

夜空のムコウを探る

東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2008年9月30日 広島大学物理学科セミナー

米国アパッチ天文台の夜空 (Changbom Park氏撮影)

青空しか知らないとこの世界だけが
唯一の存在のように思ってしまう

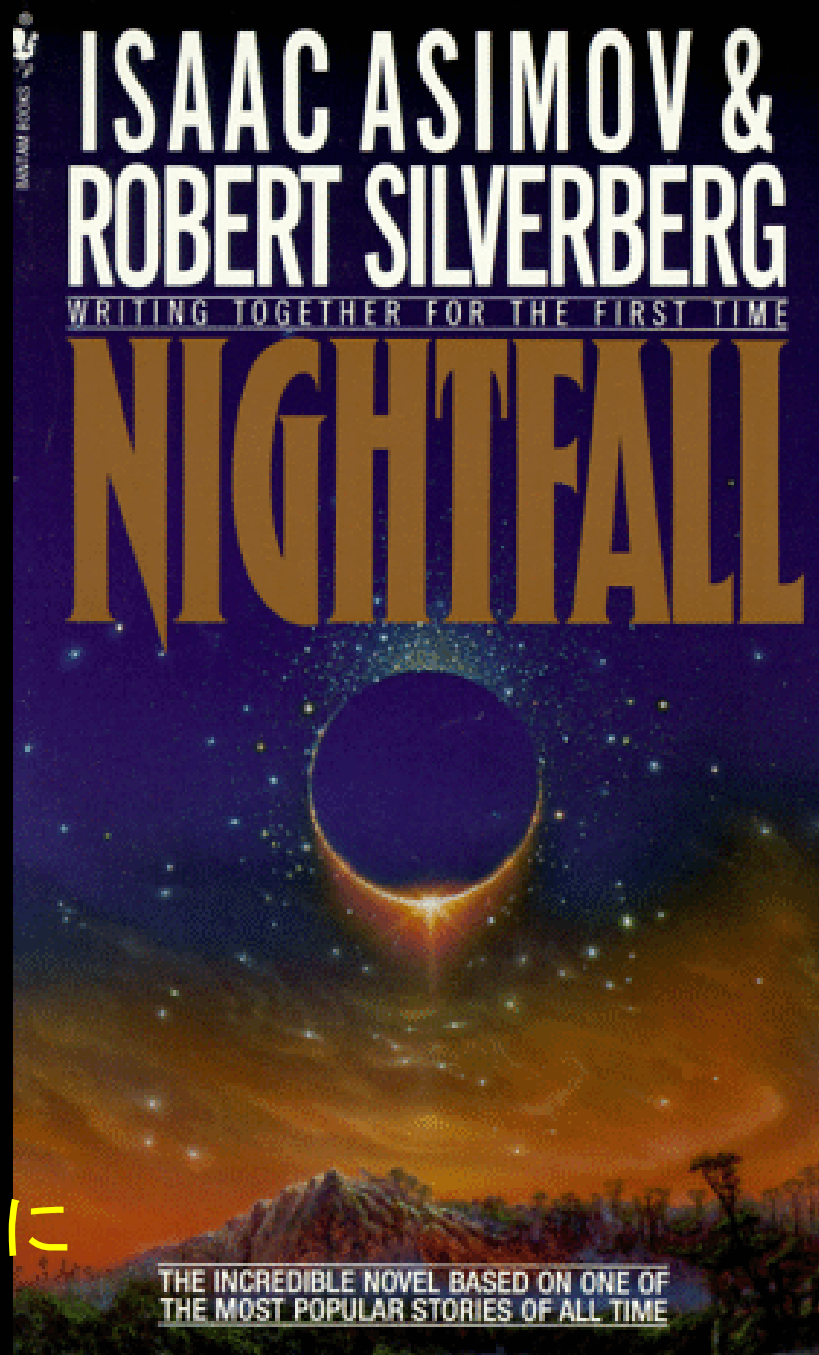


(すばる観測所、田中壱氏撮影)

夜来たる



6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに
二千年に一度の夜が訪れる



「我々は何も知らなかった」

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

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 (Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light)
 - beauty and clearness of theory was overshadowed by two clouds
- 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
誕生日	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	他人と反発することが多く、協調性に欠け、群集まることを嫌う
総被引用回数	約25,000 (dark matter)	約5000 (dark energy) 約10000 (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
 - 5-10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
- 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、低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観測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

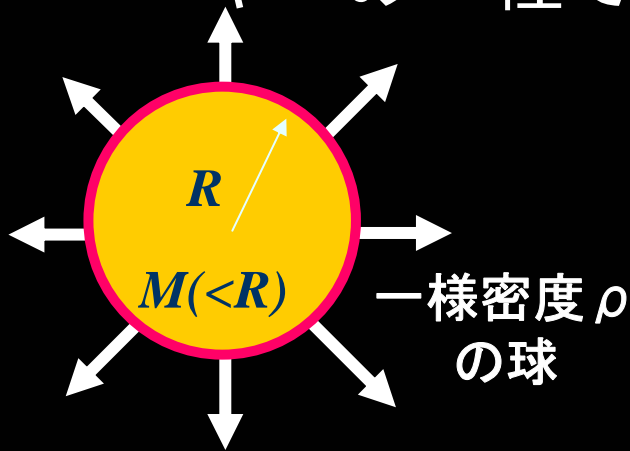
宇宙膨張の方程式

■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」(Λ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る



$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

宇宙年齢と加速膨張

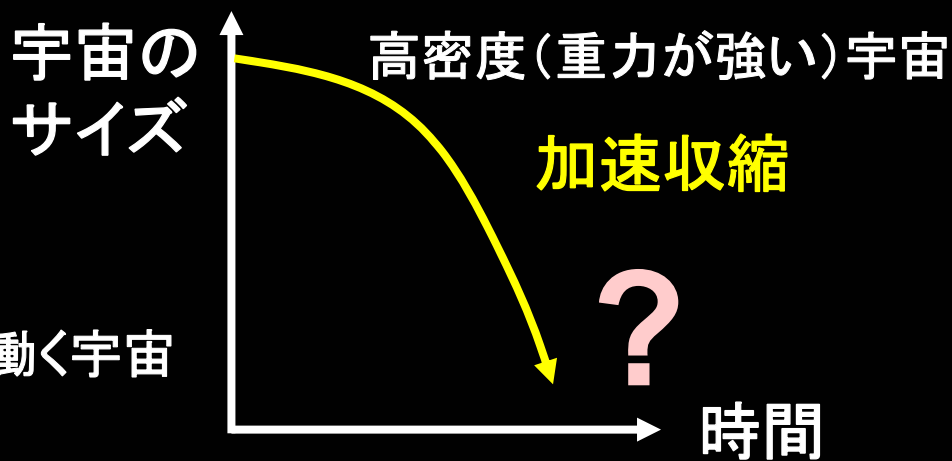
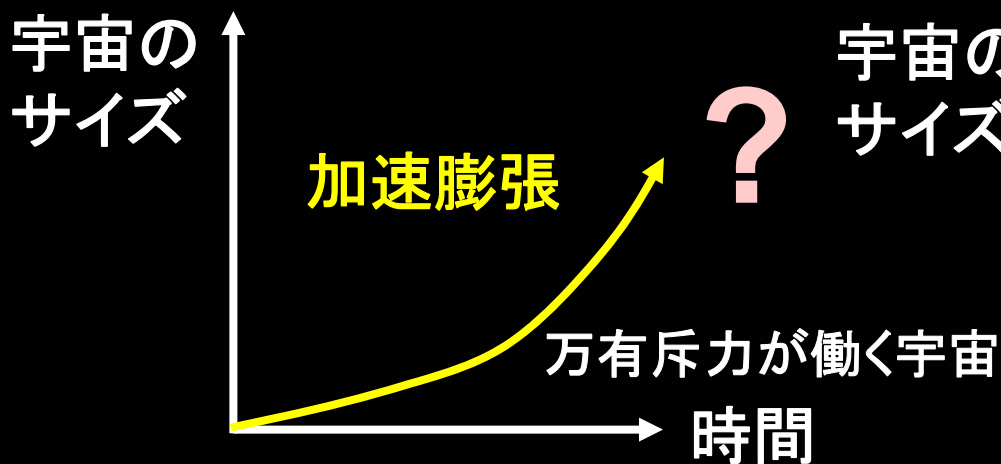
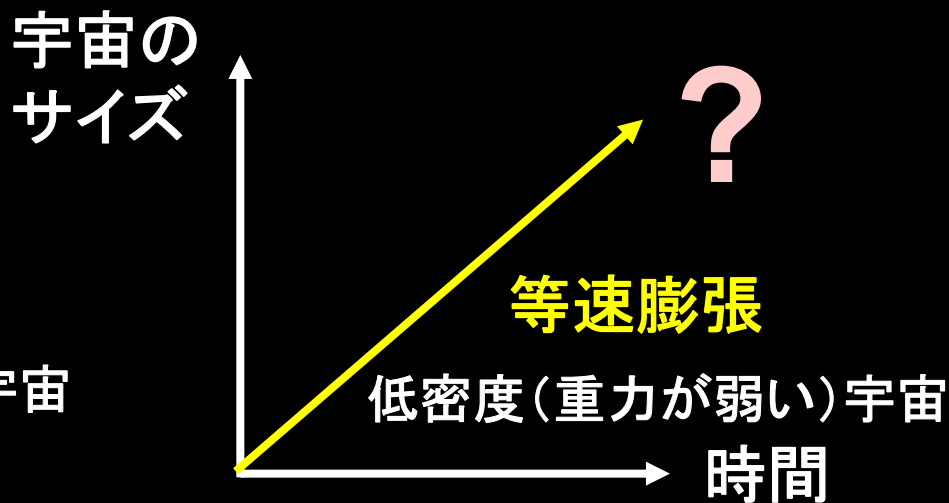
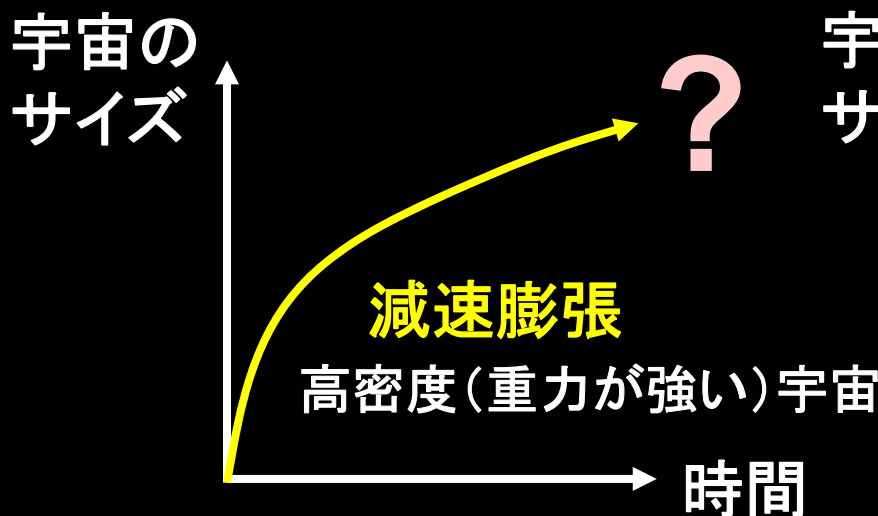
- **宇宙年齢**: $137.3^{+1.3}_{-1.7}$ 億年 (Spergel et al. 2007)
- **ハッブルの法則**: $v = H_0 d$
 - 後退速度が一定ならば, $d/v = 1/H_0$ で一点に収縮
 - $H_0 = 73 \pm 3$ km/s/Mpc (Spergel et al. 2007)
 - $1/H_0 = 134^{+6}_{-5}$ 億年 (一致しすぎ!?)
- **宇宙は等速膨張する(後退速度が一定)?**

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

- 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 ($p < 0, \Lambda = 0$)?

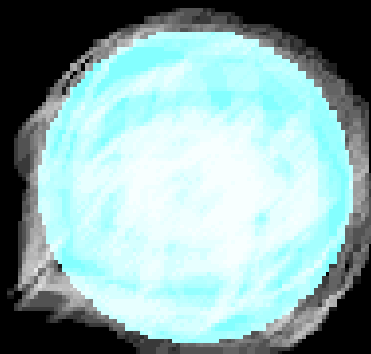
宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 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 ⇒ 宇宙の未来もわかる



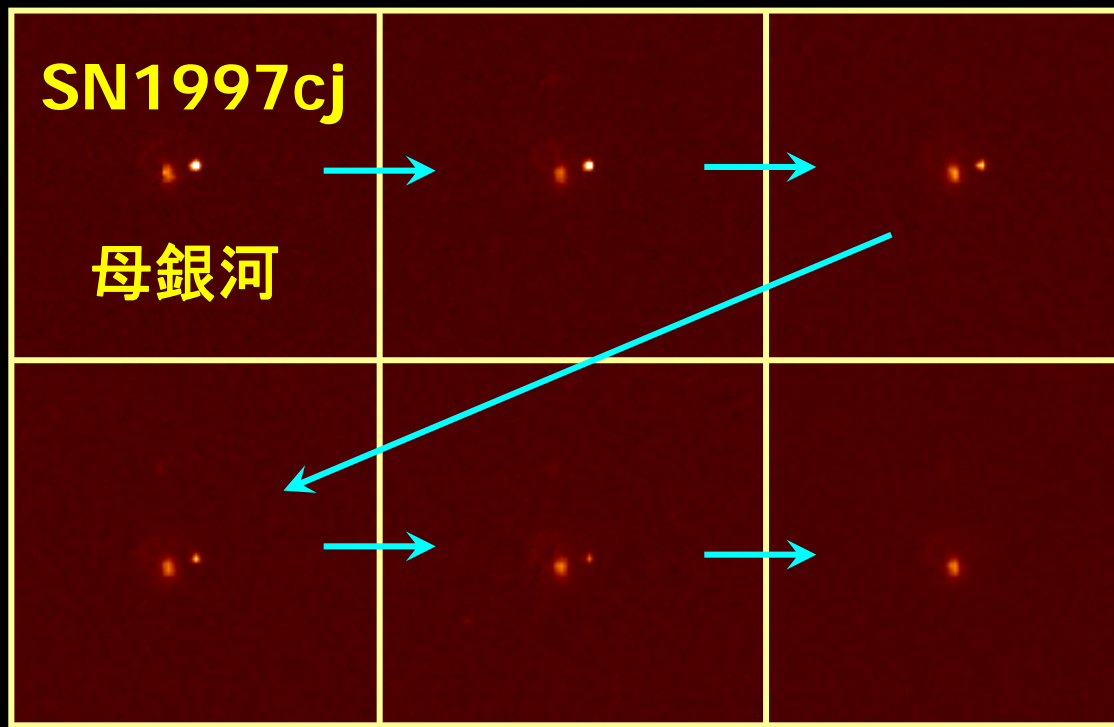
Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる**連星系**の**進化の最終段階**
- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
 - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力を支える)には、安定に存在できる最大質量がある
 - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
 - これを越えると不安定となり爆発を起こす

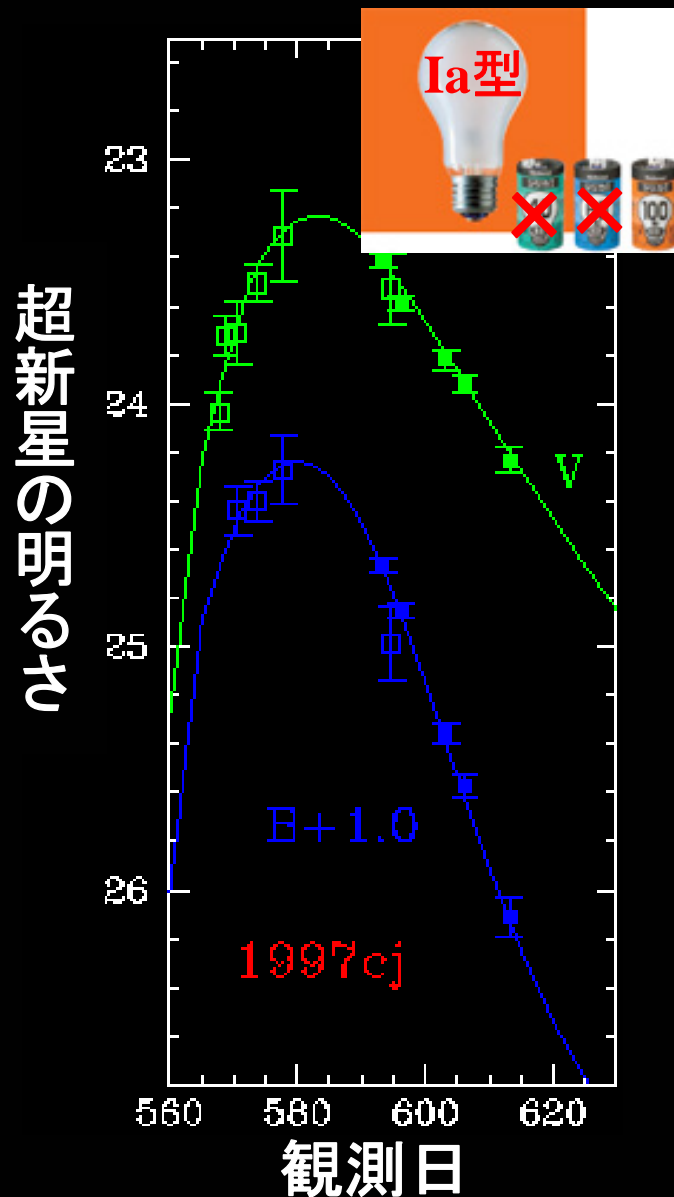


Ia型超新星の光度曲線の測定

- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測

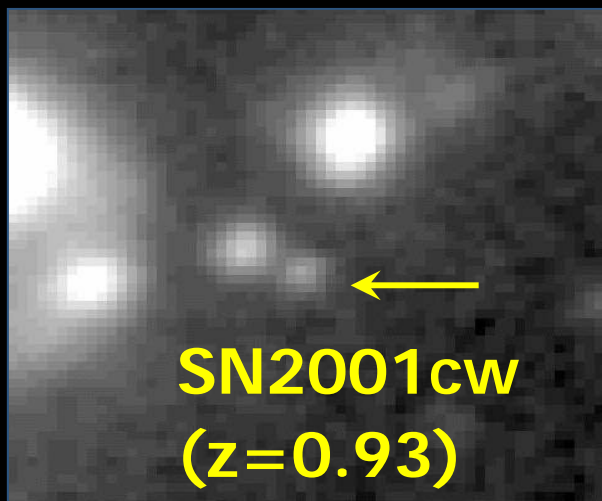


宇宙の標準光源 (ろうそく): Ia型超新星

見かけの明るさ: F

真の明るさ: L

Ia型超新星



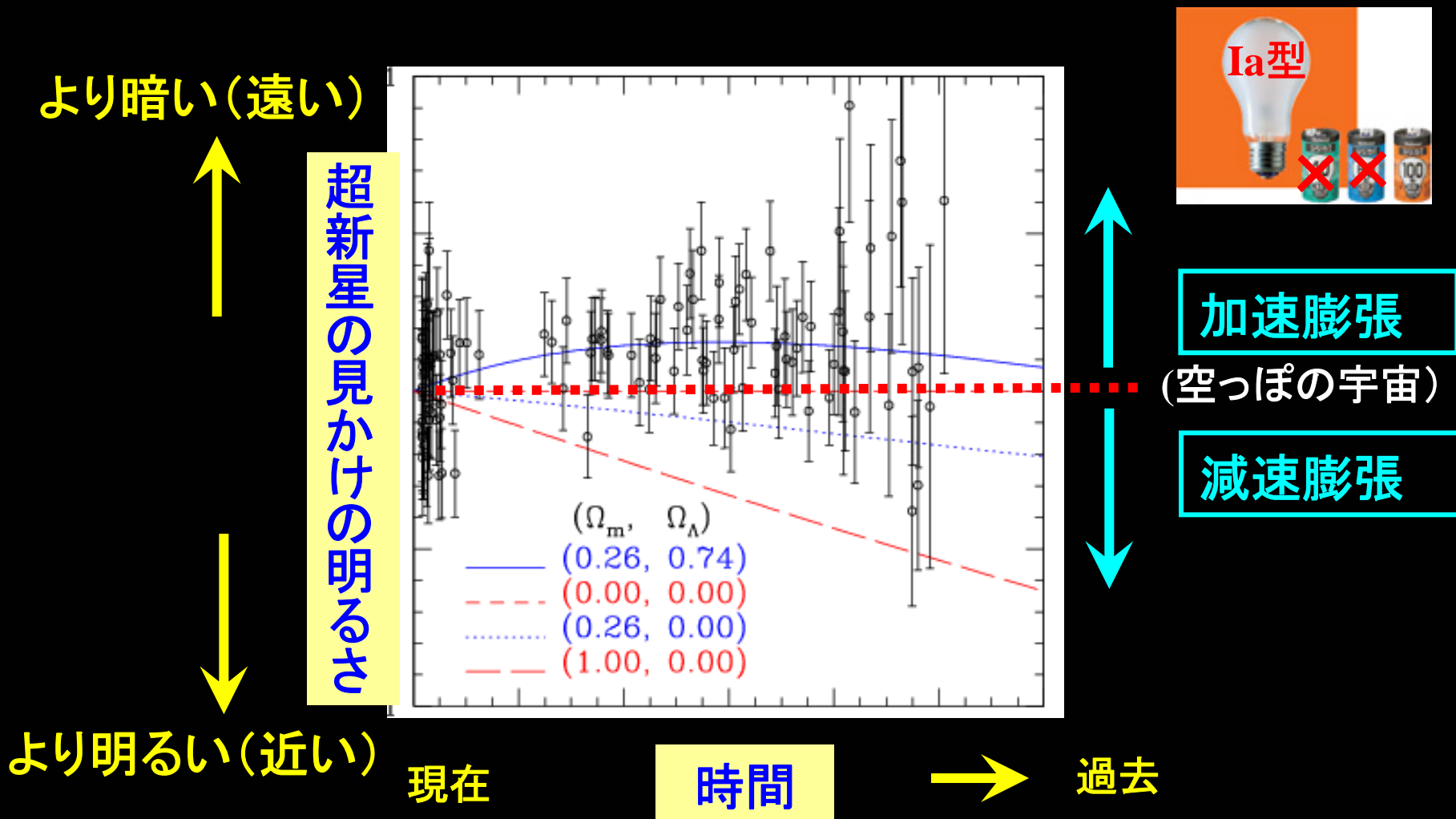
距離: D

超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

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

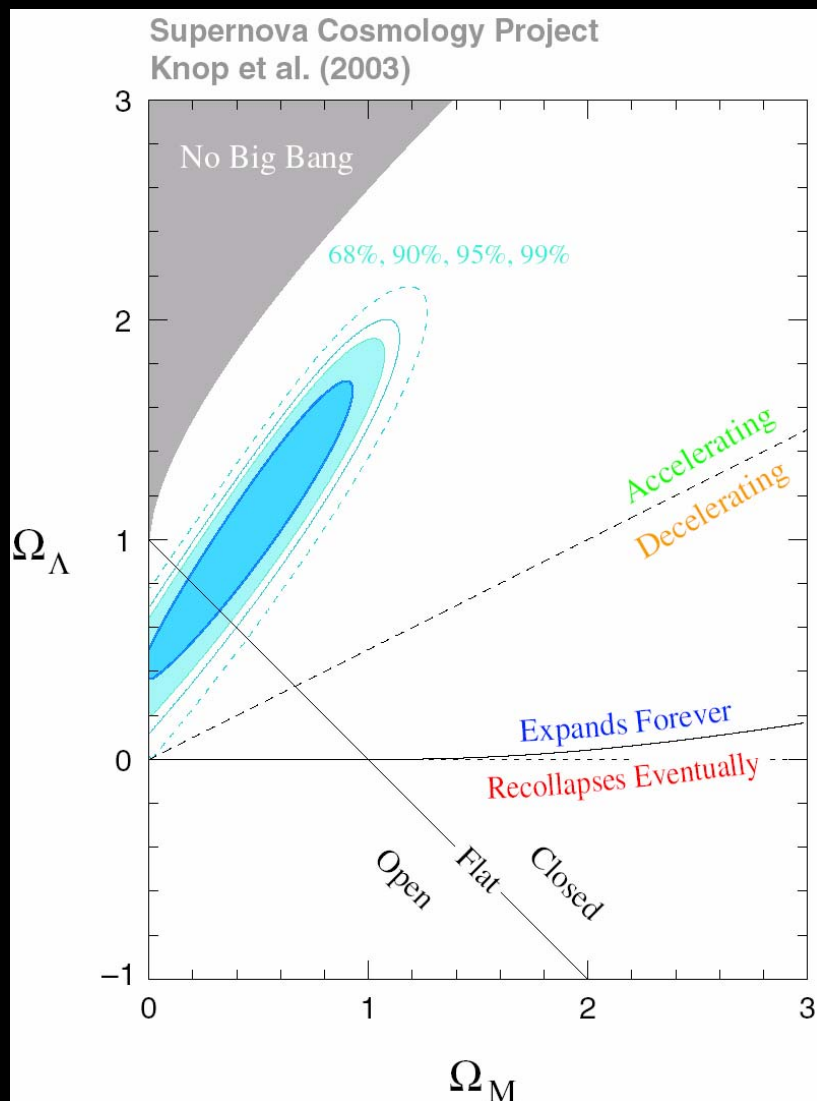


超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 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 Λ の歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

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

宇宙定数 (時空の幾何学量)
移項
物質場 (真空のエネルギー密度?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙定数の自然な大きさ：プランク密度

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的制限： $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$ 物理学史上最大の理論と観測の不一致！

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 $w \Rightarrow p = w \rho$

■ $w=0$: 物質、 $w=1/3$: 輻射、 **$w=-1$: 宇宙定数**

■ 相対論ではポワソン方程式は

$$\Delta \phi = 4 \pi G (\rho + 3p) = 4 \pi G \rho (1 + 3w) \quad \text{なので}$$

$w < -1/3 \Rightarrow$ 万有斥力

■ w が時間に依存しなければ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$

■ $-1 < w < -1/3$: (一般の)ダークエネルギー

■ もはや**定数である理由**すらない: **$w=w(t)$**

$w = -1$ 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

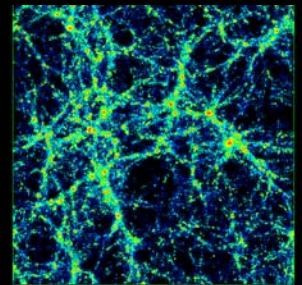
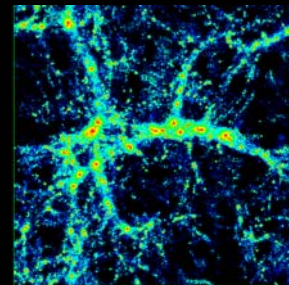
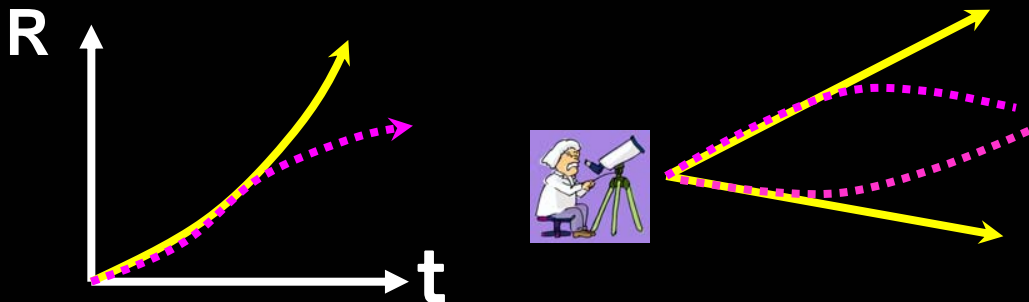
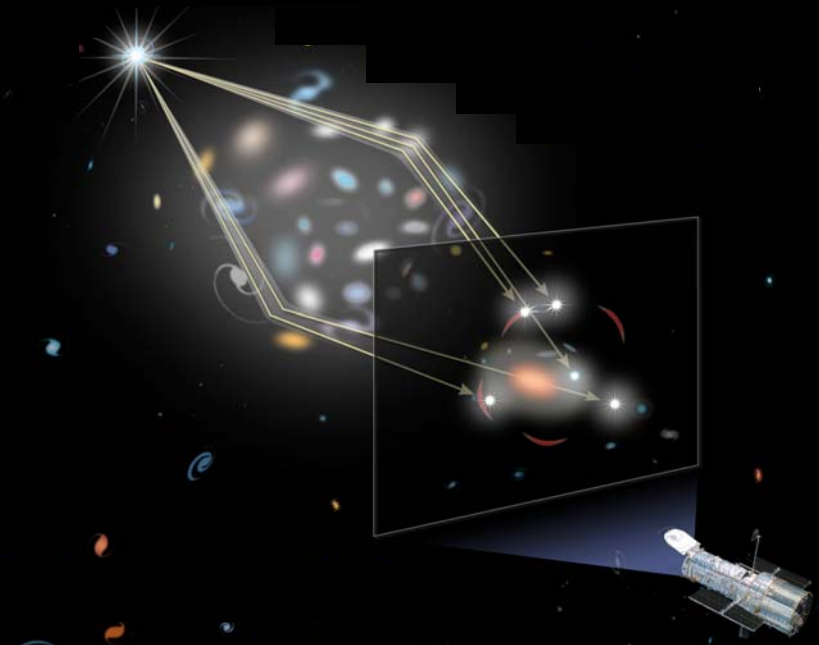
$$w(a) = -\frac{1}{1 + \Omega_m(a)} \quad \text{where} \quad \Omega_m(a) = \frac{\Omega_m}{a^3} \left(\frac{H_0}{H(a)} \right)^2$$

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

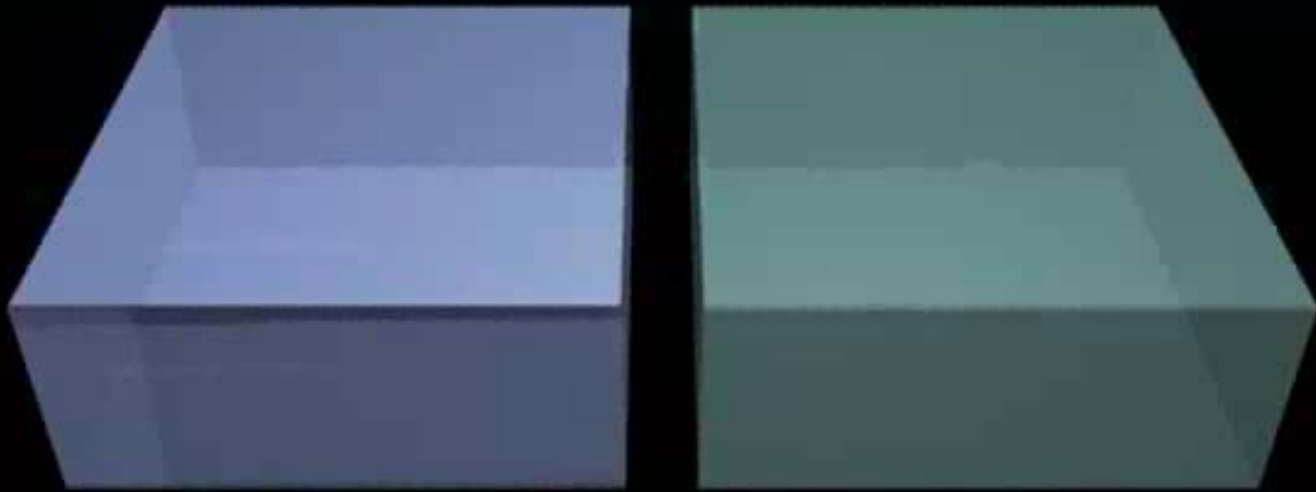
重力レンズ \propto (宇宙の幾何) \times (宇宙の構造)

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
 - バリオン振動(BAO: Baryon Acoustic Oscillation)



CMB 音響振動



NASA/WMAP Science Team

光子音響振動

- 地平線内の光子流体
 - 光子圧のために揺らぎが振動
 - Θ_0 : 温度揺らぎのモノポール成分

$$\frac{d^2 \tilde{\Theta}_0(k, \eta)}{d\eta^2} + \frac{1}{a} \frac{da}{d\eta} (1 - 3c_s^2) \frac{d\tilde{\Theta}_0(k, \eta)}{d\eta} + k^2 c_s^2 \tilde{\Theta}_0(k, \eta) \approx 0$$

- η : 共形時間 ($dt = a d\eta$)
- $c_s(\eta)$: 音速
- 断熱揺らぎの場合には近似的に
$$\tilde{\Theta}_0(k, \eta) \approx A(k) \cos[kr_s(\eta)]$$

バリオン振動 (BAO)

- 光子流体振動の近似解

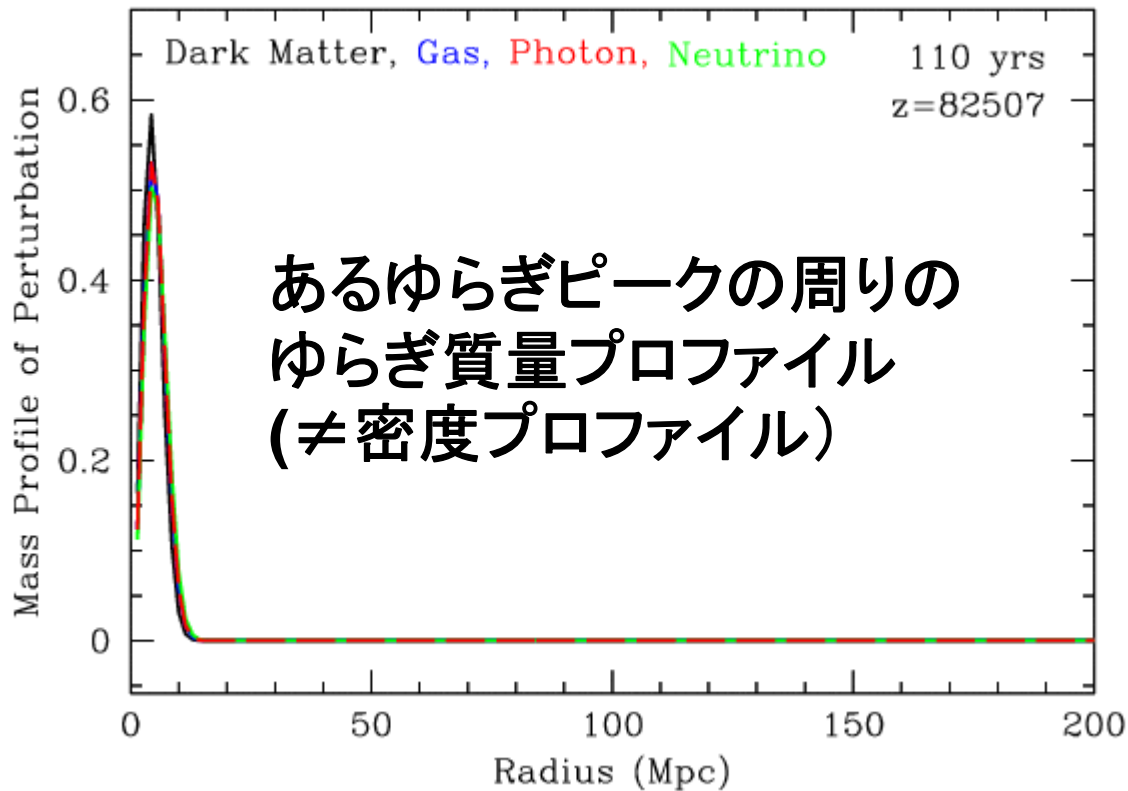
$$\tilde{\Theta}_0(k, \eta) \approx A(k) \cos[kr_s(\eta)]$$

- トムソン散乱を通じて、光子振動が脱結合時のバリオン密度揺らぎに振動成分を付け加える

$$\tilde{\delta}_{baryon}(k, \eta_{dec}) \approx \underbrace{\tilde{\delta}_{baryon,0}(k, \eta_{dec})}_{\text{振動なし}} - \underbrace{\varepsilon(k) \sin[kr_s(\eta_{dec})]}_{\text{振動モード}}$$

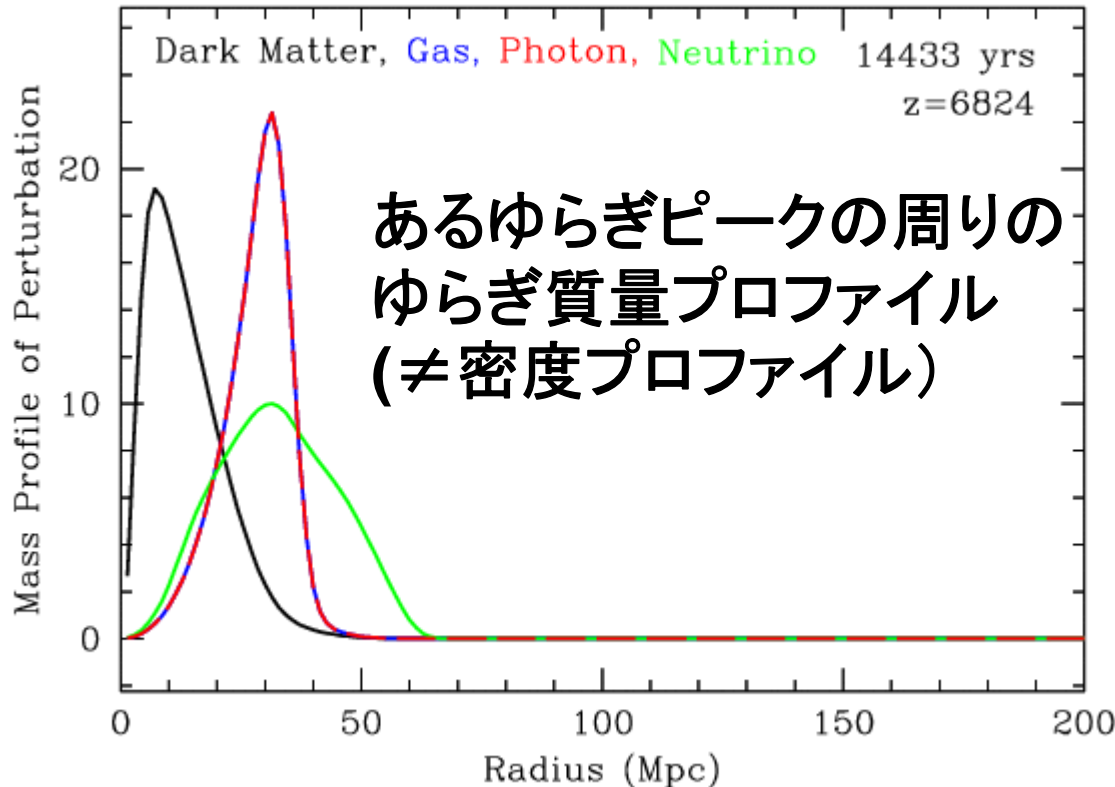
- その後、重力を通じてバリオン振動が、全物質 (CDM+バリオン) の密度ゆらぎスペクトルに振動成分の痕跡を残す

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)

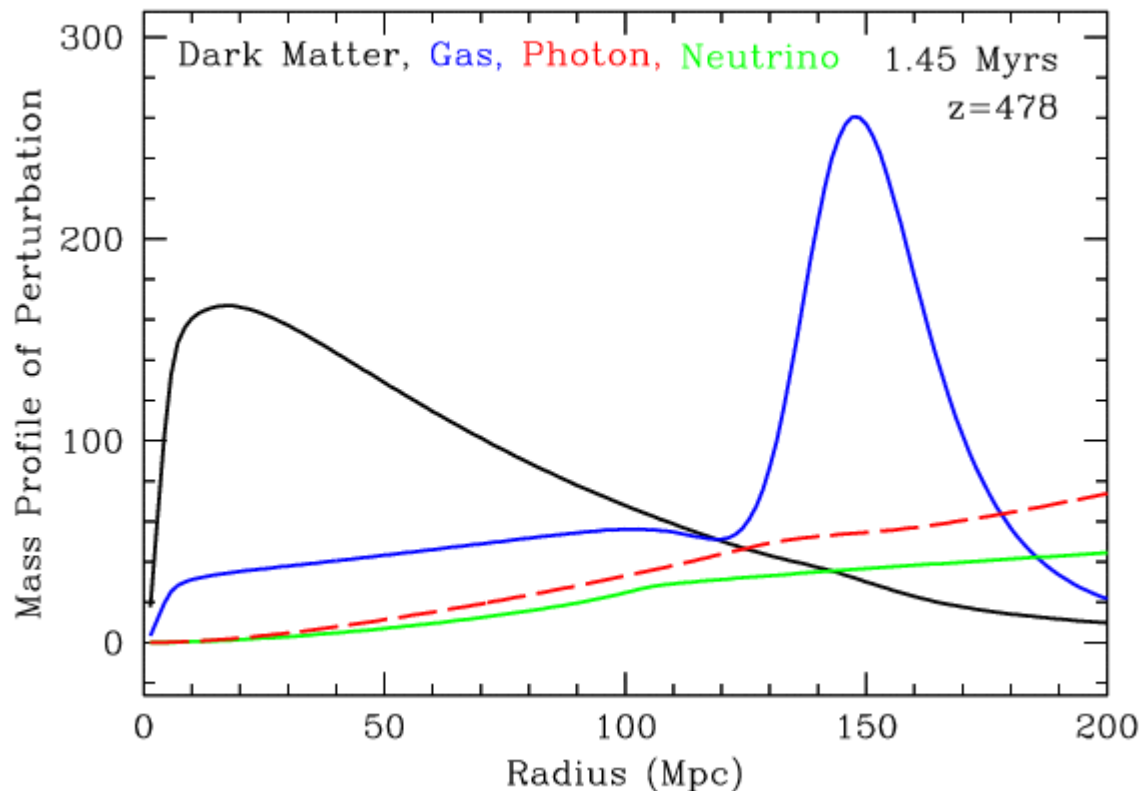


- ニュートリノはほとんど相互作用しないので、外側へ自由に広がる。

- **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

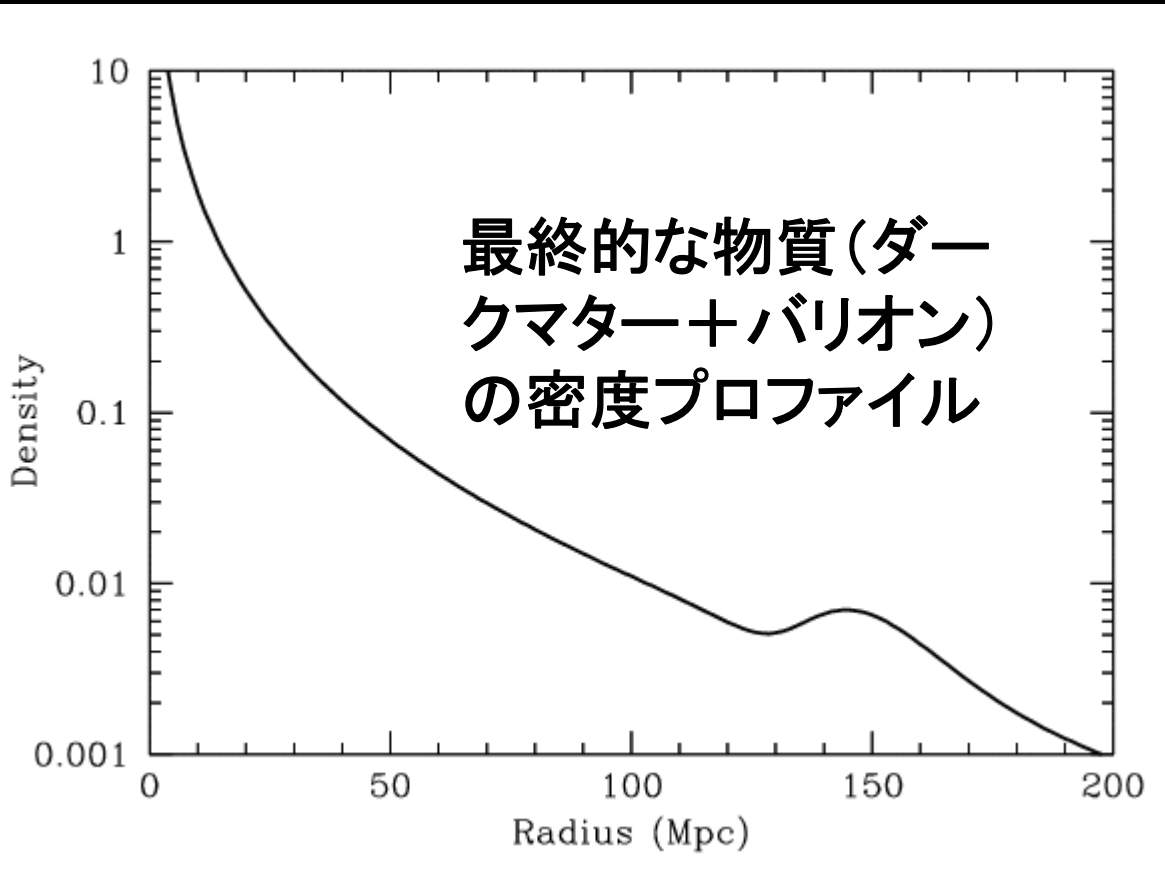
バリオン振動 (3)



■ 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。**

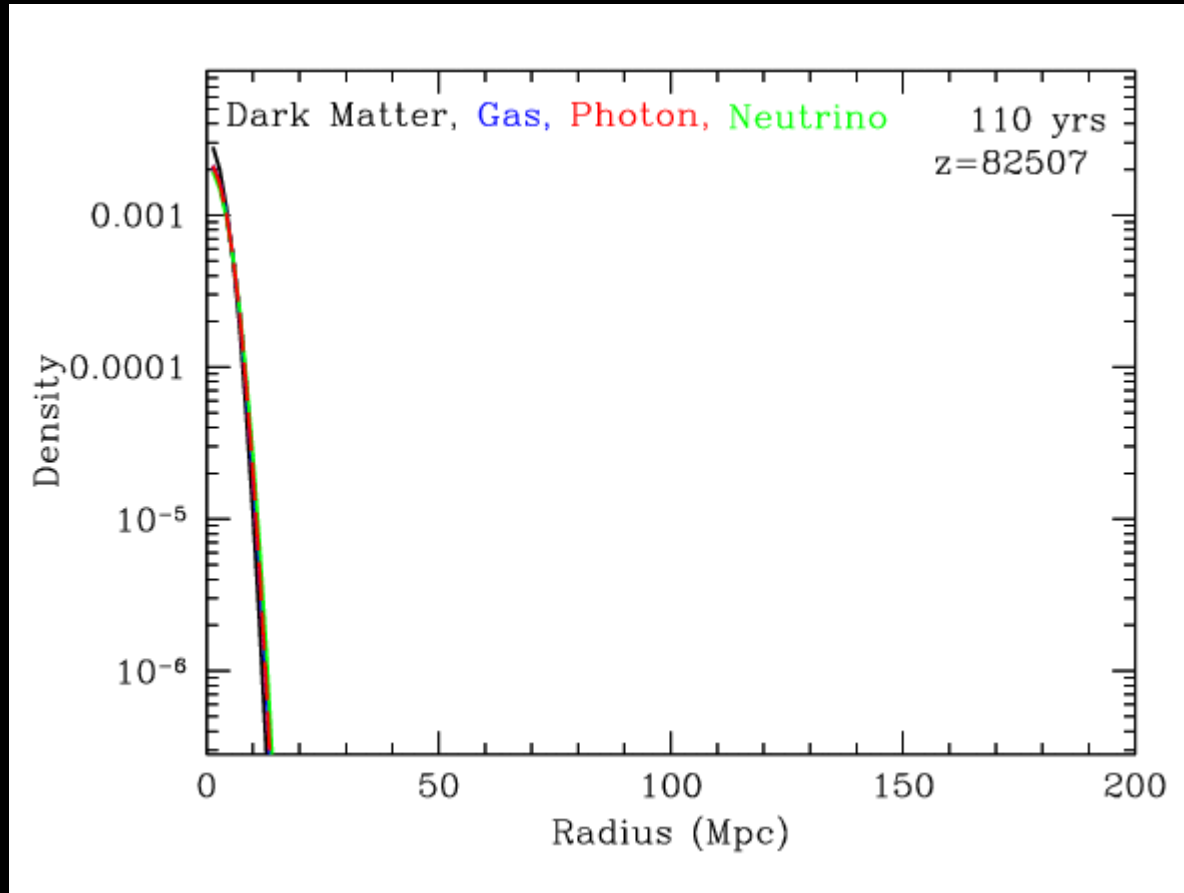
バリオン振動 (4)



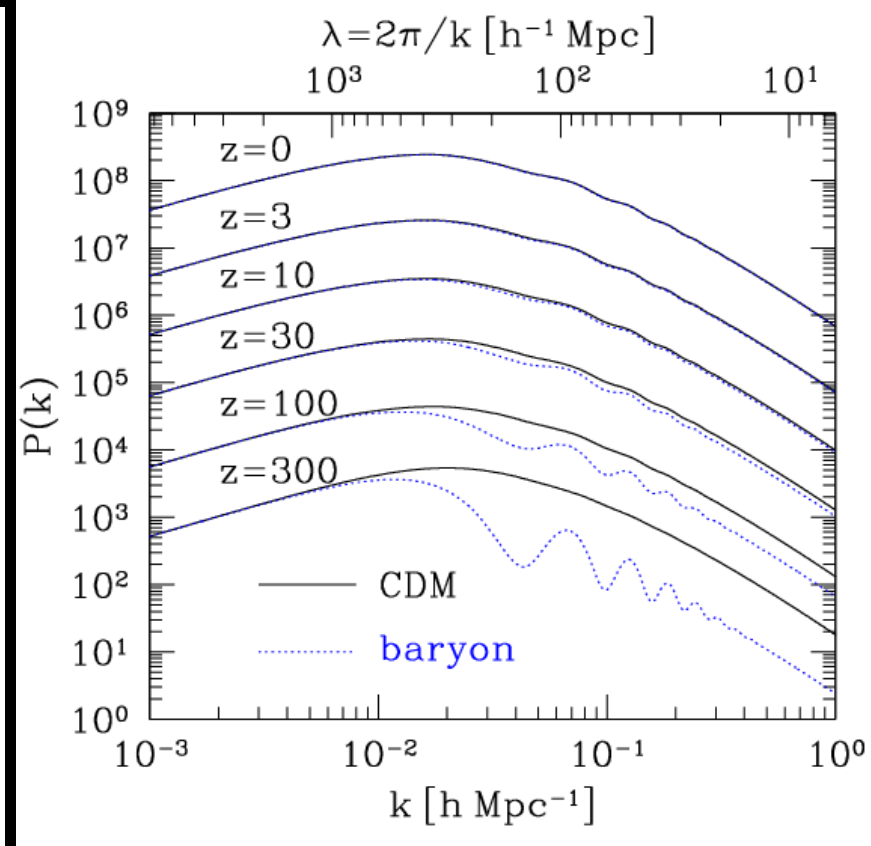
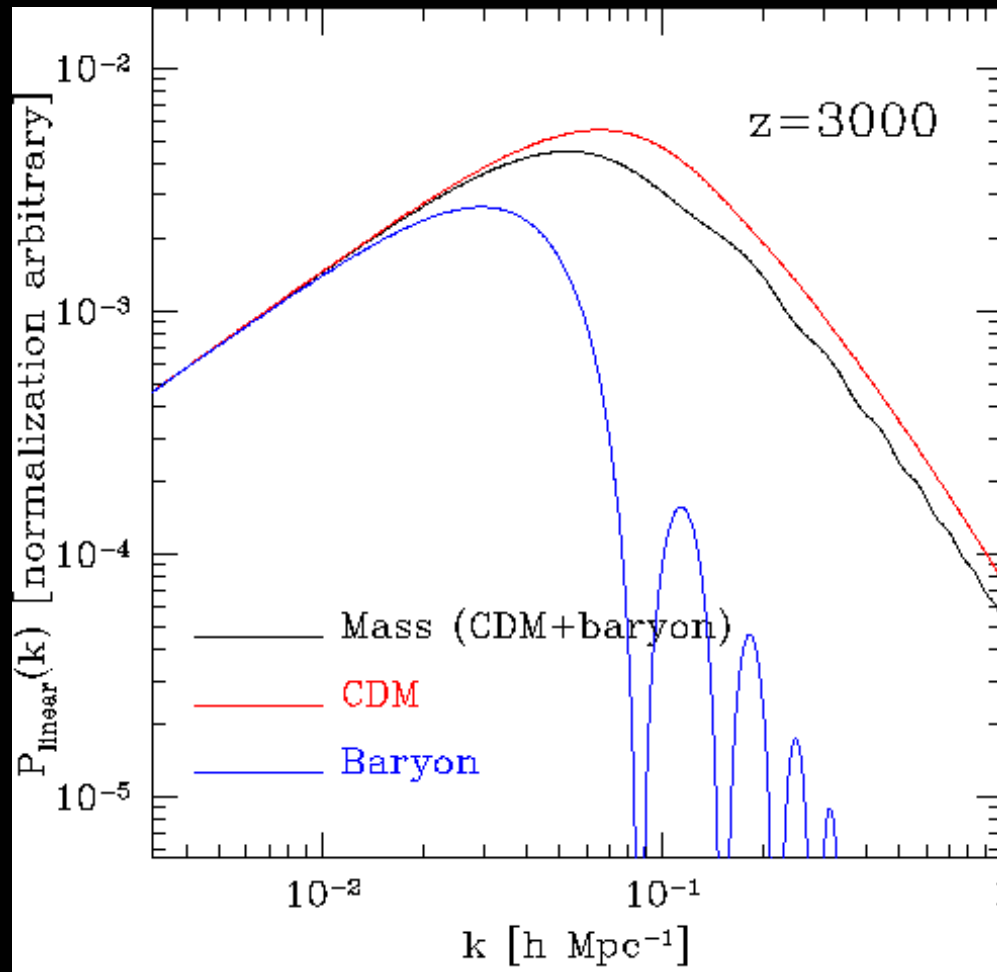
■ バリオンガスと光子の相互作用が切れると、バリオンはダークマターのつくる重力ポテンシャルに落ち込んで揺らぎが成長する。

■ **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。**

ピークのまわりの密度プロファイルの進化

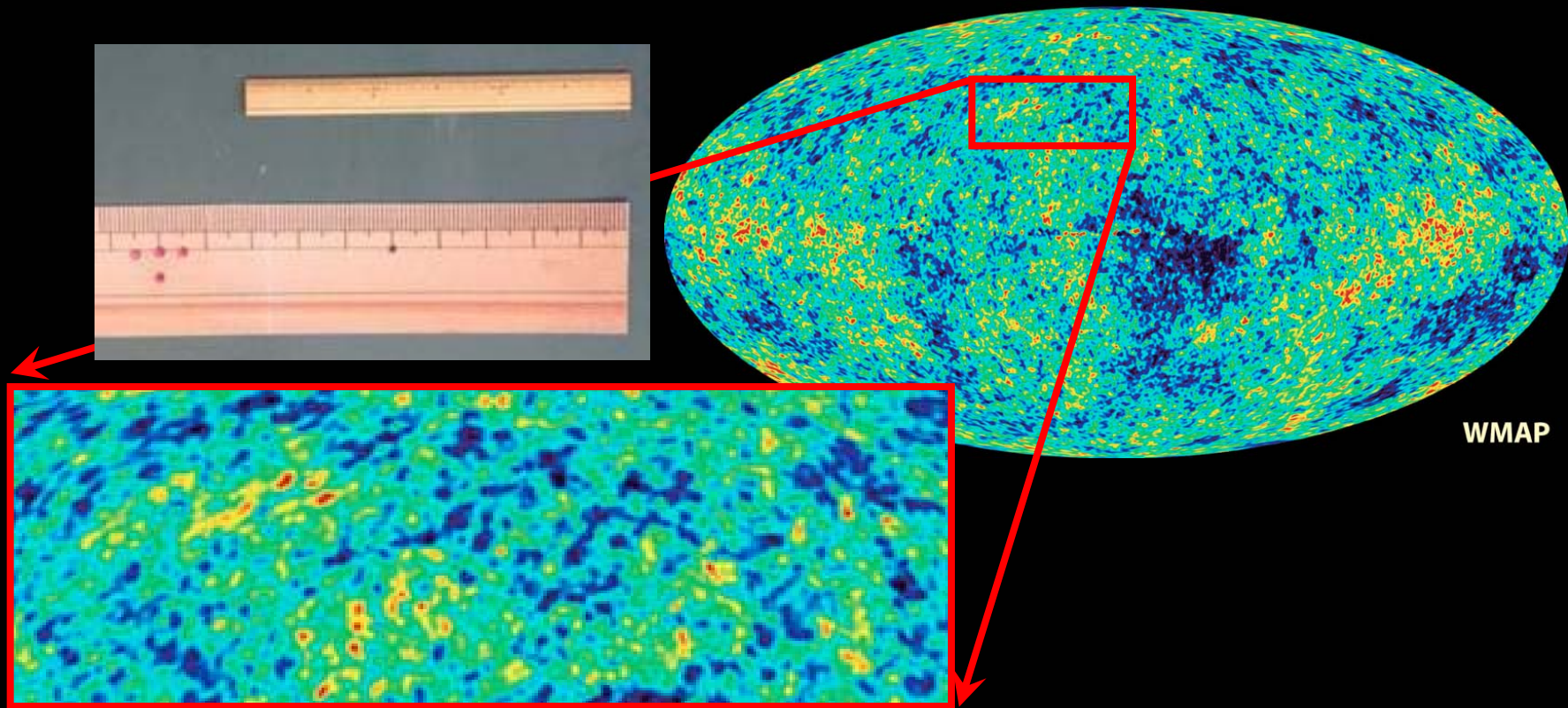


バリオン振動と3Dパワースペクトルの進化



**CMBFAST/CAMBによる
結果 (東大:樽家篤史、
西道啓博)**

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さしとして、宇宙の距離を決定

音速地平線長

- 時刻 t までに音波が到達できる共動距離

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

ここで

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

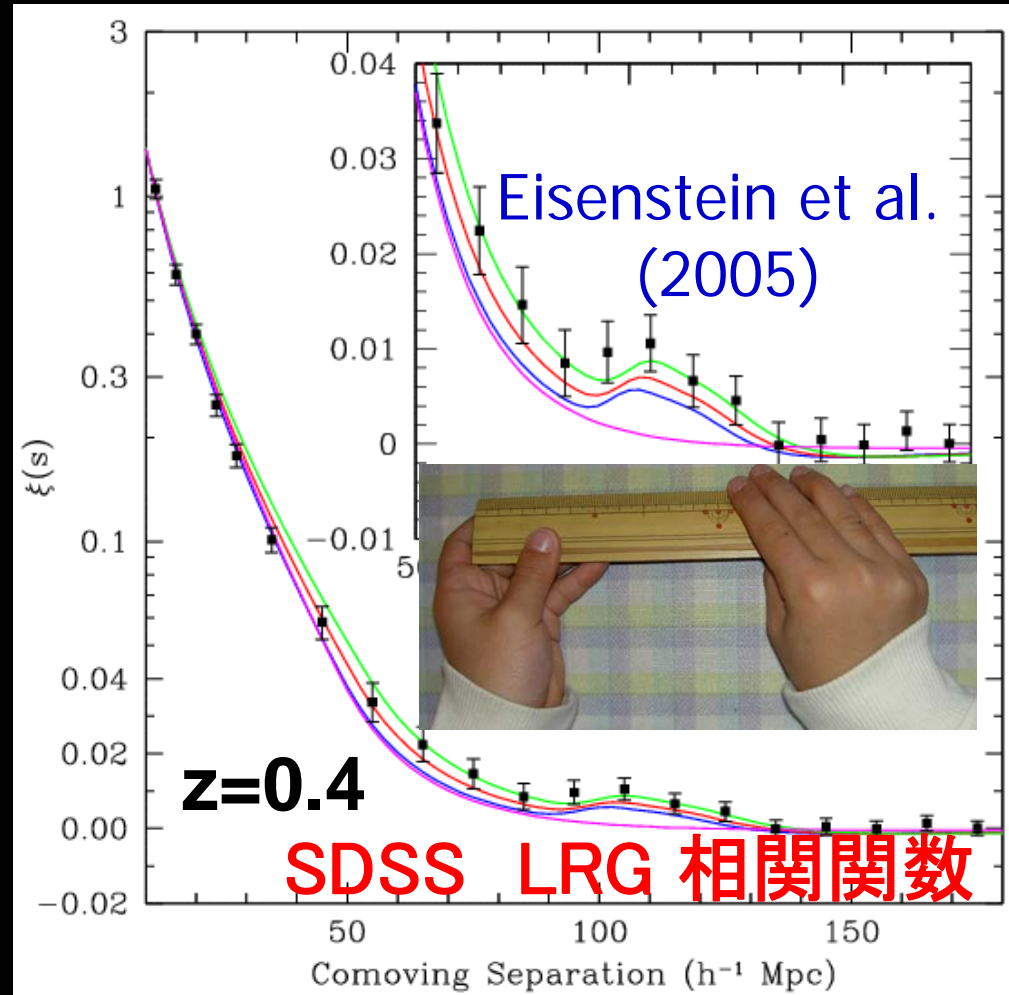
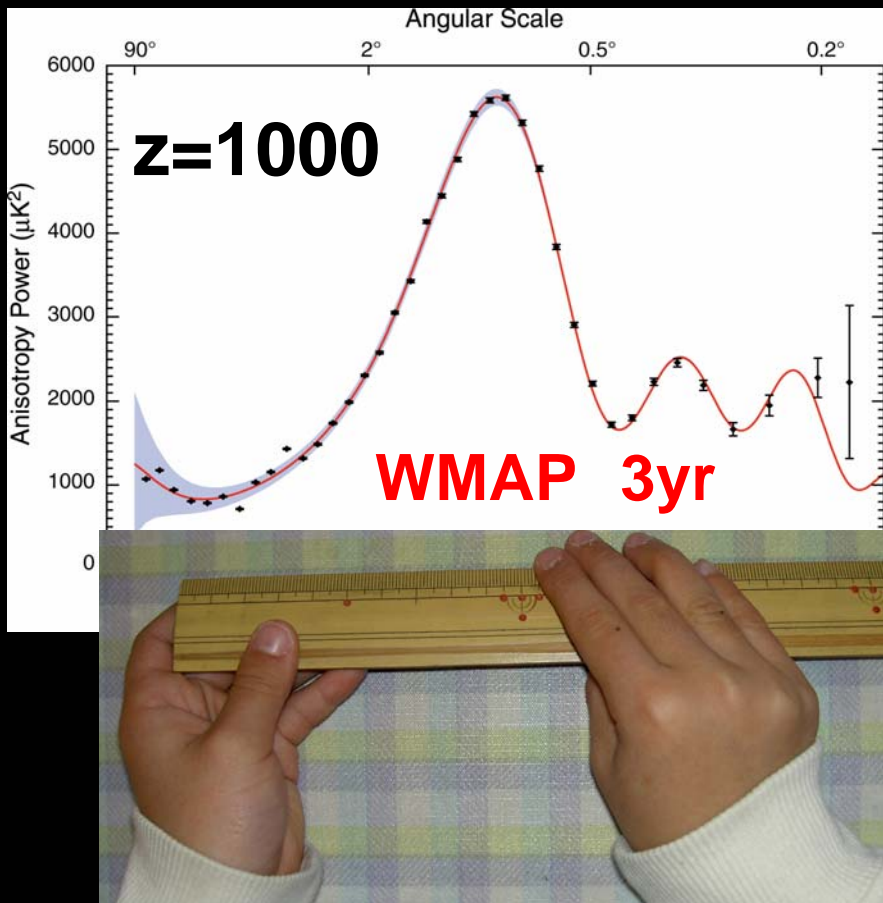
$$\frac{da}{dt} = \frac{H_0}{a} \sqrt{a\Omega_m + \Omega_{rad}}$$

- 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)

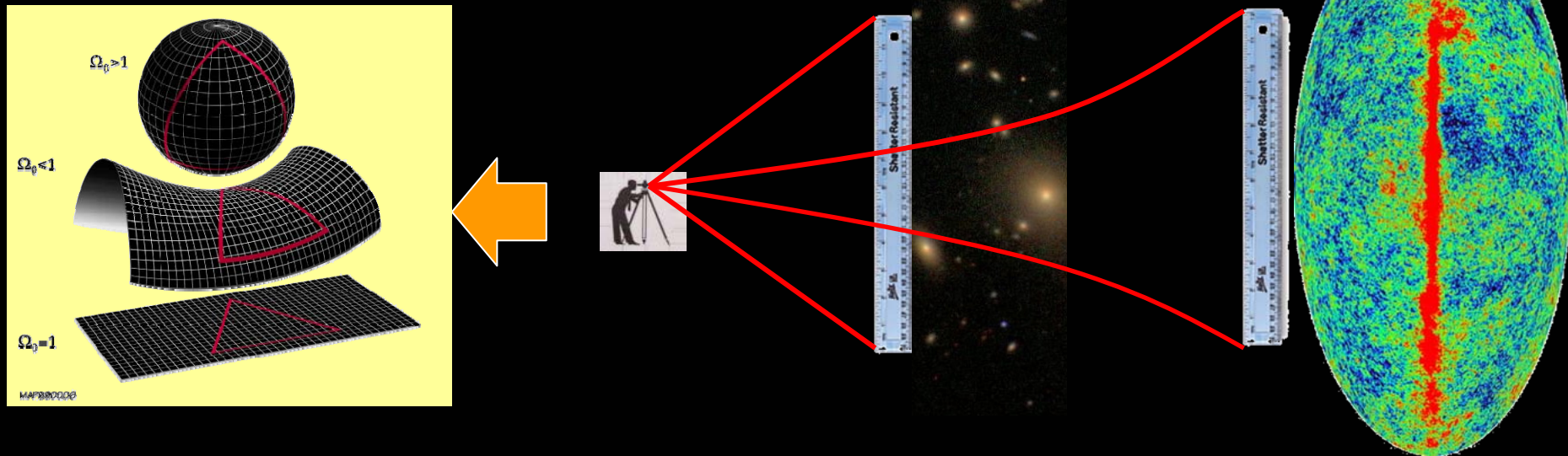


$$147(0.13/\Omega_m h^2)^{0.25} (0.024/\Omega_b h^2)^{0.08} \text{ Mpc}$$

標準ものさしとしてのBAO

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

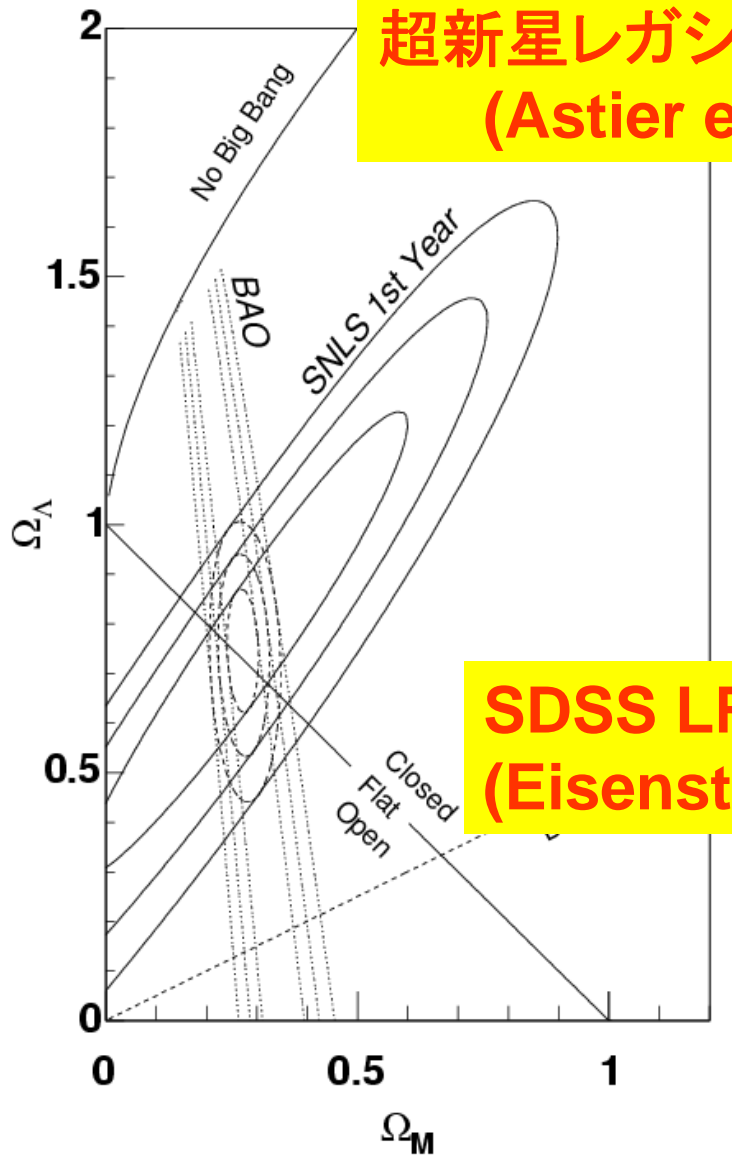
- 異なる時刻の宇宙までの距離を測定
- 観測的にダークエネルギーを制限する有力な方法



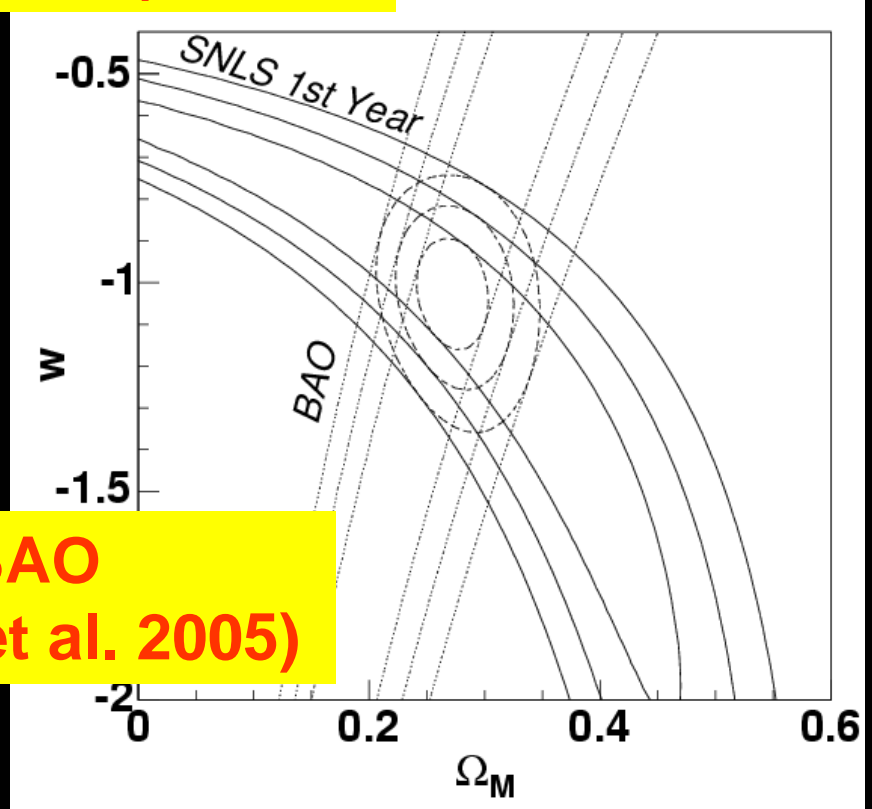
Picture credit: Bob Nichol

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)

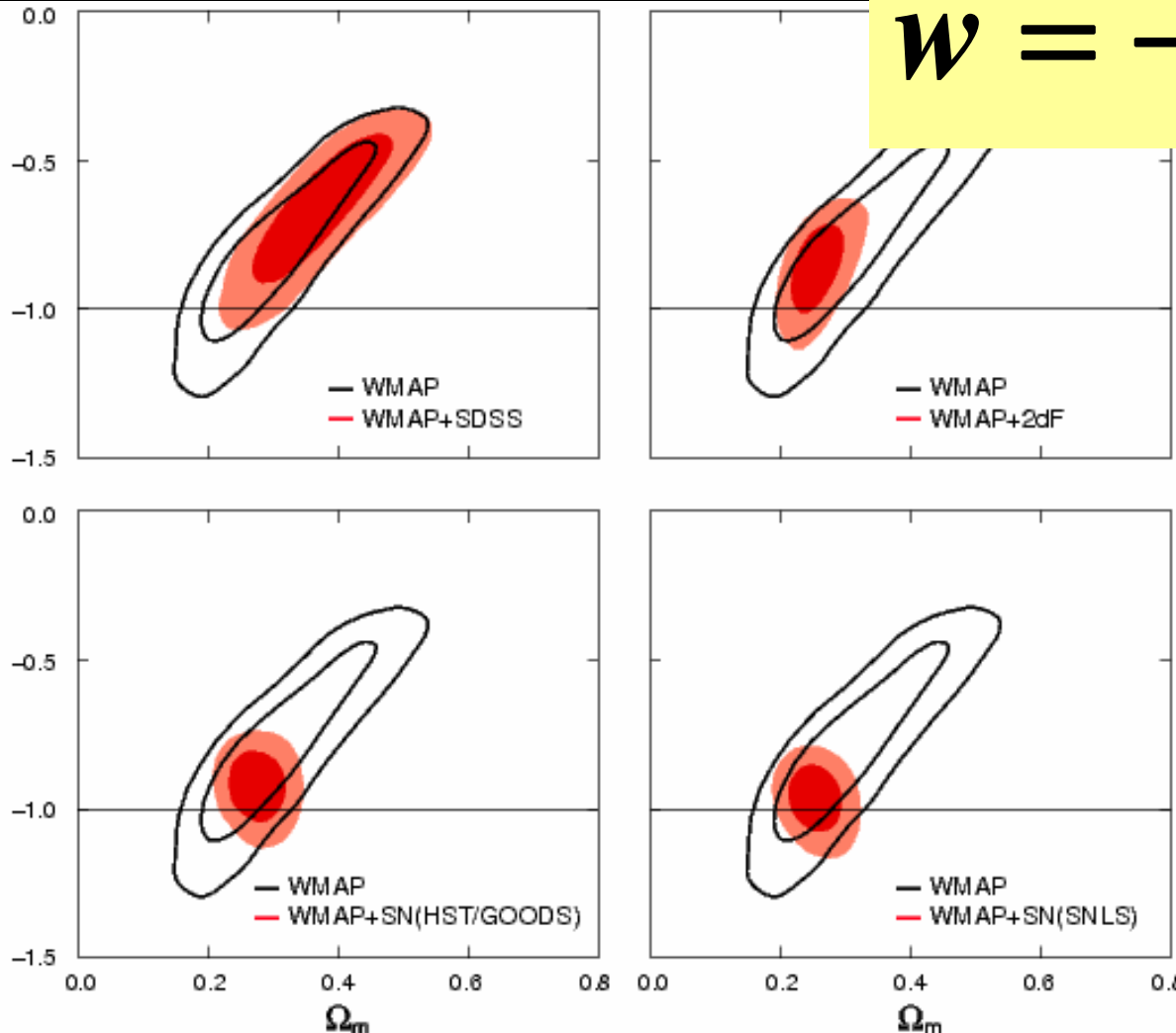


$w = -1.023 \pm 0.090$ (系統誤差)
 ± 0.054 (統計誤差)

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は将来計画の鍵



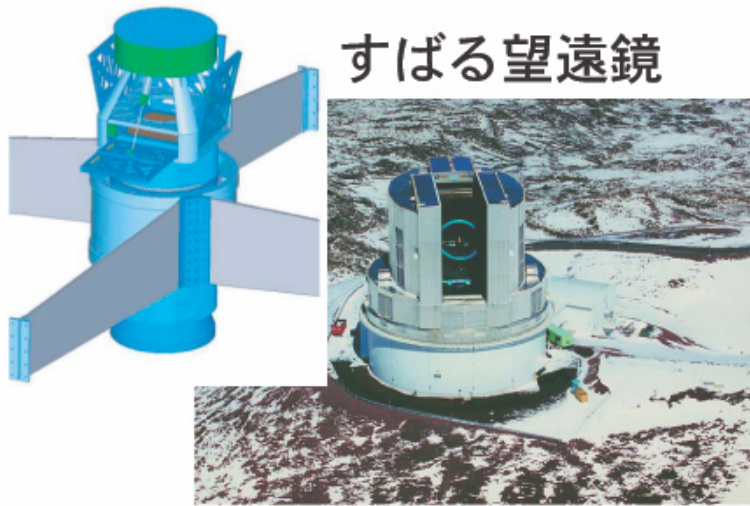
特定領域研究「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」

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
 - 宮崎聡：CCD
 - 相原博昭：DAQ
 - 理論家：

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

国立天文台

京都大学

広島大学

名古屋大学

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

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**

残された課題は山積み

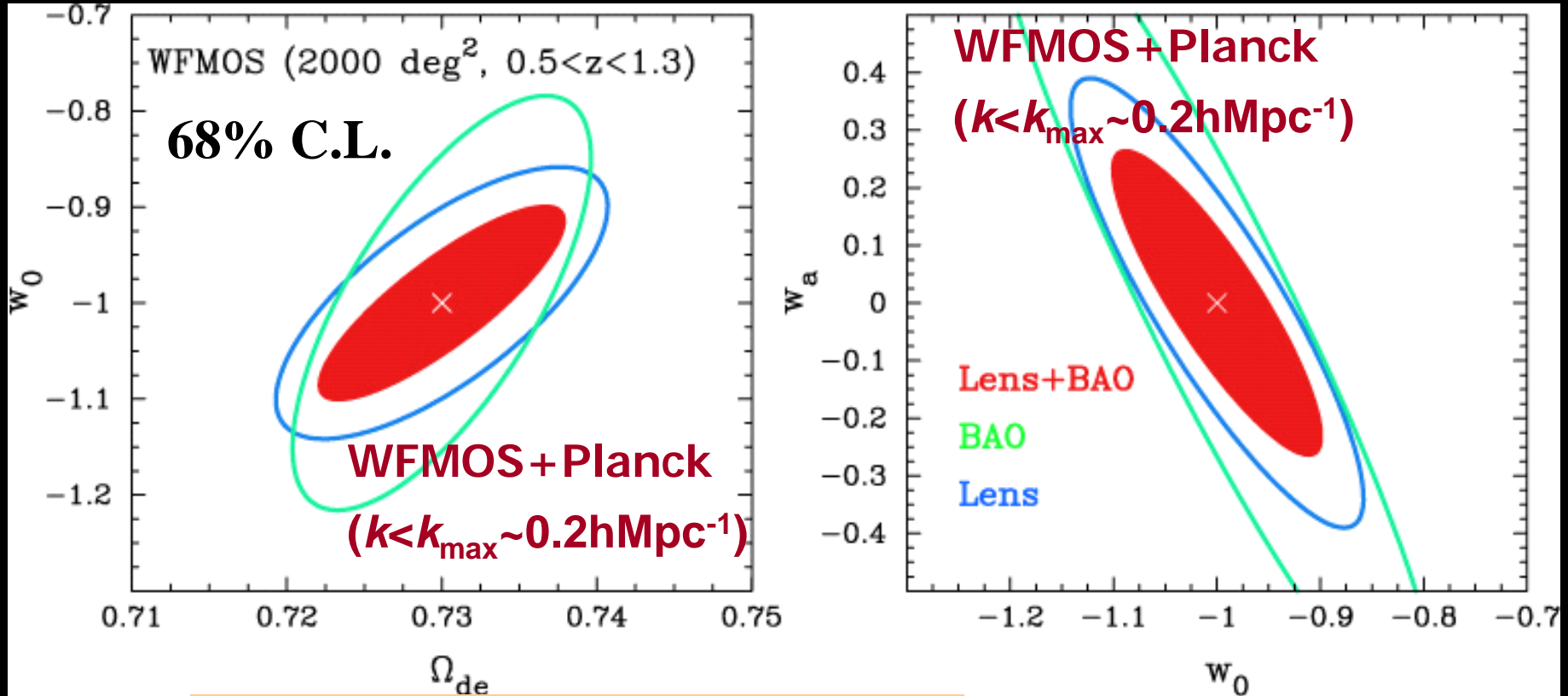
- **新しい検出器、観測装置の開発**
 - 自然科学においてはこれこそ本質
- **ダークエネルギーが宇宙論的観測量に与える効果の定量的評価** (広大山本グループの貢献が大)
 - バリオン音響振動パターンの非線形進化
 - 銀河がダークマター分布をどのように反映するか
 - 観測量からダークエネルギーの性質を抜き出す統計的手法の改良
 - 新しいダークエネルギー検出法の提案
 - 一般相対論の破れとダークエネルギーの存在とを区別する手法の開発

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
- $\Delta w < 0.03$, $\Delta(dw/da) < 0.3?$ の精度で決定
 - \Rightarrow ダークエネルギーを観測的に絞り込む

WFMOS $z=1$ 銀河データから予想される ダークエネルギーへの制限

- WFMOS サーベイ + プランク衛星データ + Hyper-Suprime weak lensing (WFMOSデータによる測光 z の較正後)



	BAO	WL	BAO+WL
$\sigma(w_0)$:	0.14	0.09	0.07
$\sigma(w_a)$:	0.49	0.26	0.18

(東大IPMU 高田昌広)

ダークエネルギー or 一般相対論の限界？

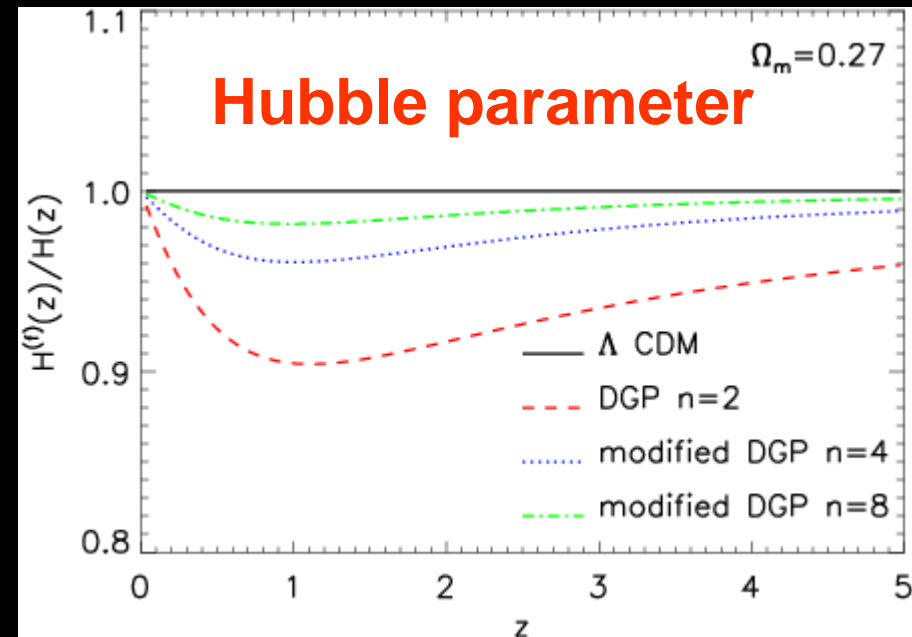
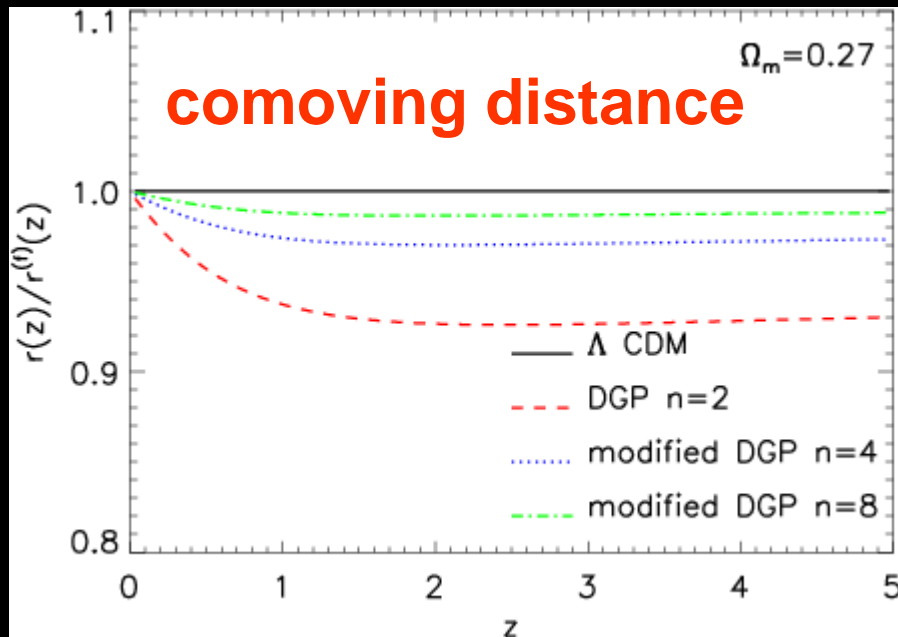
Yamamoto et al. PRD 74(2006)063525

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

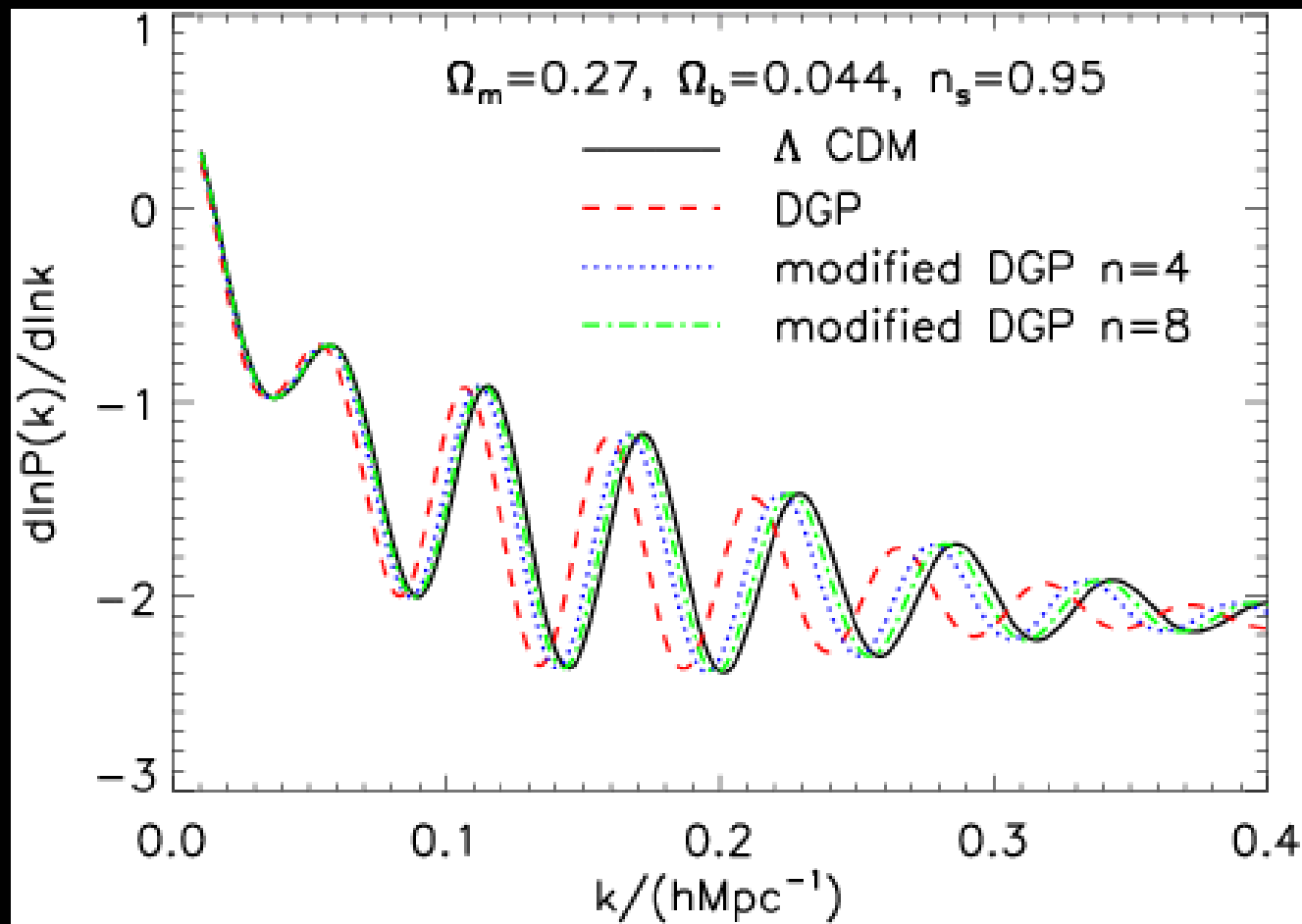
Λ モデル vs. modified DGP モデル



Modified DGP モデルと Λ モデルとの比
(平坦な宇宙の場合)

Yamamoto et al. PRD 74 (2006) 063525

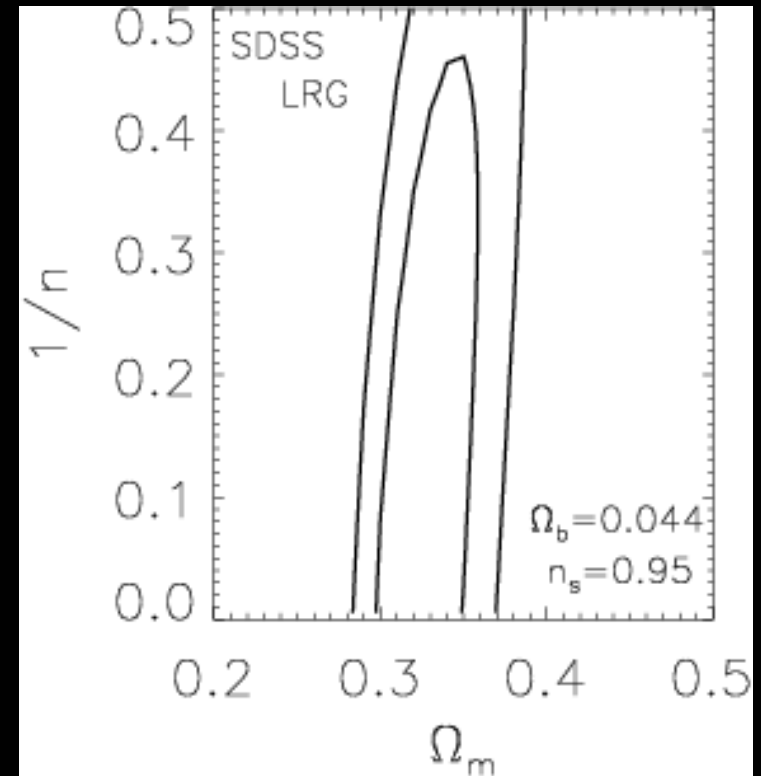
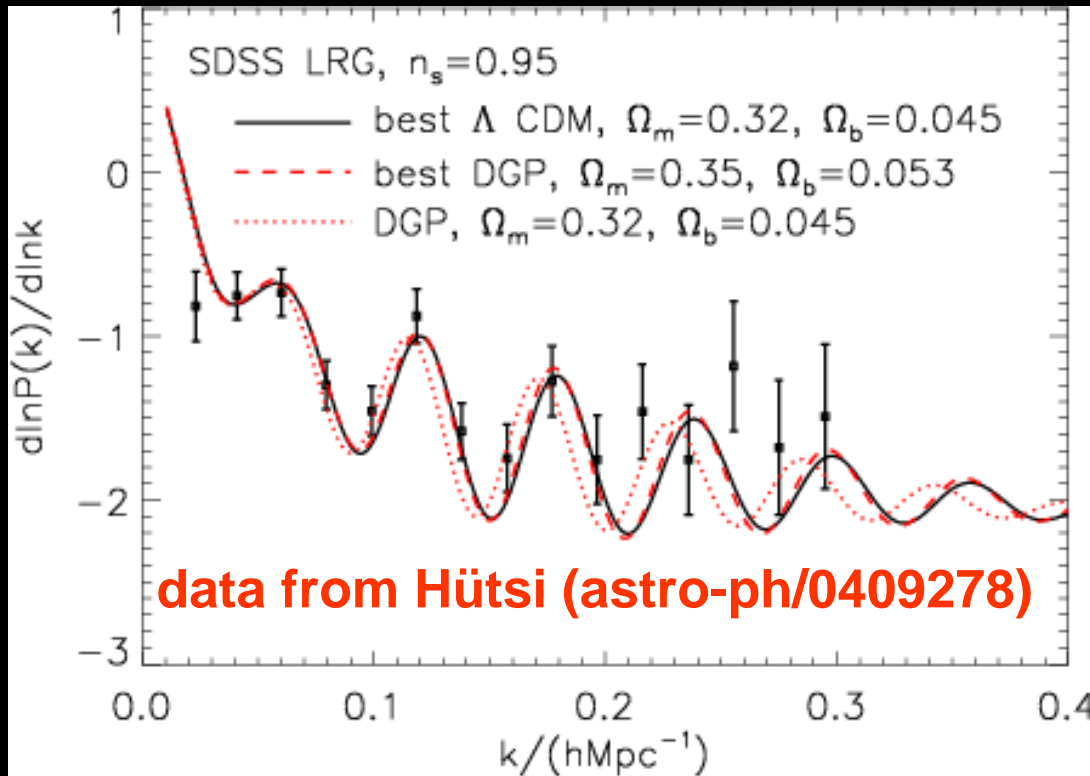
予言されるBAOの位相のずれ



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

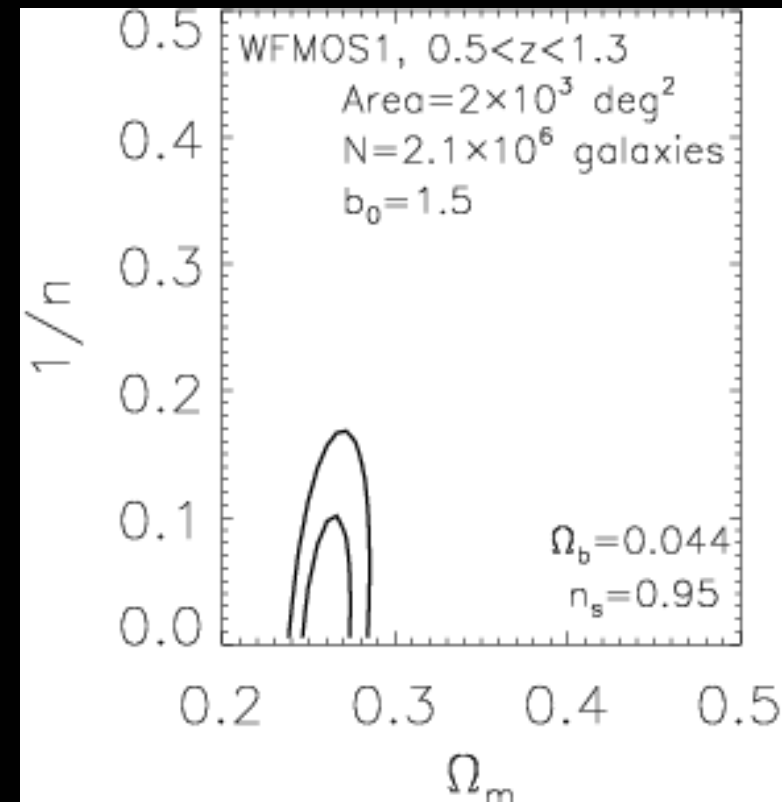
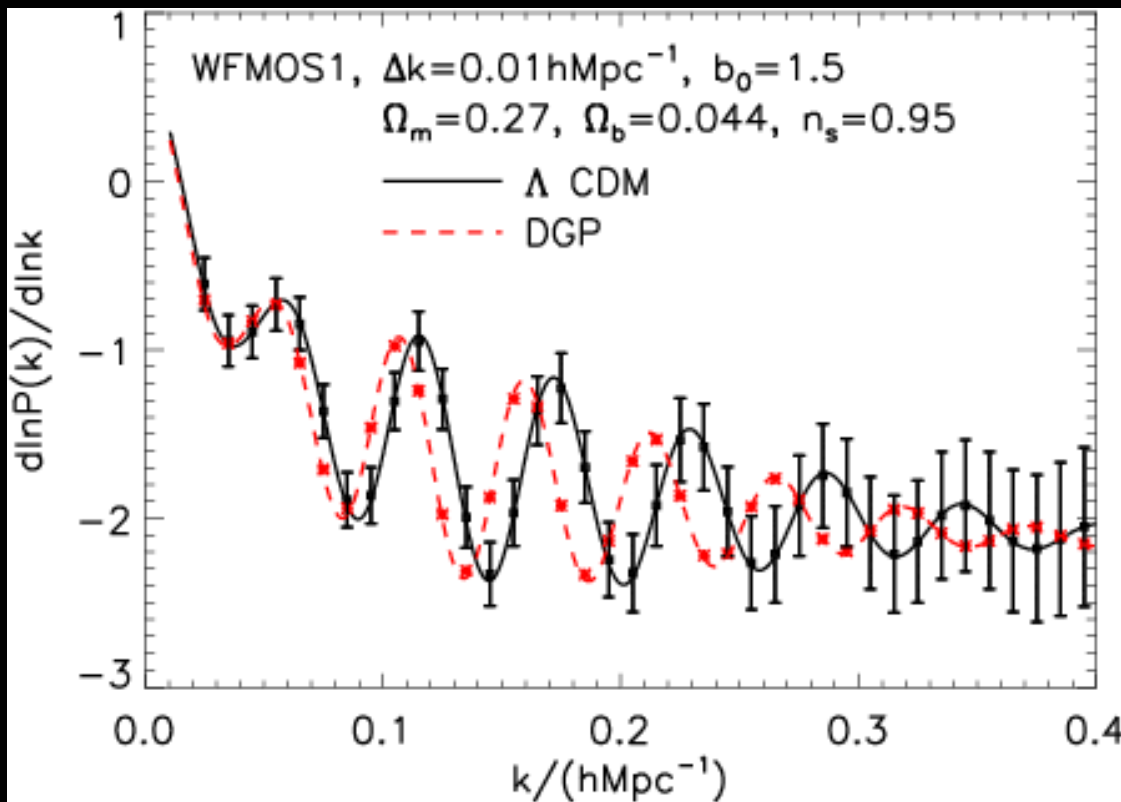
SDSS銀河データを用いた現時点での制限



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

Yamamoto et al. PRD 74 (2006) 063525

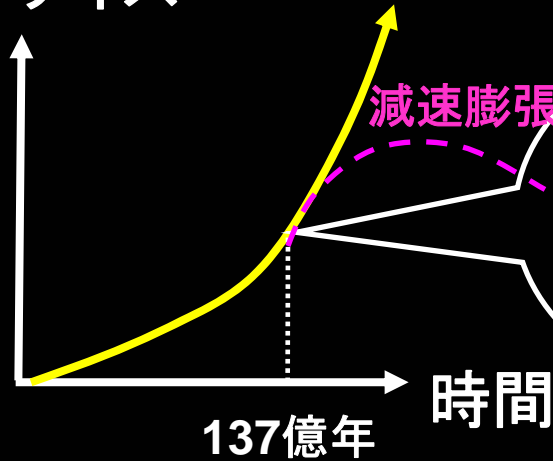
WF MOS $z=1$ 銀河データから予想される フリードマン方程式からのずれへの制限



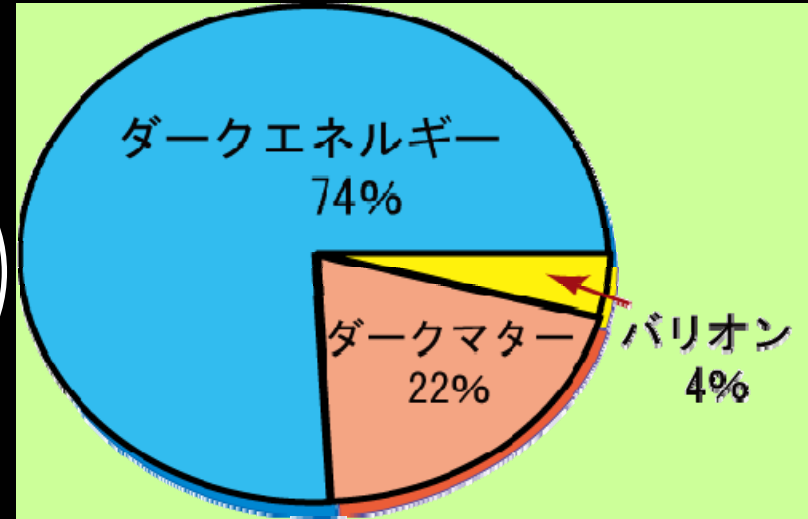
ダークエネルギーの未来は明るい！

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



万有斥力?
宇宙定数?
ダークエネルギー?
一般相対論の破綻?



■ 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

*L'essentiel est invisible
pour les yeux*

大切なものは目にはみえない



*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*