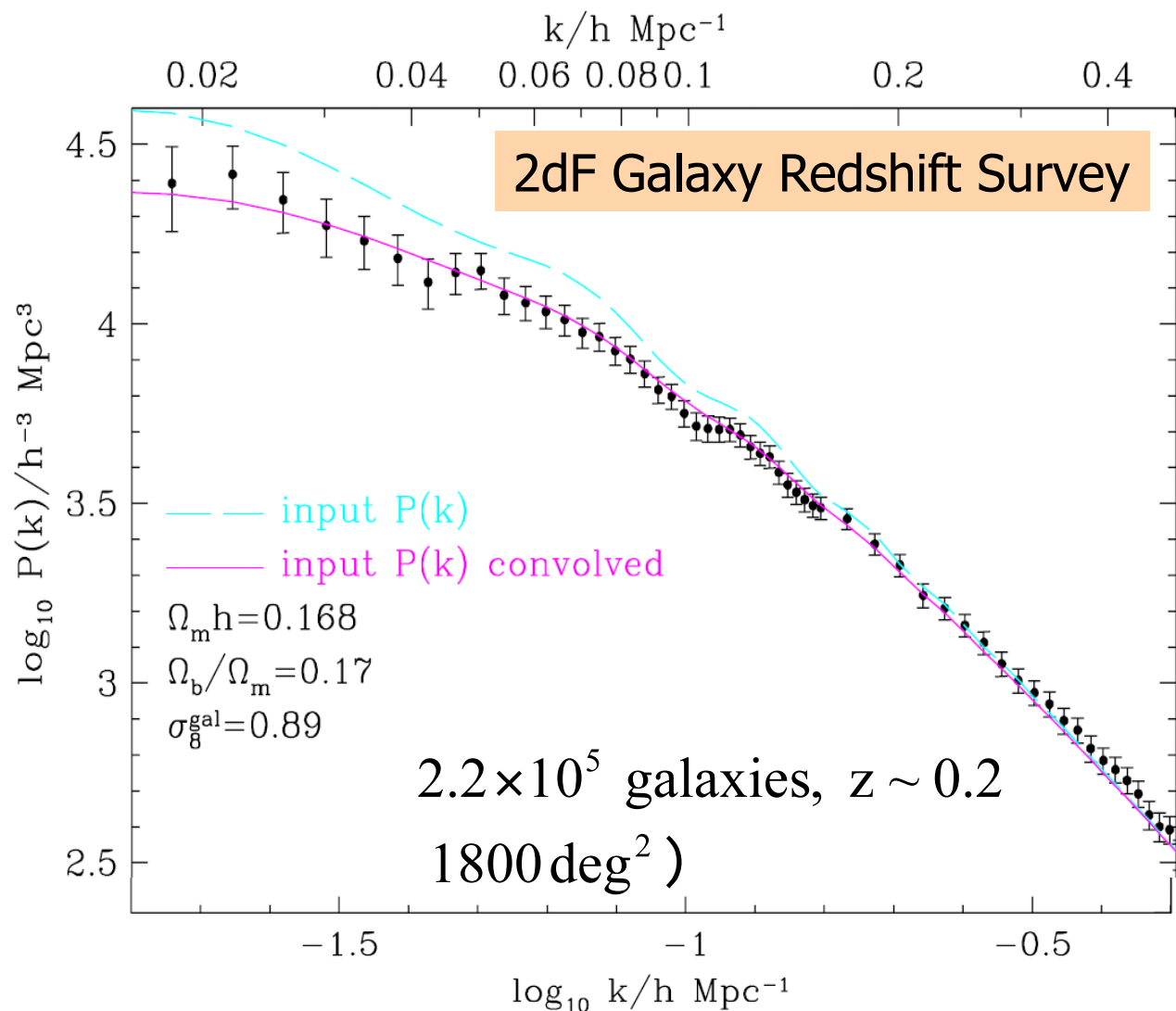
3year WMAP result

Spergel et al. (2006)

$$\Delta T(\theta, \varphi) = \sum_{\ell, m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$$
$$C_{\ell} = \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle$$



音響振動の痕跡: 銀河分布



パワースペクトル

$$P(k) = \frac{1}{(2\pi)^3} \langle |\delta(k)|^2 \rangle$$

$$\left(\begin{aligned} \delta(\vec{x}) &= \frac{\rho(\vec{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \\ &= \int_{\vec{k}} \delta(\vec{k}) e^{i\vec{k} \cdot \vec{x}} \end{aligned} \right)$$

Cole et al.(2005)

標準原器としてのバリオン振動

特徴的スケール： 晴れ上がり(脱結合)時の音響地平線

$$r_s(z_{\text{dec}}) \equiv \int_{z_{\text{dec}}}^{\infty} \frac{dz' c_s(z')}{H(z')} = 147 \left(\Omega_m h^2 / 0.13 \right)^{-0.25} \left(\Omega_b h^2 / 0.023 \right)^{-0.08} \text{Mpc}$$

- Ω_m, Ω_b, h だけに依存
- 物理プロセスが明解、不定性がない

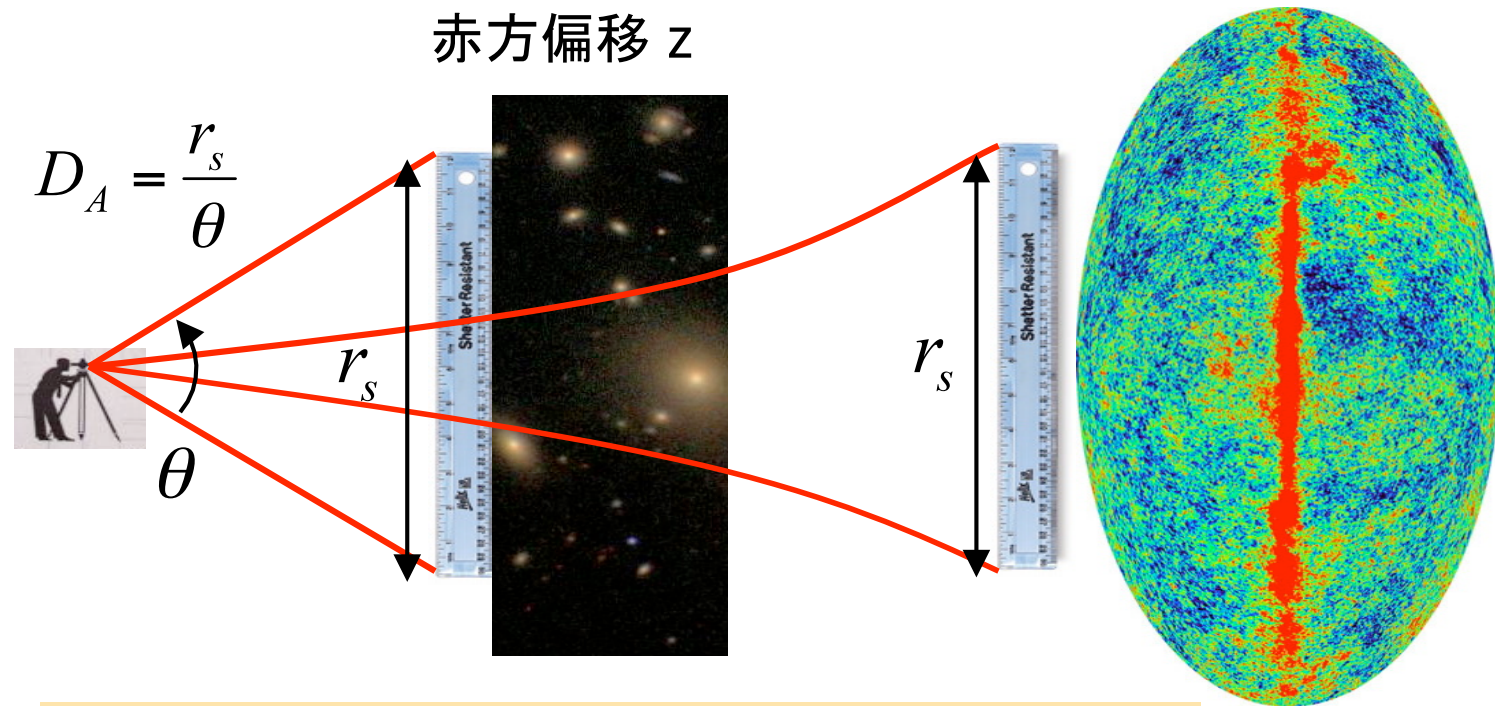


宇宙論的スケールでの長さを規定する「標準原器」として使える

銀河までの距離を測る

バリオン振動の特徴的スケール r_s を使うと

異なる時刻(赤方偏移)までの距離がわかる

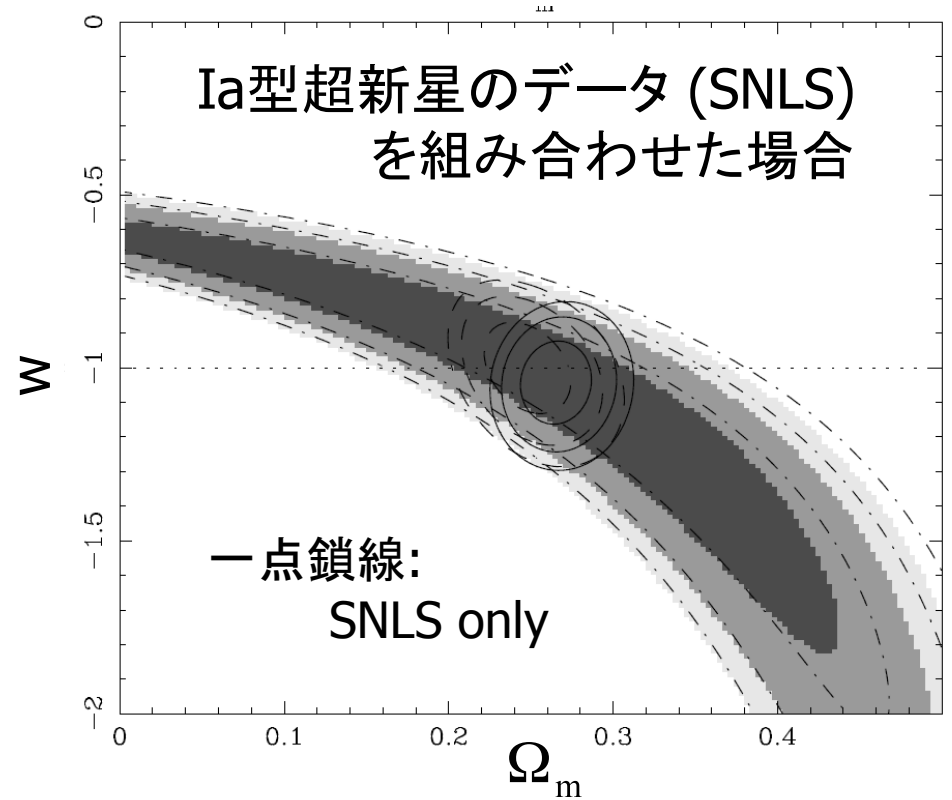
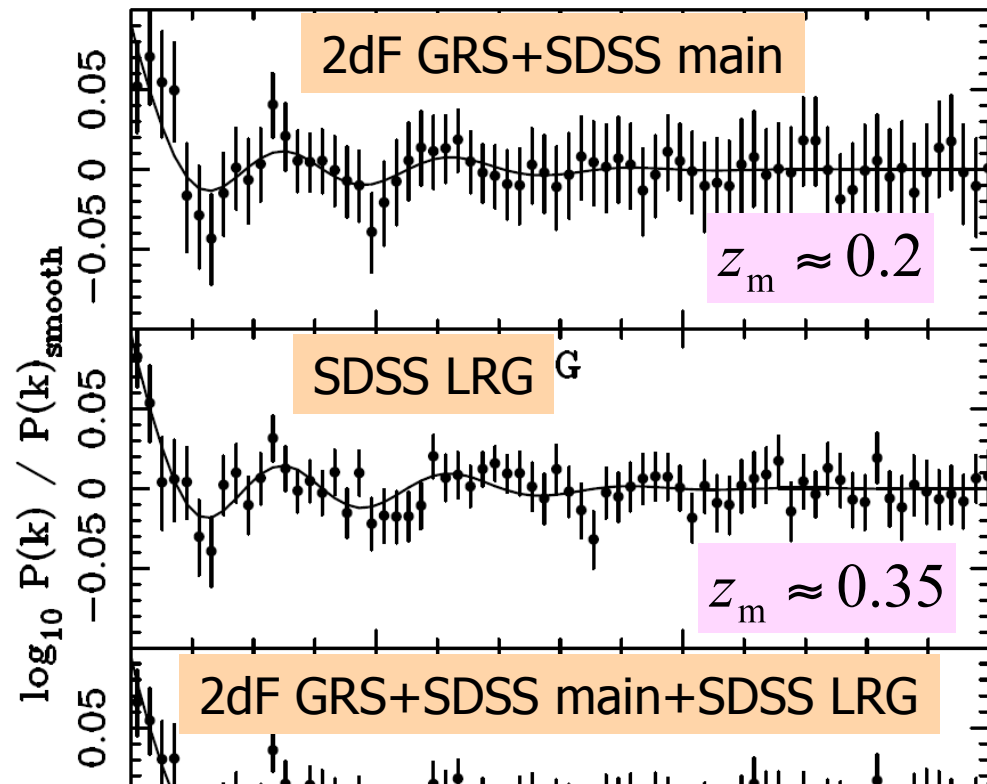


角径距離

$$D_A(z) = \frac{1}{(1+z)H_0\sqrt{|\Omega_K|}} \sinh \left[\sqrt{\Omega_K} \int_0^z dz' \frac{H_0}{H(z')} \right]$$

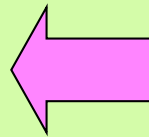
バリオン振動からの観測的制限

Percival et al. (2007)



$$\Omega_m = 0.249 \pm 0.018$$

$$w = -1.004 \pm 0.089$$

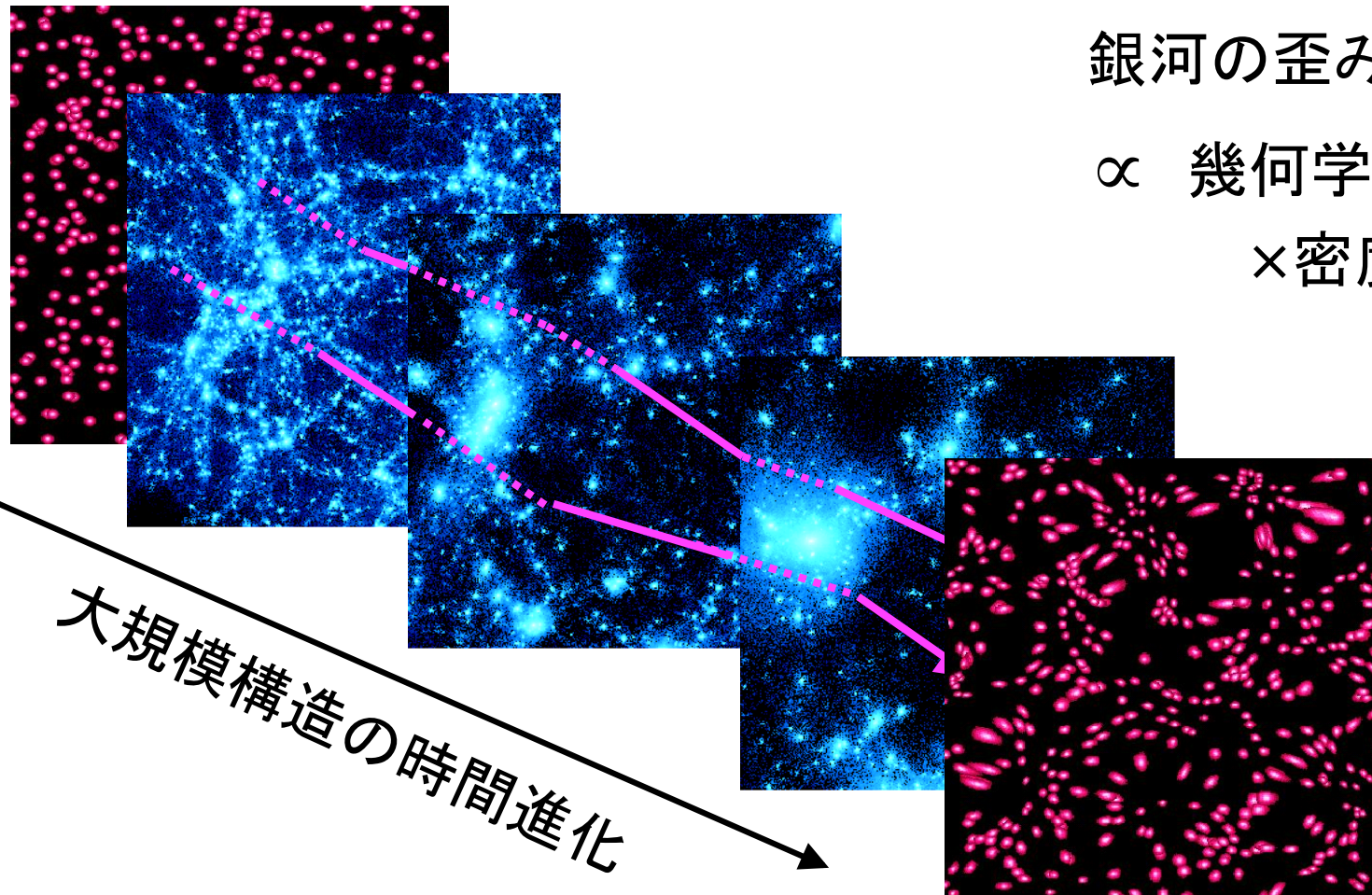


- Ia型超新星(SNLS)
- CMB角度スペクトルの音響ピーク (WMAP)

ただし、宇宙の平坦性と $w = \text{const.}$ を仮定

宇宙論的重力レンズ

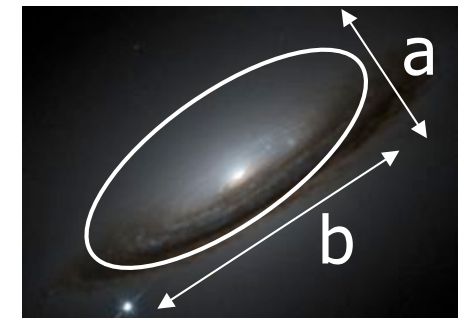
手前に存在する大規模構造の弱い重力レンズ効果により、遠方の背景銀河のイメージが歪む



銀河の歪み具合(楕円率)

\propto 幾何学的重み

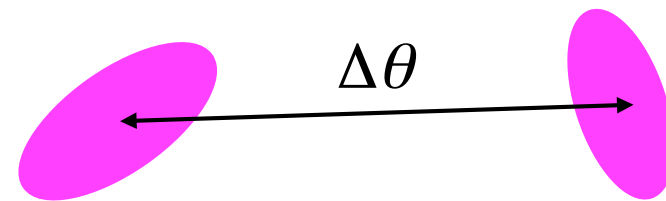
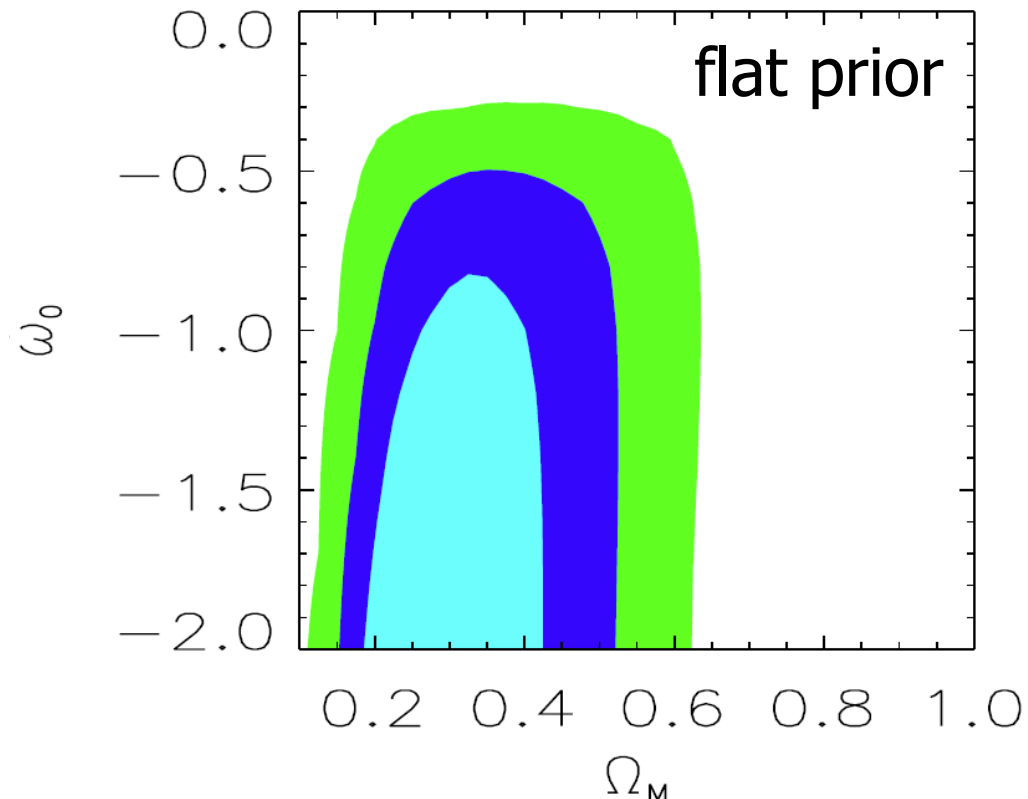
\times 密度ゆらぎの振幅



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

歪み相関

個々のイメージの歪みは、大規模構造の空間パターンを反映するため、お互い相関を持つ



統計相関に、

- 宇宙論的距離
- ゆらぎの成長率

の情報が含まれる

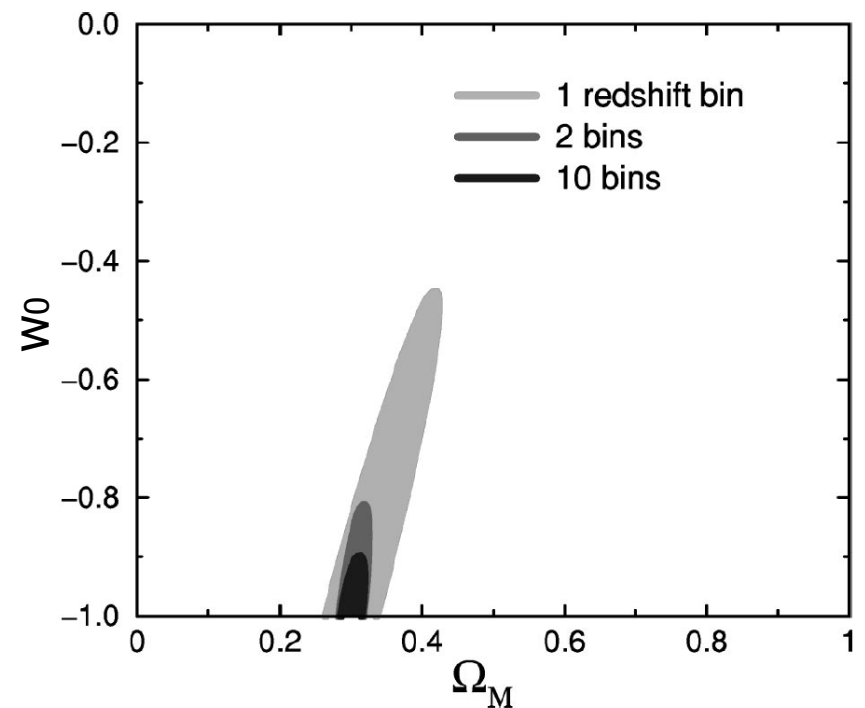
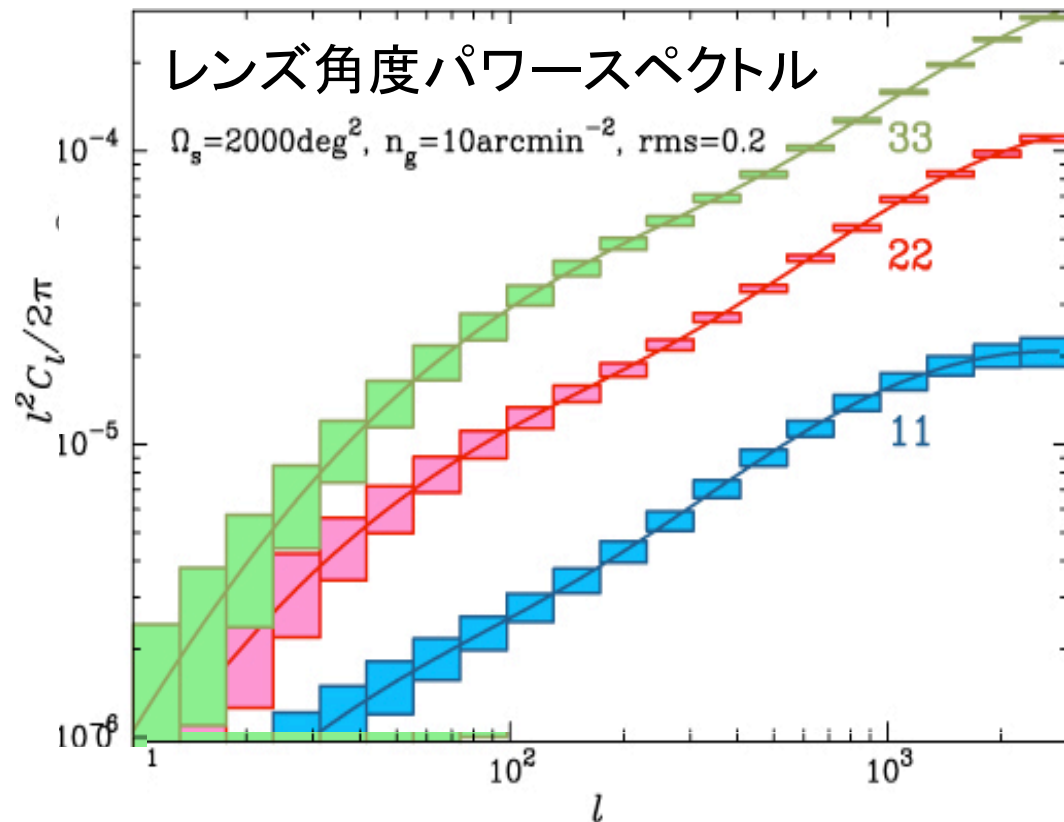
Semboloni et al. (2006)

重力レンズトモグラフィ

背景銀河を赤方偏移ごとにビンわけし、ビンごとに歪みを相関解析することで、奥行きが進化の情報が得られる

ゆらぎの進化により敏感

Hu (1999),
Huterer (2002),
Takada & Jain (2004)



観測手法のまとめ

Ia型超新星

(測光)

宇宙の標準光源、多数のサンプル

絶対光度推定法の信頼性、ダスト減光の影響

バリオン振動

(分光)

宇宙の標準原器、銀河の個性に依らない

赤方偏移歪み、銀河バイアスなどの影響

宇宙論的重力レンズ

(撮像+測光)

構造形成をトレース、

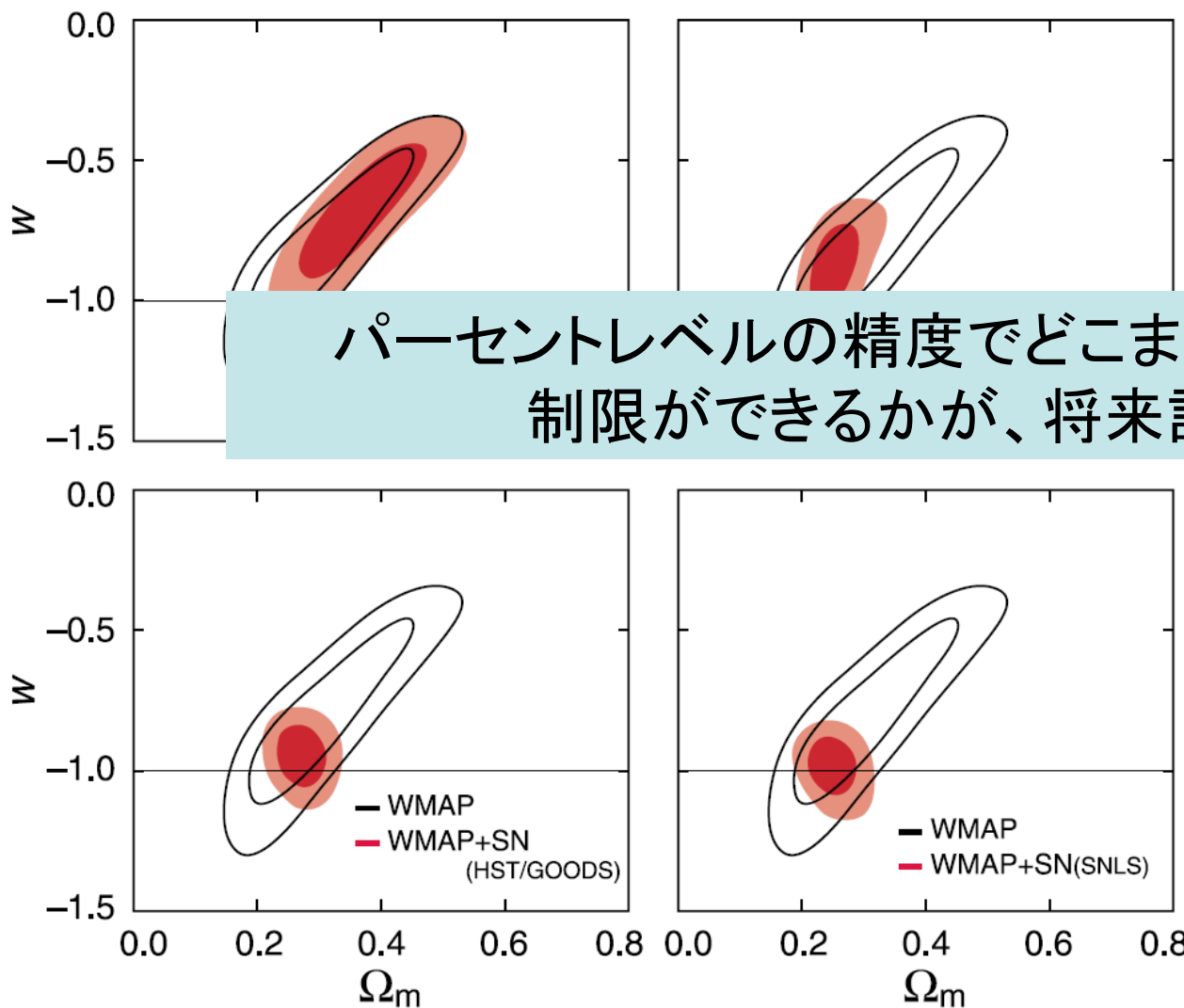
経験則に依らないクリーンな手法

レンズ測定法の高精度化、系統誤差の見積もり

将来計画と展望

3 year WMAPと組み合わせた解析

状態方程式パラメーター w ($=\text{const.}$)に対する制限



← 宇宙の平坦性を仮定

パーセントレベルの精度でどこまで状態方程式に制限ができるかが、将来計画の鍵

$$w \approx -1.0 \pm 0.1$$

※ 平坦性の仮定を除いても結果に大差なし

Spergel et al. (2006)

「Report on the Dark Energy Task Force (DETF)」

Albrecht et al. [astro-ph/0609591](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0609591)

We strongly recommend that there be an aggressive program to explore dark energy as fully as possible, ...

「Report by the ESA-ESO Working Group on Fundamental Cosmology」

Peacock et al. [astro-ph/0610906](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610906)

..., studies of dark energy and inflation are of the utmost interest to the science community well beyond astrophysics.

DETF categories

Improvement factor
normalized
by stage 2

Stage 1

Current status

WMAP, SCP, 2dF,

$\Delta W_0 \sim 5\%$, $\Delta W_a \sim 40\%$

including CMB prior

Stage 2

On-going project
(~2008)

SDSS-II, CFHT-SNLS,
CFHTLS, ...

1

Stage 3

Near-term project
(~2014+)

DES, Pan-STARRS4,
HSC, WFMOS, ...

~ 3

Stage 4

Long-term project
(~2020+)

LSST, JDEM, SKA

space

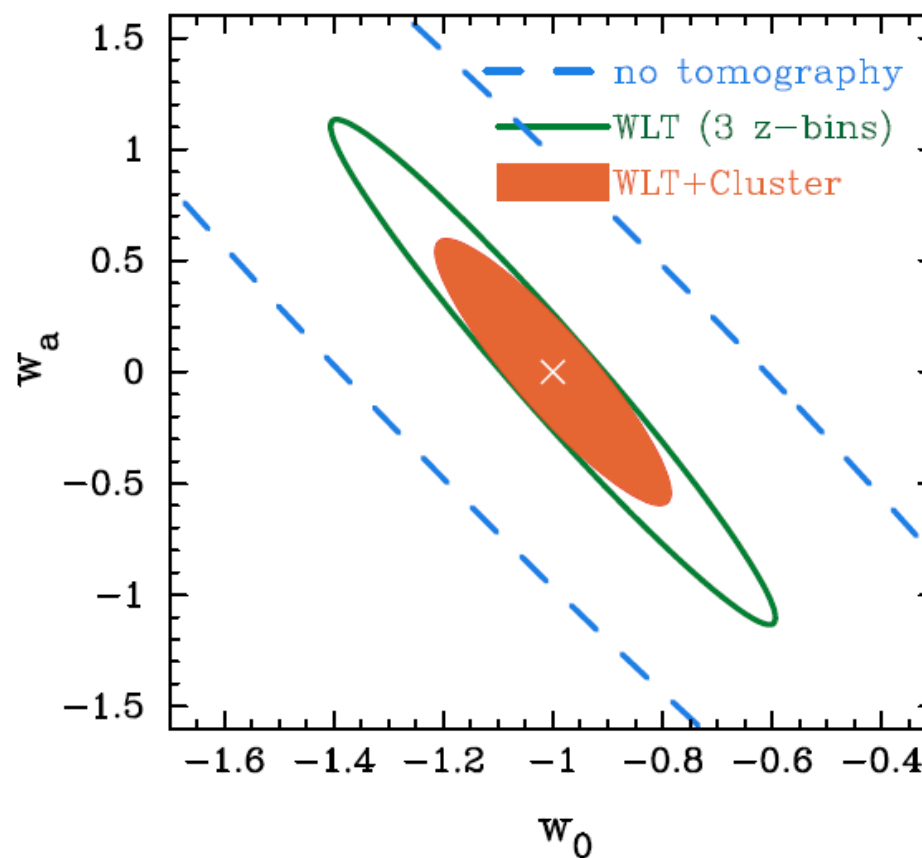
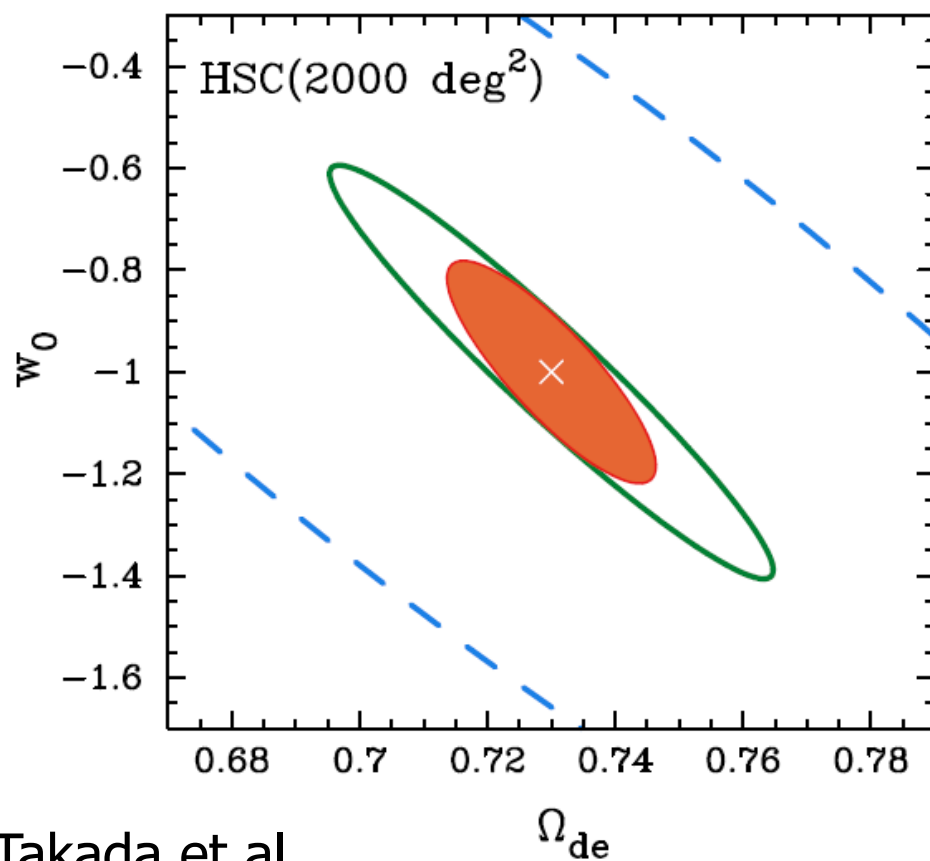
~ 10

Hyper Suprime-Cam (HSC)

特定領域
研究

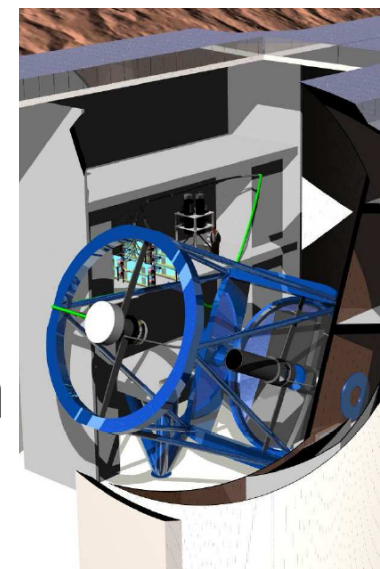
「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」

研究代表者: 唐牛 宏



WFMOS

Wide-**F**ield **M**ulti-**O**bject **S**pectrograph



すばる望遠鏡+Gemini望遠鏡

4,000天体同時分光器による赤方偏移サーベイ

$z \sim 0.5-1.3$	輝線銀河	2×10^6 個	~ 150 晩
$z \sim 2.5-3.3$	ライマンブレイク銀河	6×10^5 個	~ 130 晩

銀河分布の空間パターンからバリオン振動スケールを決定し、

$D_A(z)$, $H(z)$ を $\sim 1\%$ の精度で決定 $\longrightarrow \Delta w_0 \sim 3\%$, $\Delta w_a \sim 25\%$

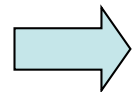
Is DE survey bad science ?

S.D.White, arXiv:0704.2291

観測プロジェクトの巨大化と観測施設の占有

(e.g., DES, LSST, WFMOS)

単一のプロジェクトゴール (ダークエネルギーの状態方程式の決定)



素粒子実験コミュニティの文化

(個々人の顔が見えにくい巨大共同プロジェクト)

※ 実際、いくつかのプロジェクトに素粒子実験グループが参入している

天文の観測施設を利用する以上、天文のコミュニティにとっても実りの多い共同プロジェクトにすべき(ダークエネルギーに特化しない)

ダークエネルギー探査は脅威？

ダークエネルギー探査は、
重力波コミュニティにとっても弊害？

観測手段とテーマ・目的自体は、完全に独立

重力波を使ってもダークエネルギー探査ができる
という意味では相補的

ただ、将来も、偏重した予算配分が続くと不安

なるべく早く、重力波イベントが見つかることを祈る

ダークエネルギーにとらわれない独自のテーマを追求する

まとめ

まとめ

ダークエネルギーは、基礎物理の大きな問題
現在のところ、有効なアプローチは天文学的観測のみ

さまざまな観測的手法:

Ia型超新星、バリオン振動、宇宙論的重力レンズ、...

大型観測プロジェクトと装置開発:

DES, LSST, JDEM (SNAP, DESTINY, ADEPT), DUNE

Pan-STARRS, **HSC, WFMOS**

天文学コミュニティとの連携と調和のとれた共同プロジェクト

今後の観測の進展と観測成果に期待