

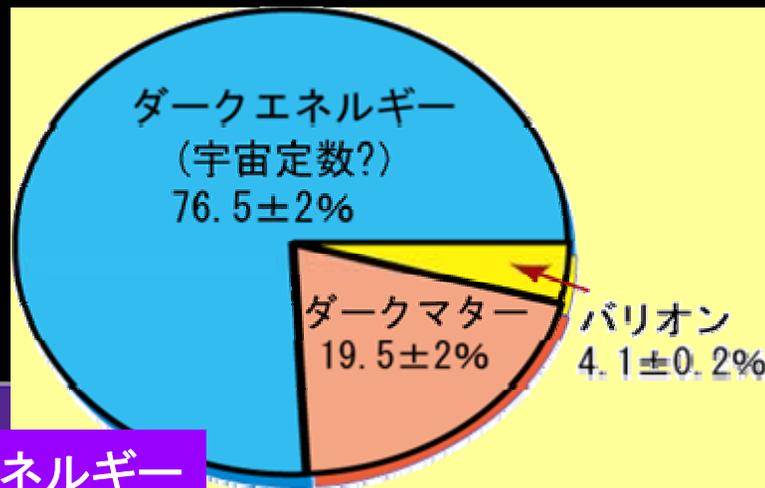
分光サーベイでダークエネルギーを探る意義

第2回 FMOS GTO WS

京大宇宙物理教室

2006年7月13日

2006年



1990年代

ダークエネルギー

1980年代

バリオン以外の
ダークマター

1970年代

光を出さない
バリオン

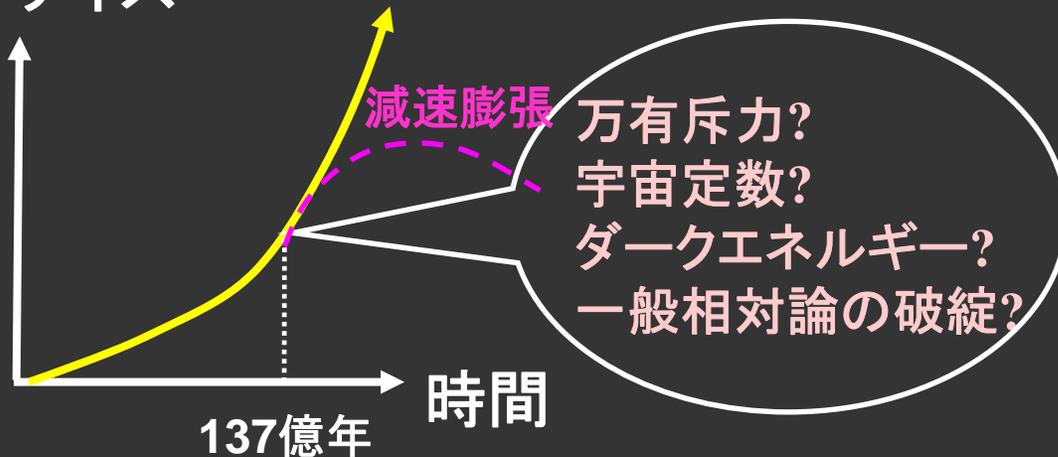
星・銀河(バリオン)

東京大学大学院
理学系研究科物理学専攻
須藤 靖

ダークエネルギーとは何か

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



Science誌が選んだ

breakthrough of the year

1998年 宇宙の加速膨張

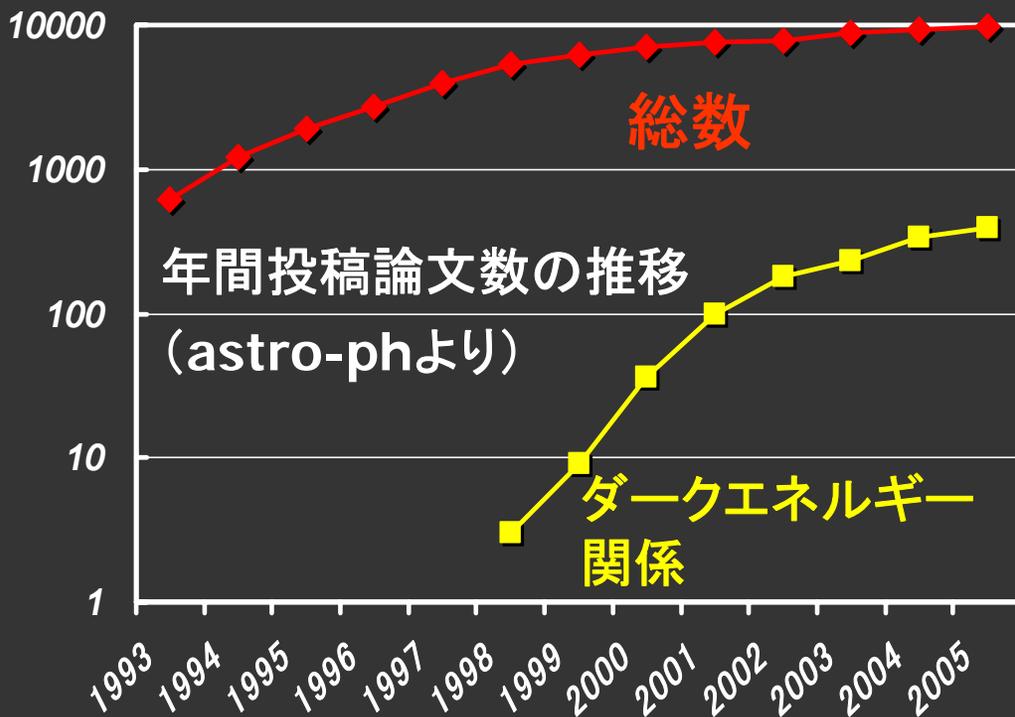
2003年 ダークエネルギー

- 宇宙の加速膨張の発見(1998年)
 - 重力は引力なので必ず減速膨張
 - 重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- 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?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- いずれも未知の物理学を切り拓く鍵



ダークエネルギー研究の意義

- 7割以上を占める宇宙の主要成分の解明
- 新たな物質階層か？一般相対論の限界か？
- 未知の物理学への道を拓く鍵
- 天文観測が唯一のアプローチ

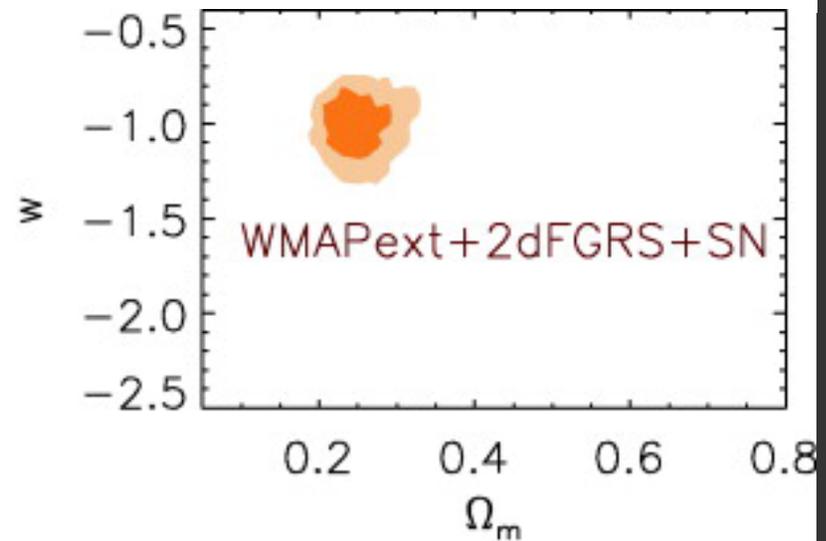
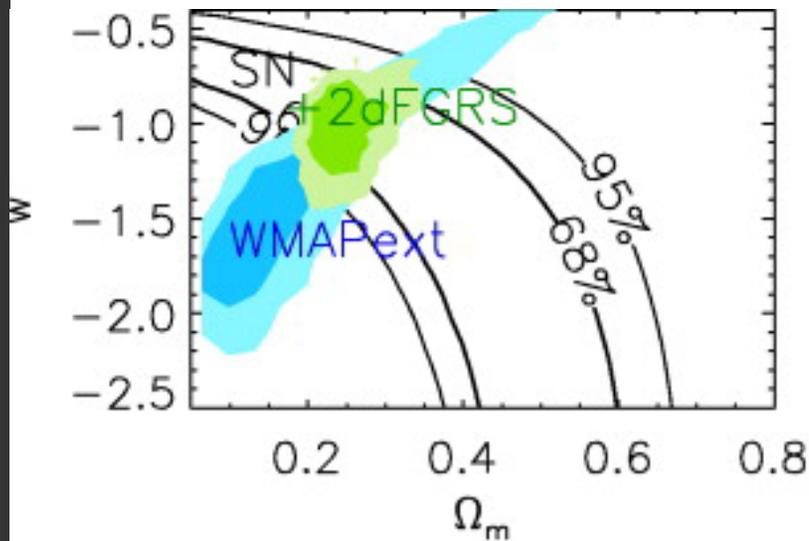


- “Right now, not only for cosmology but for elementary particle theory this is the bone in the throat”
 - Steven Weinberg (1979年度ノーベル物理学賞)
- “Would be number one on my list of things to figure out”
 - Edward Witten (1990年度フィールズ賞)
- “Maybe the most fundamentally mysterious thing in basic science”
 - Frank Wilczek (2004年度ノーベル物理学賞)
- “My only achievement in FMOS dark energy project is to give it a name”
 - Tomonori Totani (2000年度井上奨励賞)

現状のまとめ：ダークエネルギーは宇宙定数か？

- **ダークエネルギーの状態方程式**（現時点では物理ではない、単なるパラメトリゼーション）
 - $p=w\rho \Rightarrow \rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
 - $w=-1$: 宇宙定数
 - $-1 < w < -1/3$: (一般の)ダークエネルギー
- **WMAP+others $\Rightarrow w = -0.98 \pm 0.12$**

Spergel et al. ApJS 148(2003)175

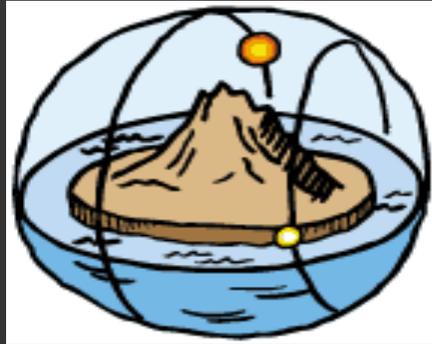


宇宙観は本当に進化したか？

古代エジプト



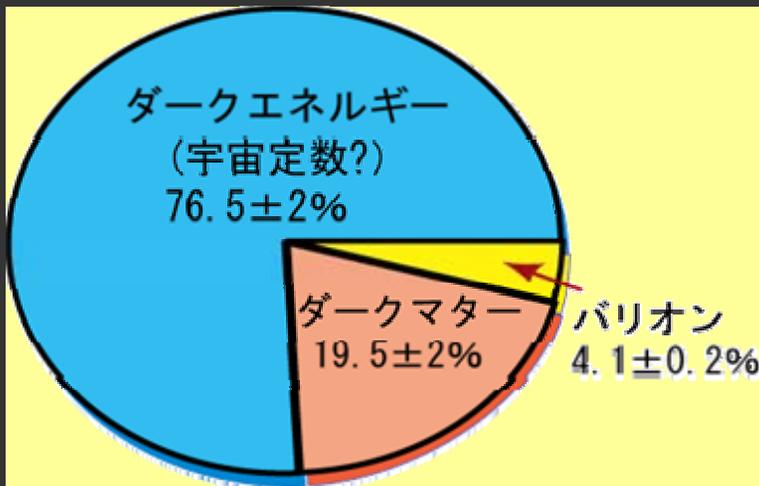
古代中国



古代インド



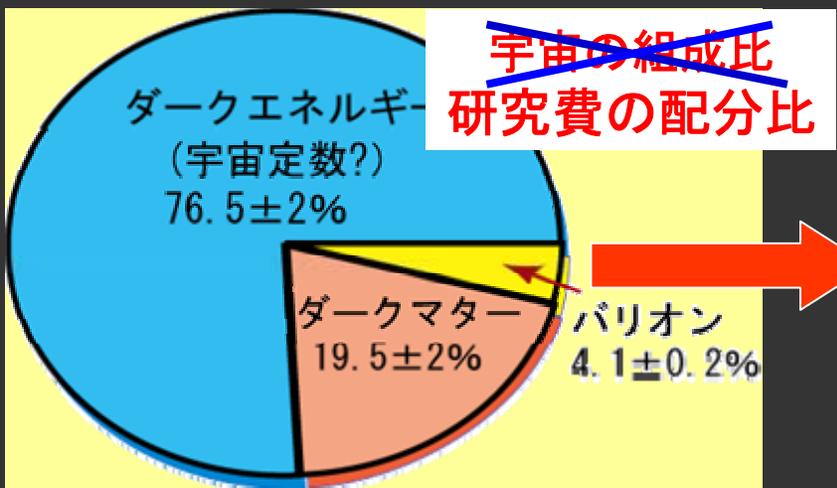
2006年



進歩？



「ダーク」という形容詞がなくなるまでやる： ダークマターとダークエネルギーを 標準モデルに組み込む



「20XX年の教養課程物理の教科書」

第3章 物質の微視的世界と素粒子の分類

(20世紀にすでに確立していた階層)

クォーク、レプトン、ゲージ粒子

(2010年代にダークセクターと呼ばれていた階層)

黒い相互作用をする素粒子群

第一世代 トタニン、トモニーノ

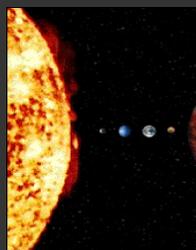
第二世代 トタニン、トモニーノ

第三世代 トタニン、トモニーノ

第四世代 トタニン、(左巻き)トモニーノ

第五世代 トタニン、(右巻き)トモニーノ

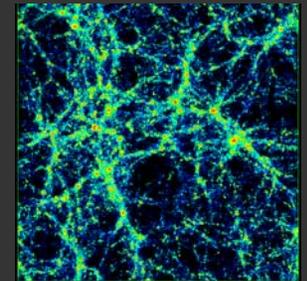
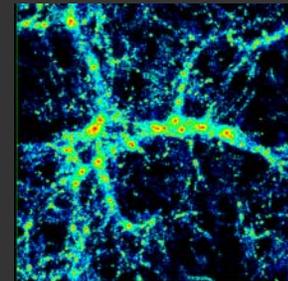
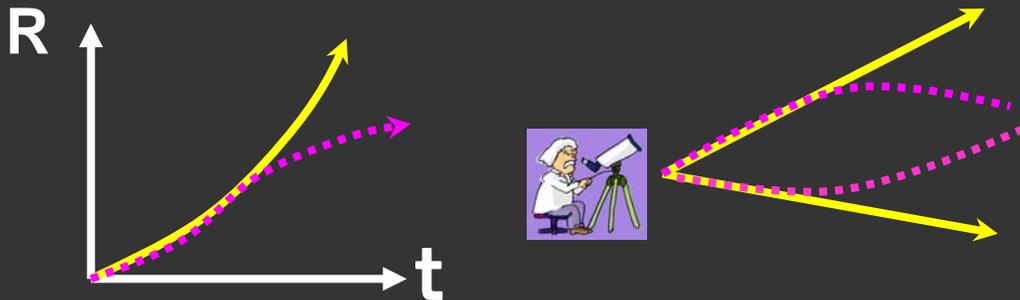
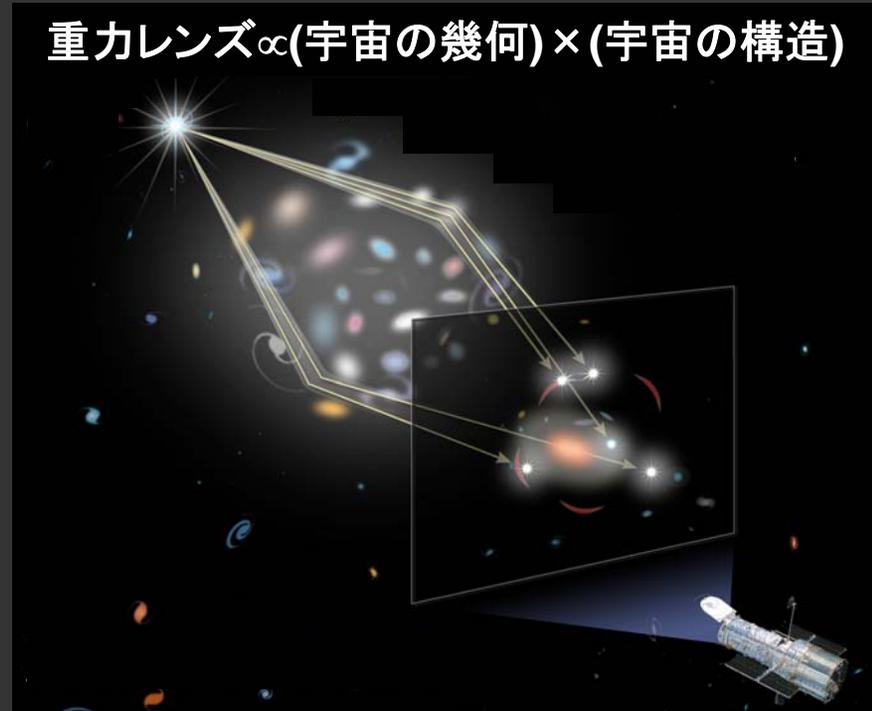
これらは、ストレンジネス、ノイジネス、アルコールネスという猟奇数をもっていることが確立しているが実はその存在は以前から現象論的に予言されていた (Suto 2006)



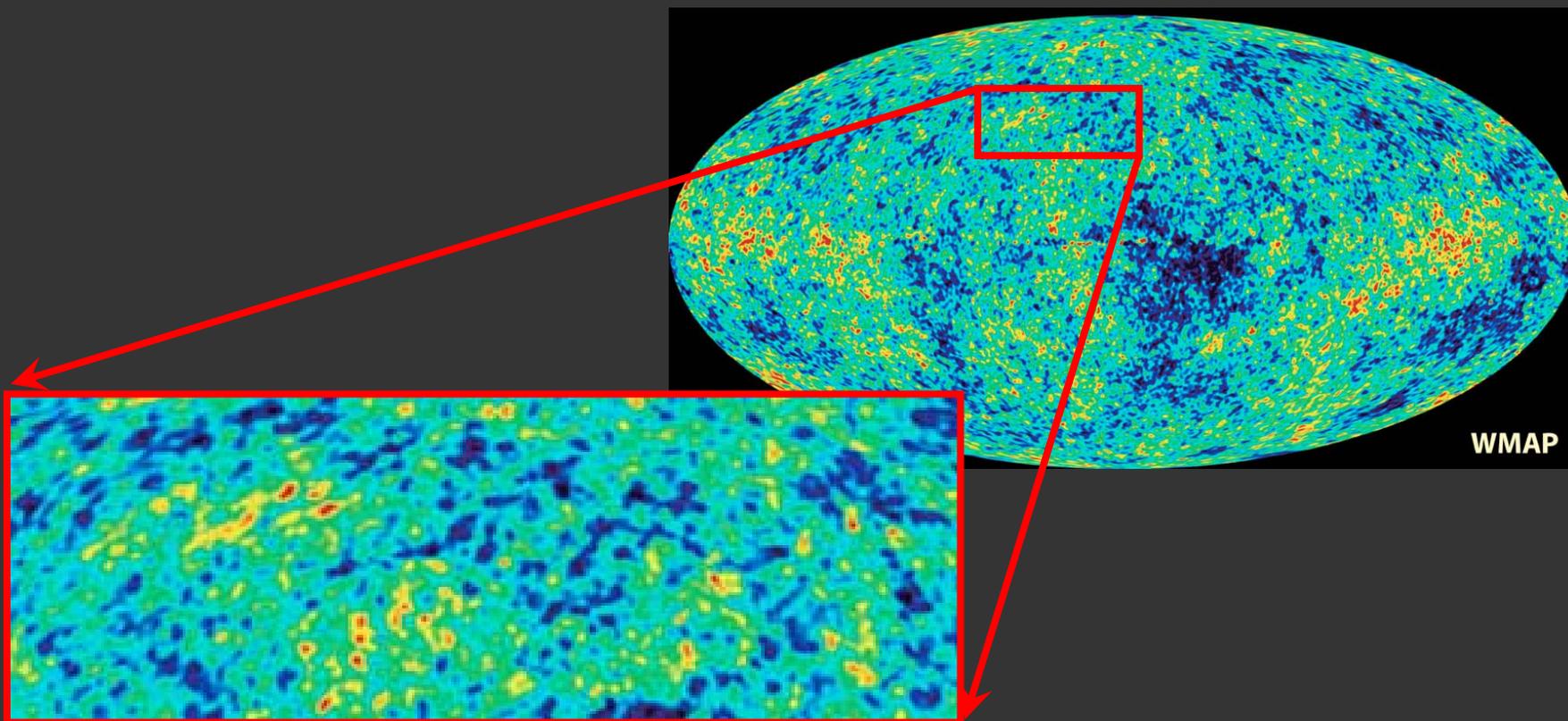
ダークエネルギーの “見え方”

- 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
 - 重力レンズの強度の時間変化
 - 宇宙大構造の特徴的スケールの時間変化

重力レンズ \propto (宇宙の幾何) \times (宇宙の構造)

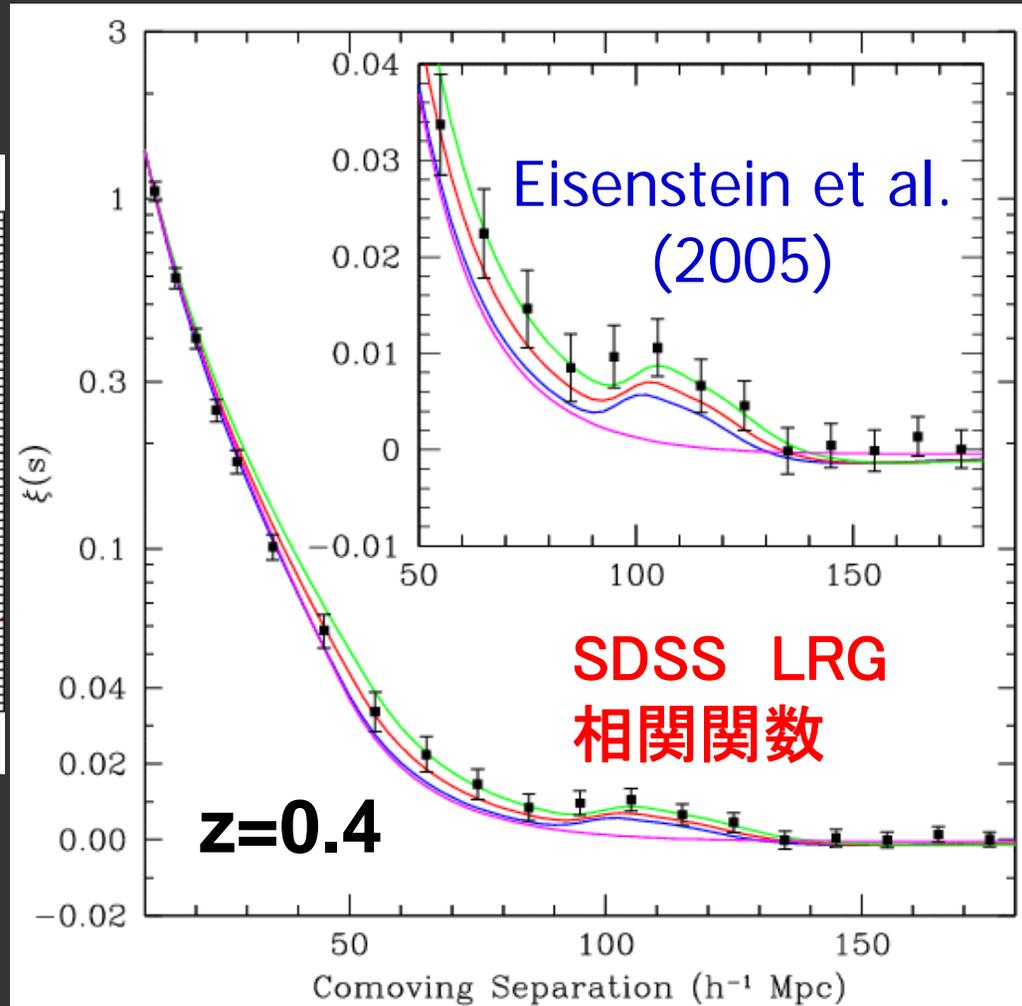
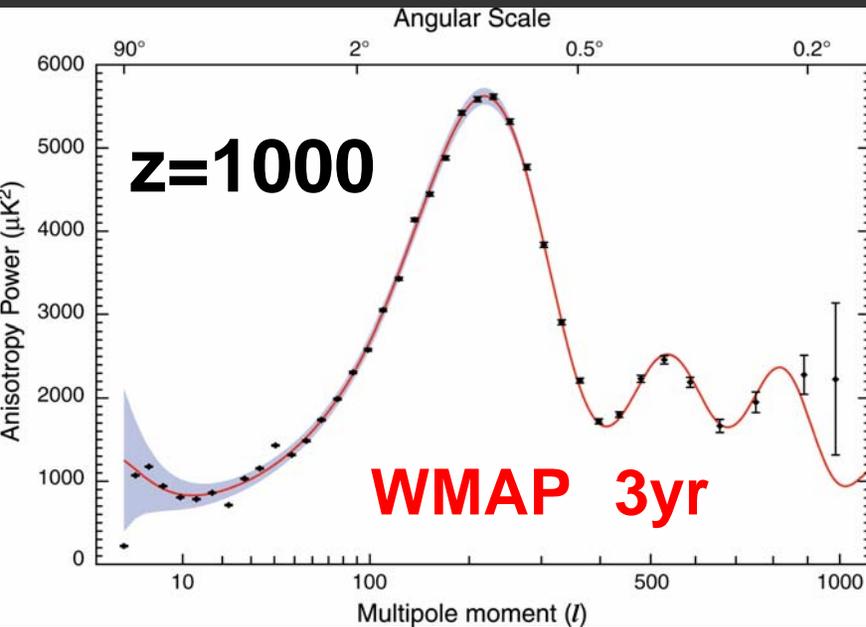


CMB中のバリオン・光子弾性振動の痕跡

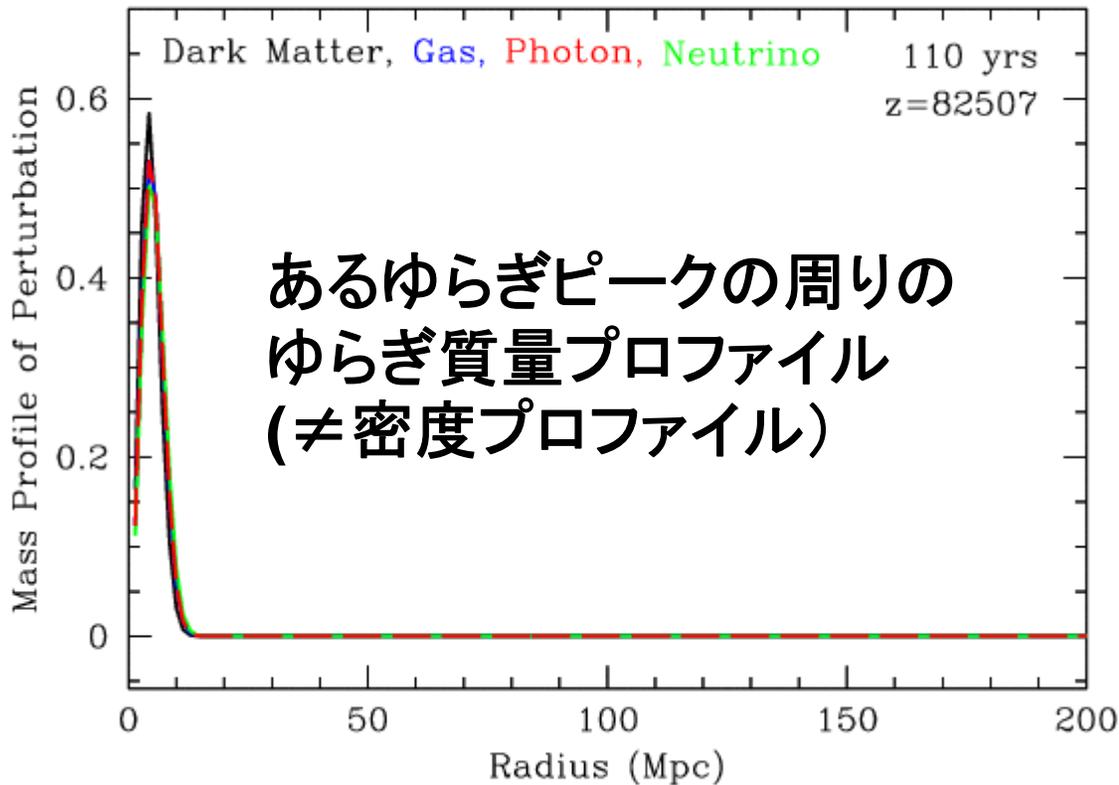


- 再結合時刻の音波の地平線の長さ(=音速 × 宇宙時刻)が特徴的なスケール
- これを幾何学的な標準ものさしとして、宇宙の距離スケールを決定する

CMBの弾性ピークの銀河分布版： バリオン弾性振動(BAO)

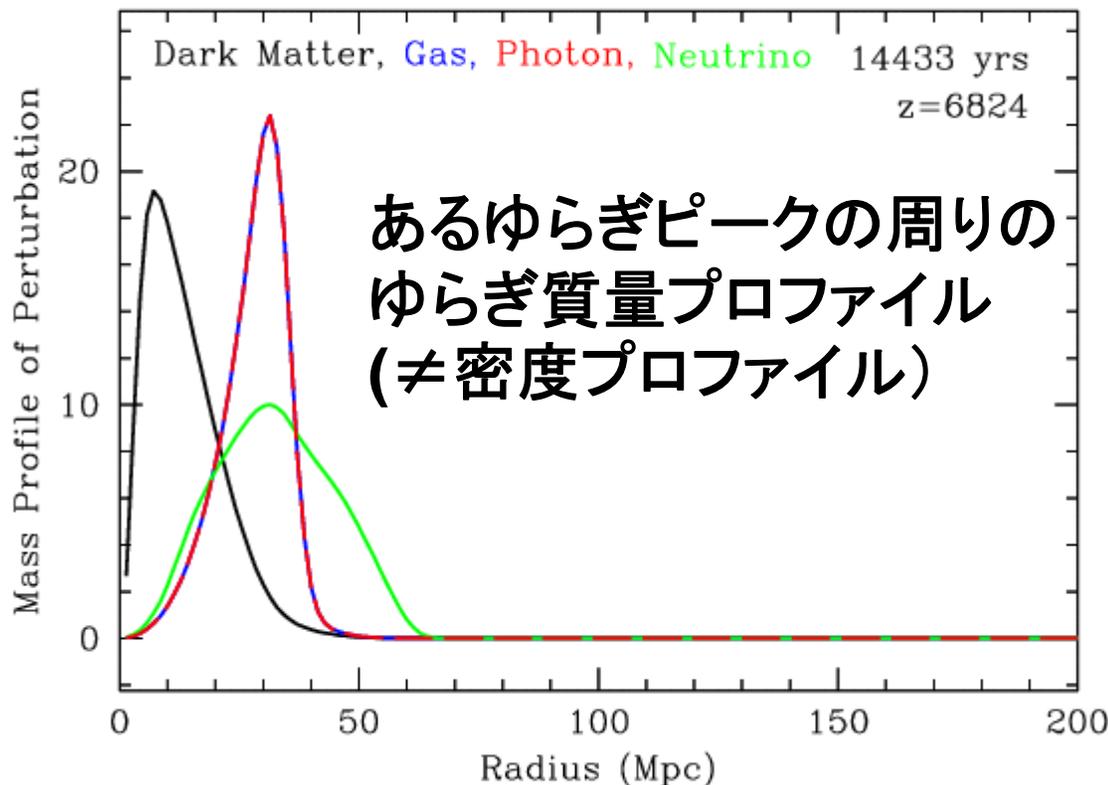


バリオン振動 (1)



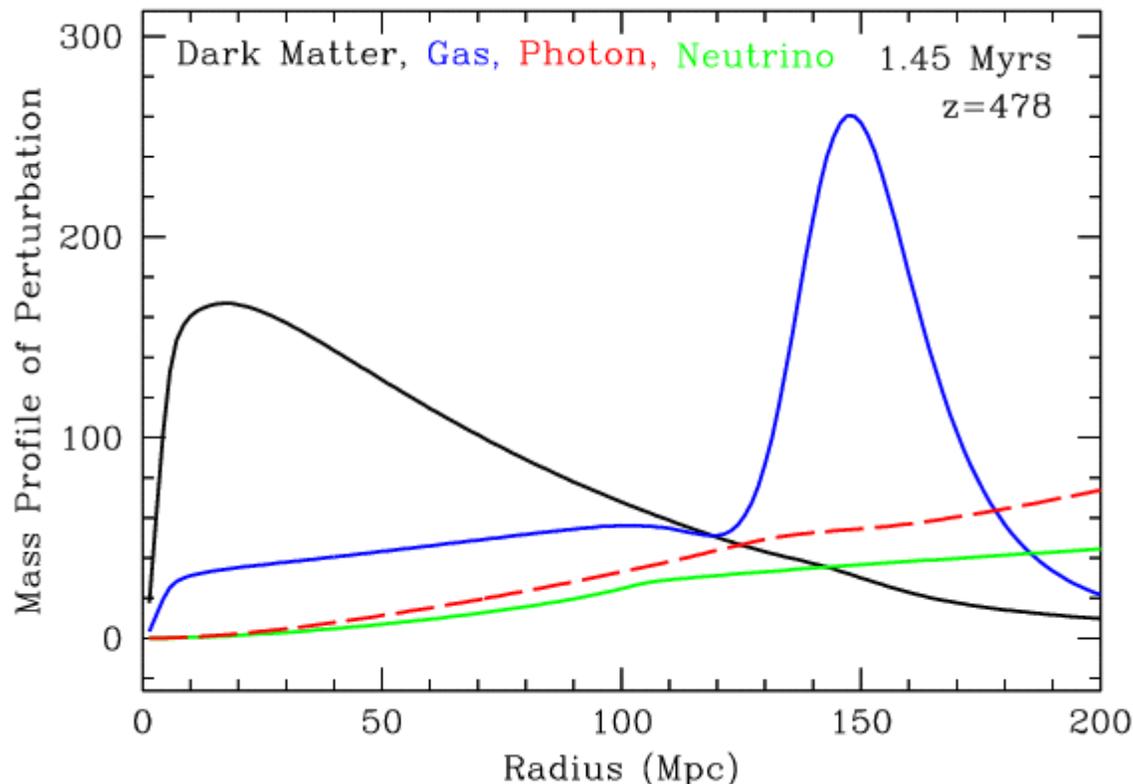
- 宇宙初期では、
ダークマター、バリ
オンガス、光子、
ニュートリノの4成
分すべてが一流体
として振舞う

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

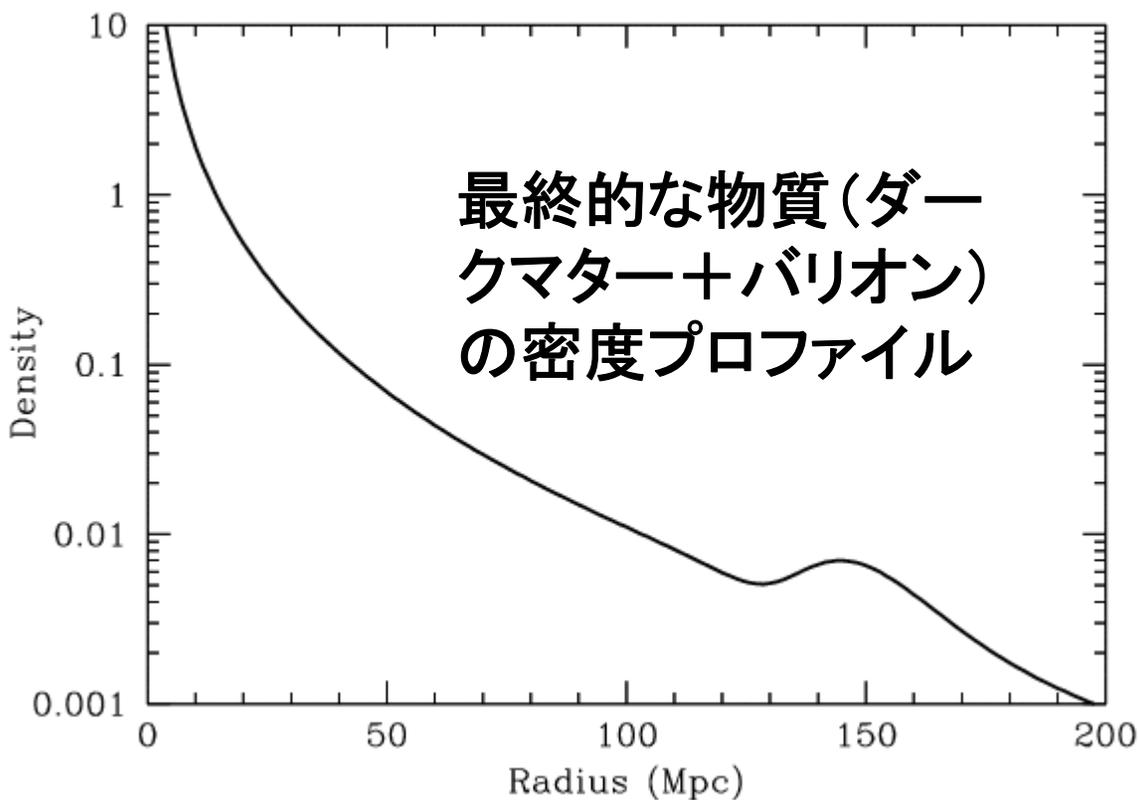
バリオン振動 (3)



■ 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。**

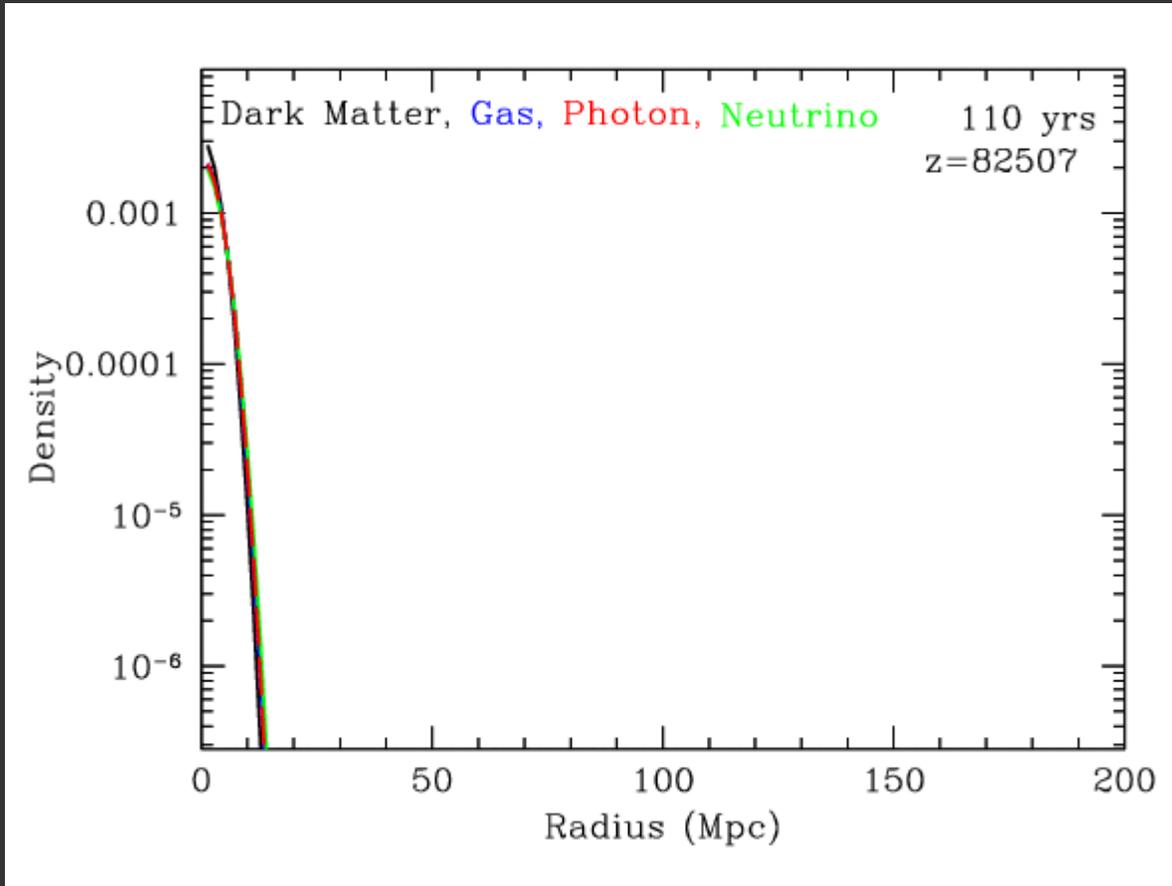
バリオン振動 (4)



■ 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。**

ピークのまわりの密度プロファイルの進化



測光サーベイによるダークエネルギー探査

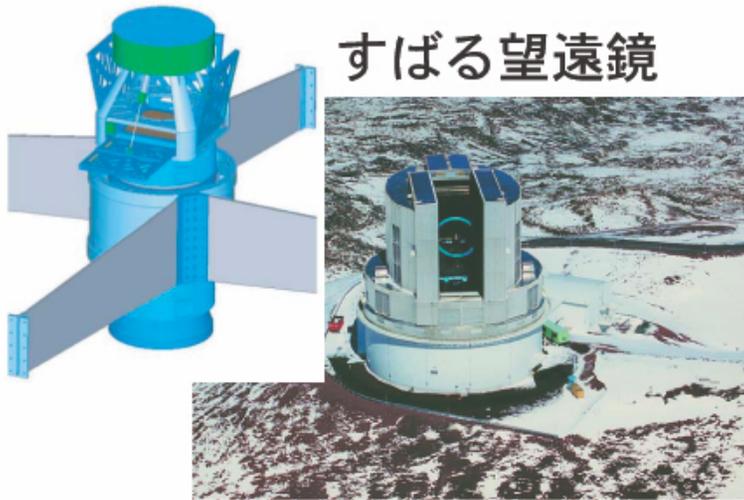
- **DES: Dark Energy Survey**
 - 5000平方度の測光サーベイ@チリ4m
 - 2009年にサーベイ開始を目指す
- **LSST: Large Synoptic Survey Telescope**
 - 20000平方度の測光サーベイ@メキシコ/チリ8.4m
 - 2013年にサーベイ開始を目指す
- **JDEM: Joint Dark Energy Mission (NASA+DOE)**
 - スペースミッション
 - $0.5 < z < 1.7$ の超新星サーベイ
 - SNAP: SuperNova Acceleration Probe
 - Destiny: Dark Energy Space Telescope

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

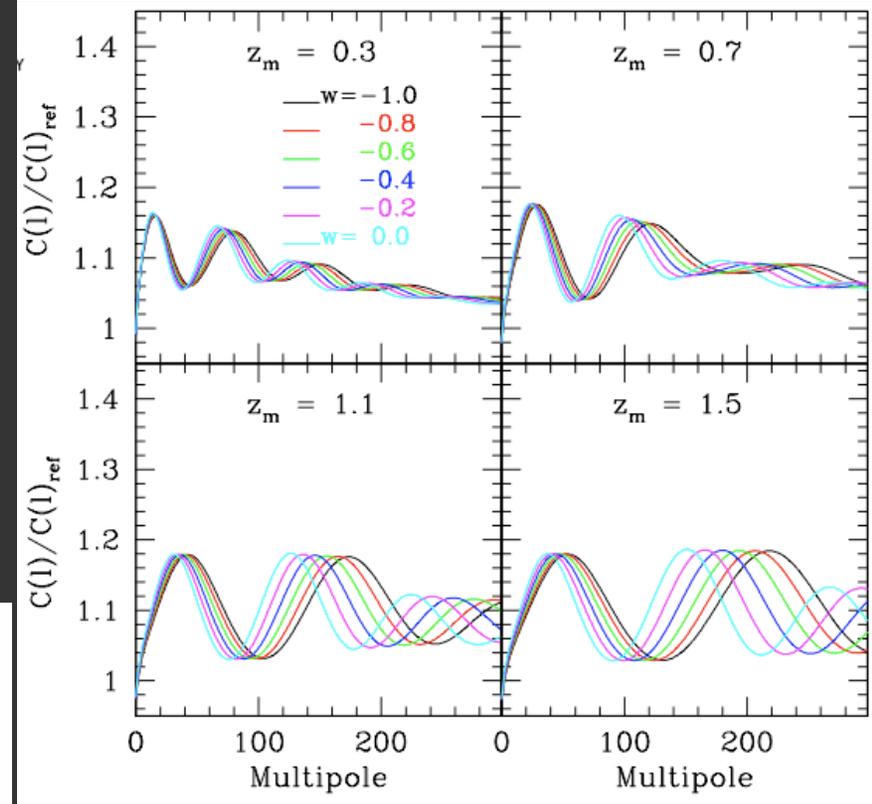
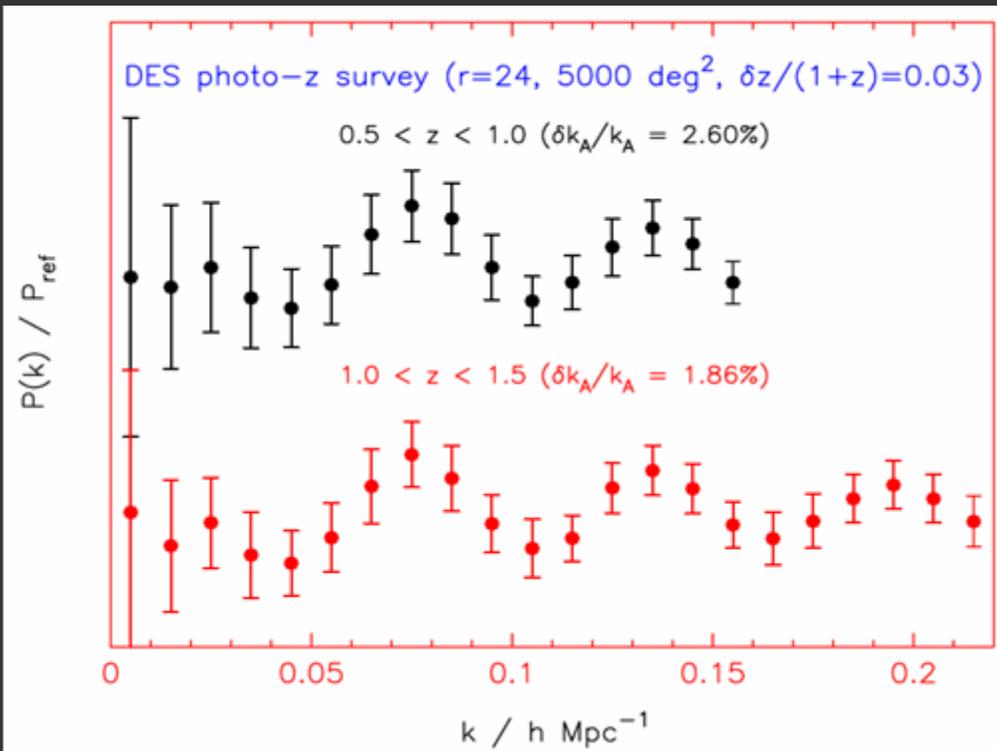
計画研究B01 (名古屋大理論) : 銀河分布を用いた
ダークエネルギーの研究
計画研究B02 (東北大理論) : 重力レンズ効果による暗黒物質分布
と宇宙の構造形成史の解明
公募研究 : 超新星探査とダークエネルギー性質解明に関する理論
および観測的研究

- 研究代表者 : 唐牛宏
- 2006年度採択
- 2006年～2011年の6年計画
- HyperSuprime-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

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: さらになる1000 deg² サーベイの追加観測

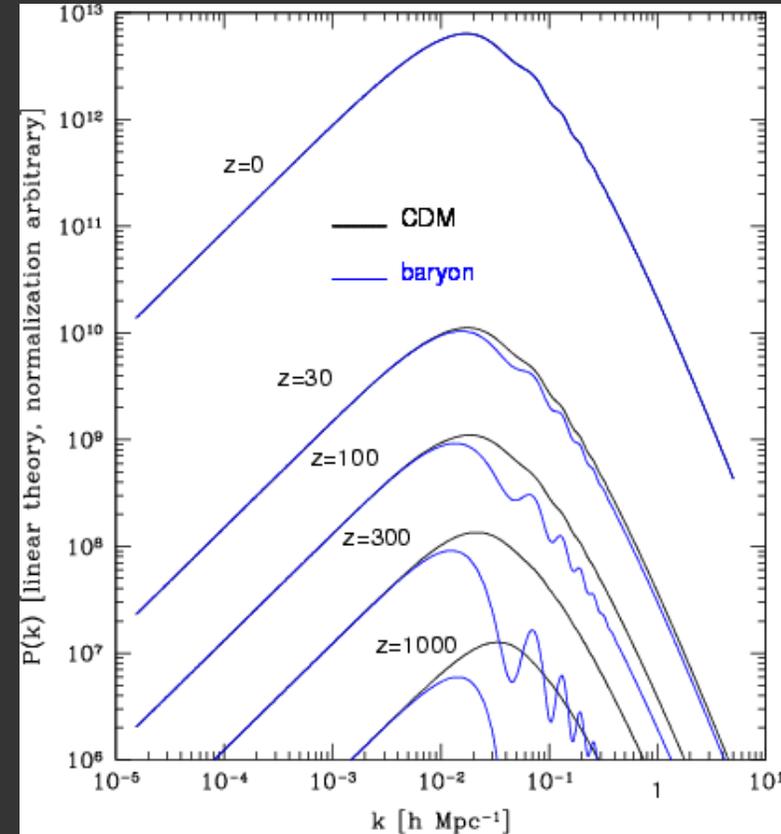
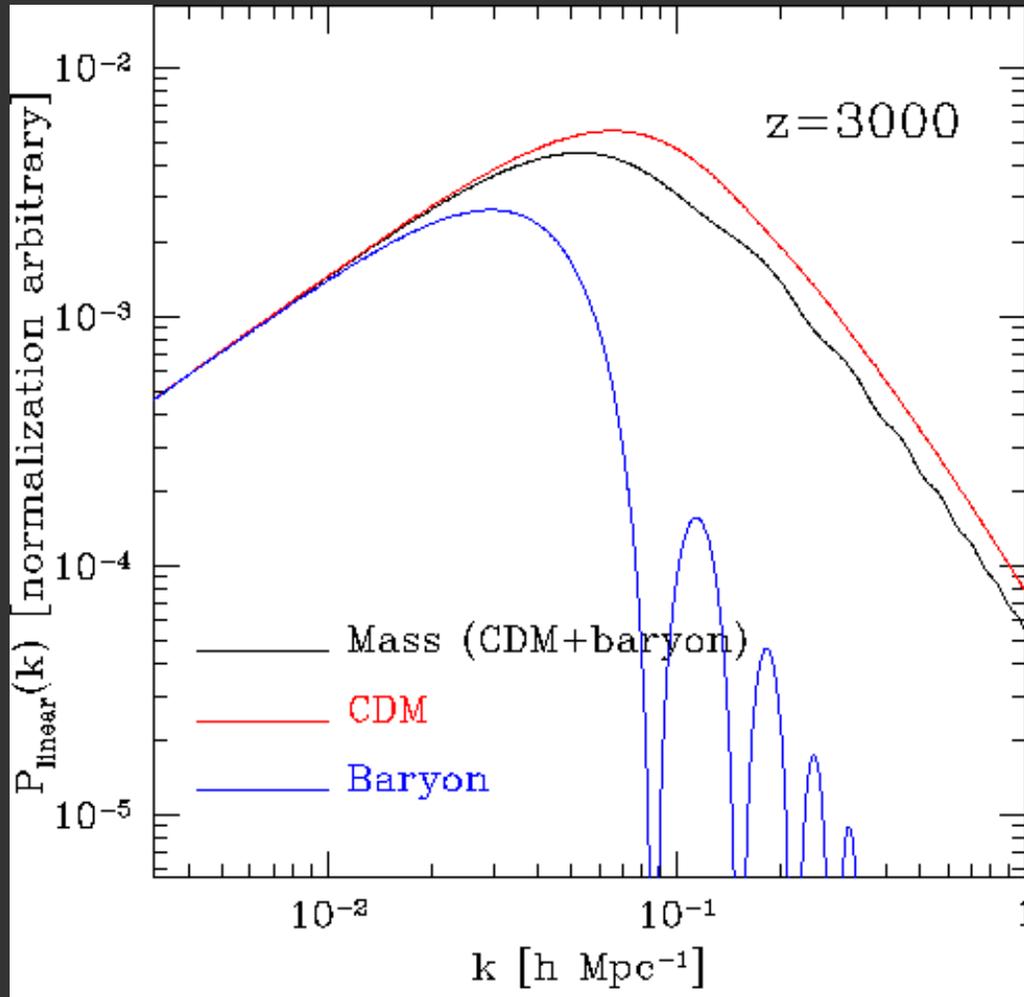
測光サーベイによる2次元ゆらぎパワースペクトルのBAO



Blake & Bridle

Fosalba & Gaztanaga

BAO(バリオン弾性振動)と3Dパワースペクトルの進化



CMBFASTを用いた結果
(東大: 樽家篤史)

BAO研究における 測光サーベイ vs 分光サーベイ

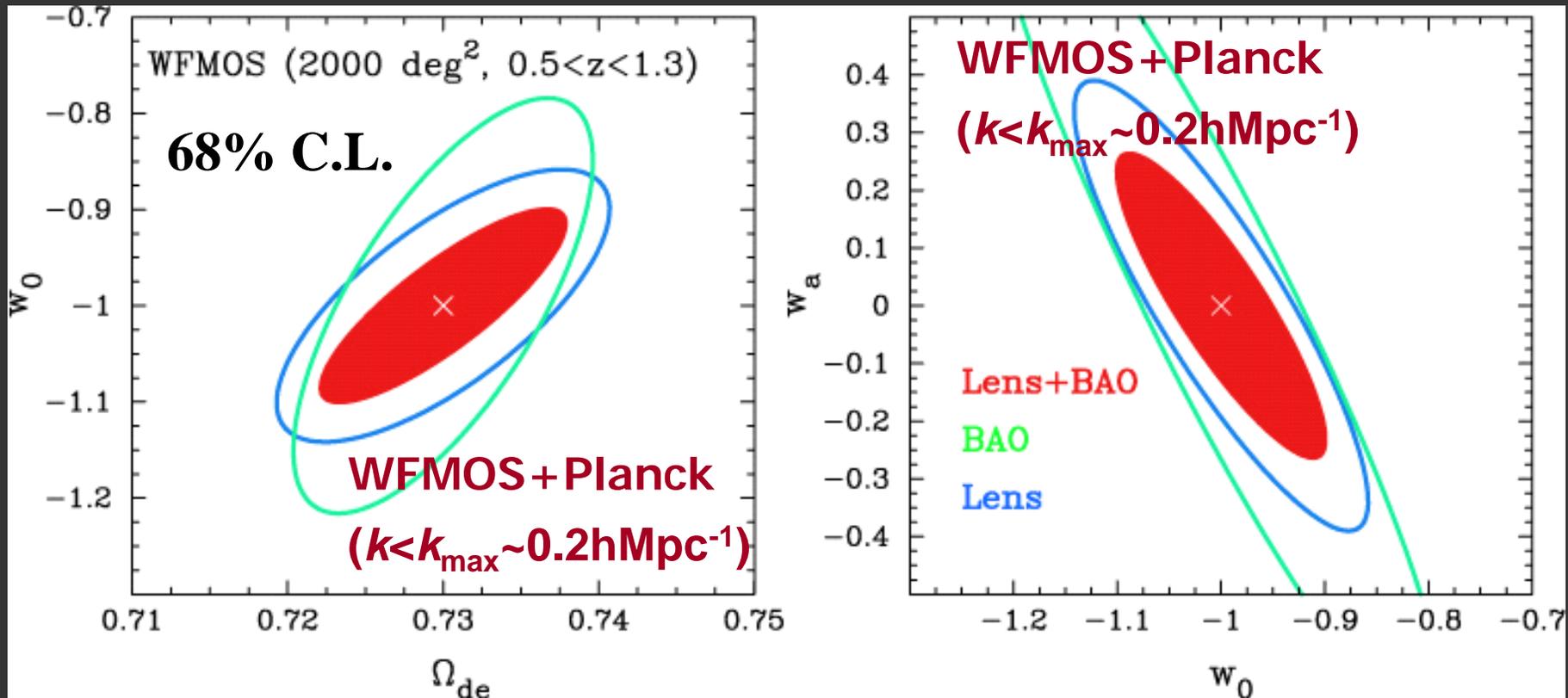
- **基本的には相補的**
 - 独立な制限として系統誤差をチェックできる(要求精度が天文学的常識から見てあまりにも高すぎる)
 - 分光用のターゲットを測光サーベイから選ぶ
- **測光サーベイ(2D)では信号が弱まるためより統計的なデータが必要**
 - 測光サンプルの信頼性
 - 測光赤方偏移の精度の系統誤差
 - データの他の目的への利用が限られる
- **分光サーベイ(3D)はより直接的**
 - ただし、コストと時間がかかる
 - 得られたデータは汎用度が高い

ダークエネルギー観測からみたWF MOSの概要

- 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ポイントング(900時間)
 - $2.3 < z < 3.3$: Lyman-break galaxies
 - 6×10^5 個/300平方度 \Rightarrow 200ポイントング(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

ダークエネルギーへの制限予想

- 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

(東北大 高田昌広)

A modified DGP model

Yamamoto, Bassett, Nichol, Suto & Yahata
submitted to PRD, astro-ph/0605278

- modified Friedmann equation (spatially flat)

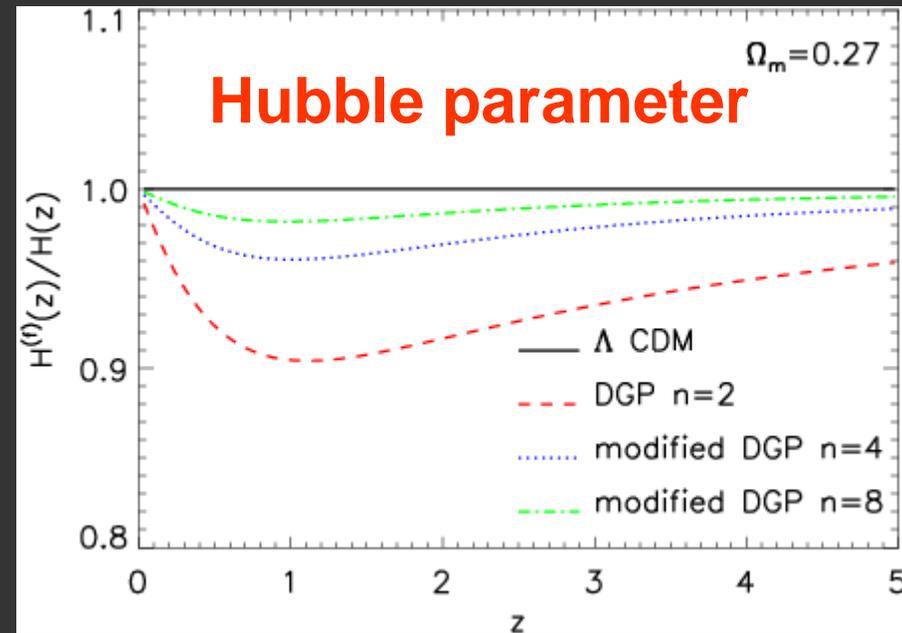
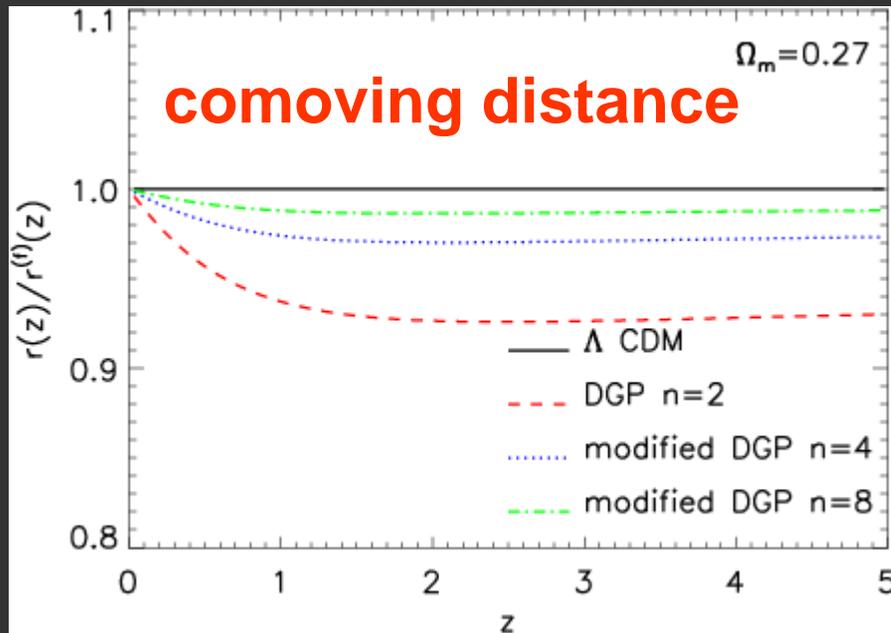
$$H^2 - \frac{H^{2/n}}{r_c^{2-2/n}} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

- $n=2$: DGP model, $n=\infty$: cosmological constant
- r_c : key parameter $\sim 1/H_0$
 - $r < r_c$: 4D space-time, $r > r_c$: 5D space-time

- if spatially flat

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

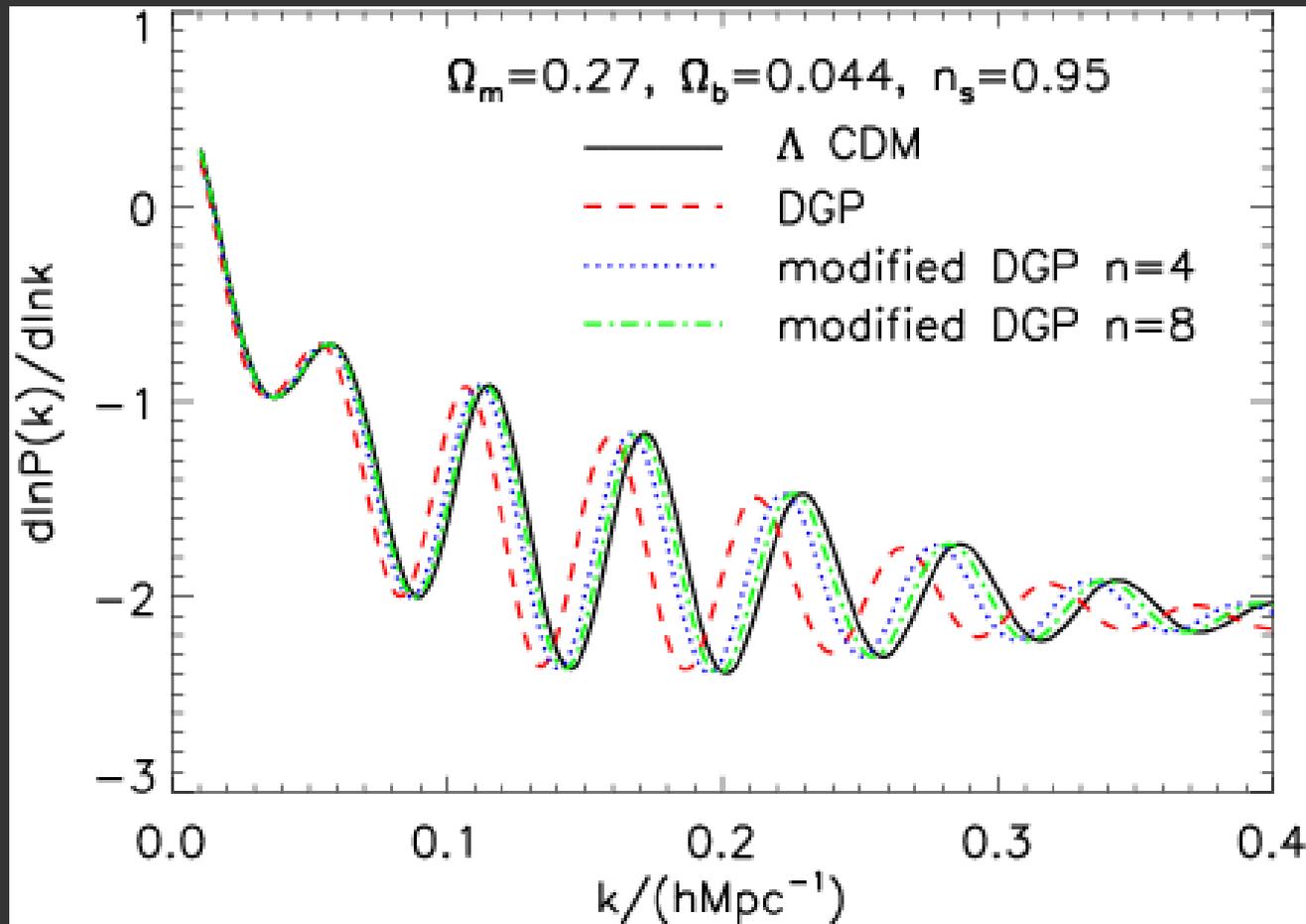
The cosmological constant vs. the modified DGP model



ratios relative to the cosmological constant model
(spatial flatness is assumed)

Yamamoto et al. astro-ph/0605278

Predicted shifts of BAO peaks

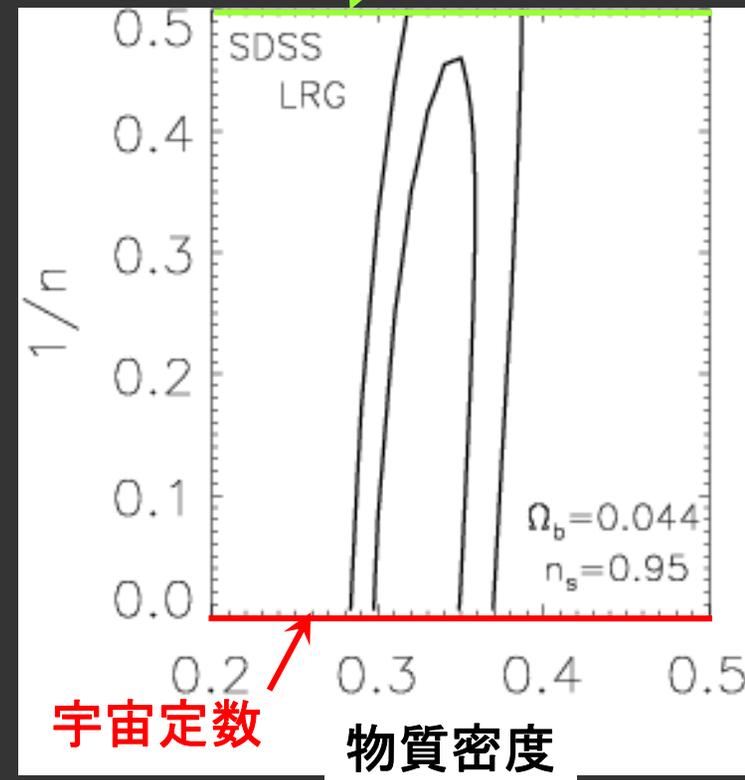
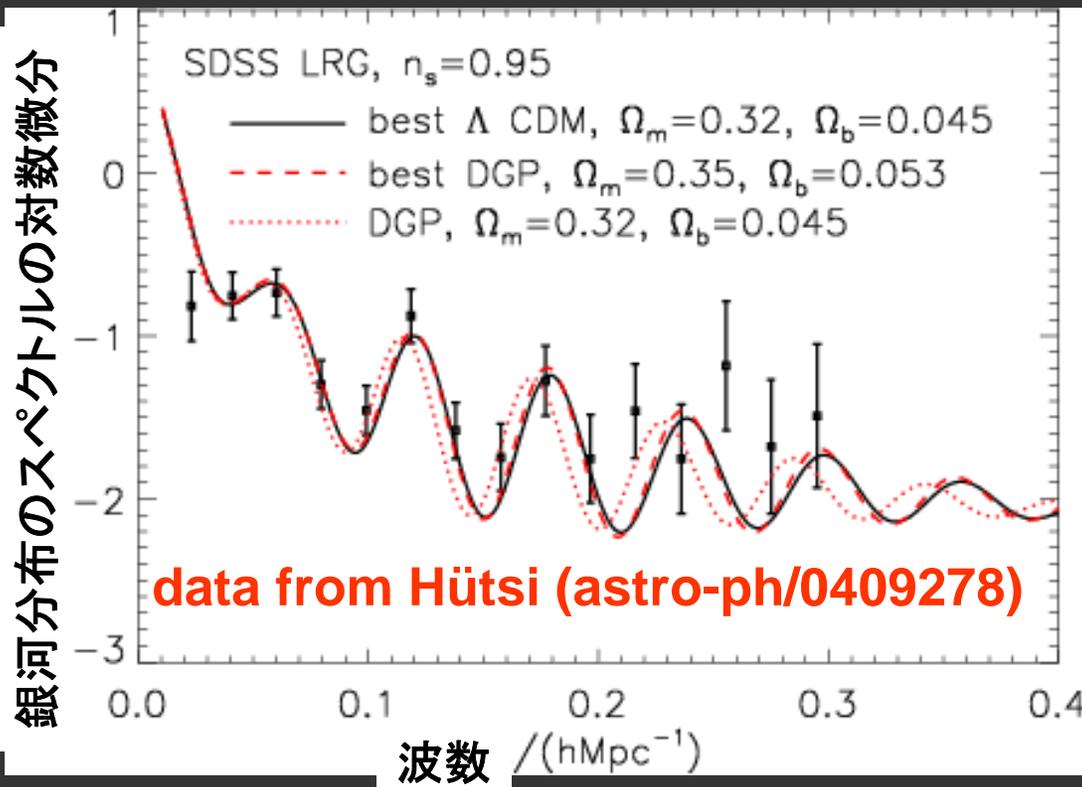


purely linear theory, observation in Λ CDM assumed

Yamamoto et al. astro-ph/0605278

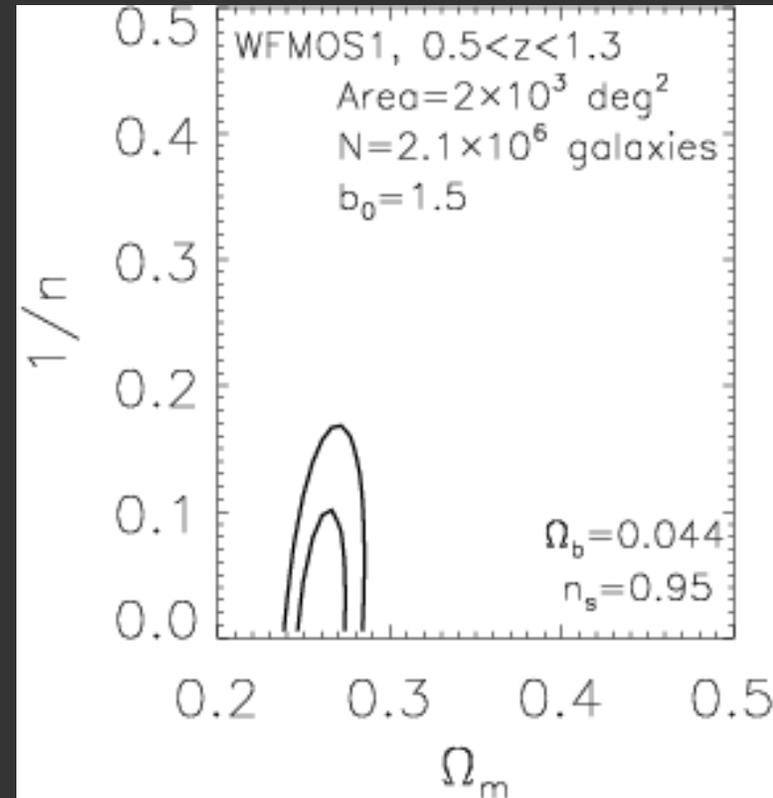
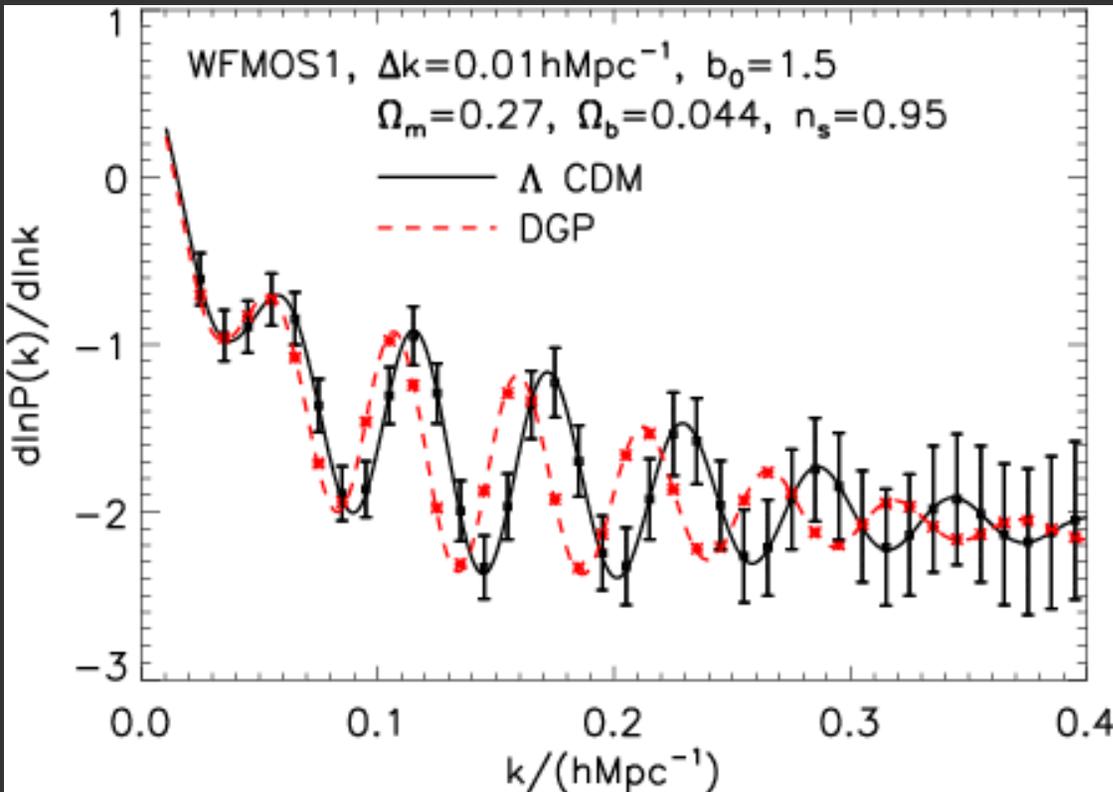
分光サーベイによるBAOデータの現状： SDSS LRGを用いた重力法則とダーク エネルギーについての制限

5次元重力モデル(DGP)



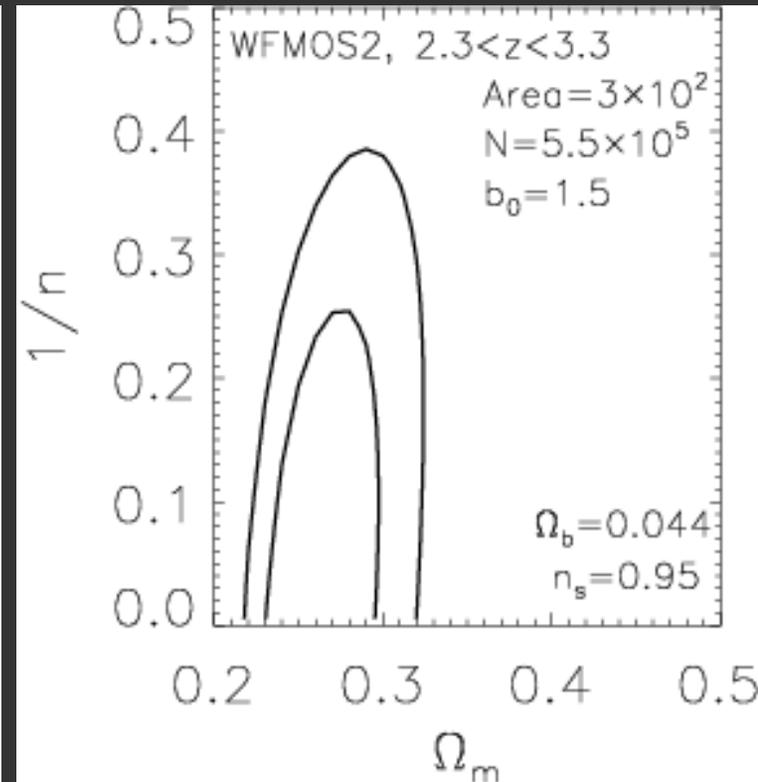
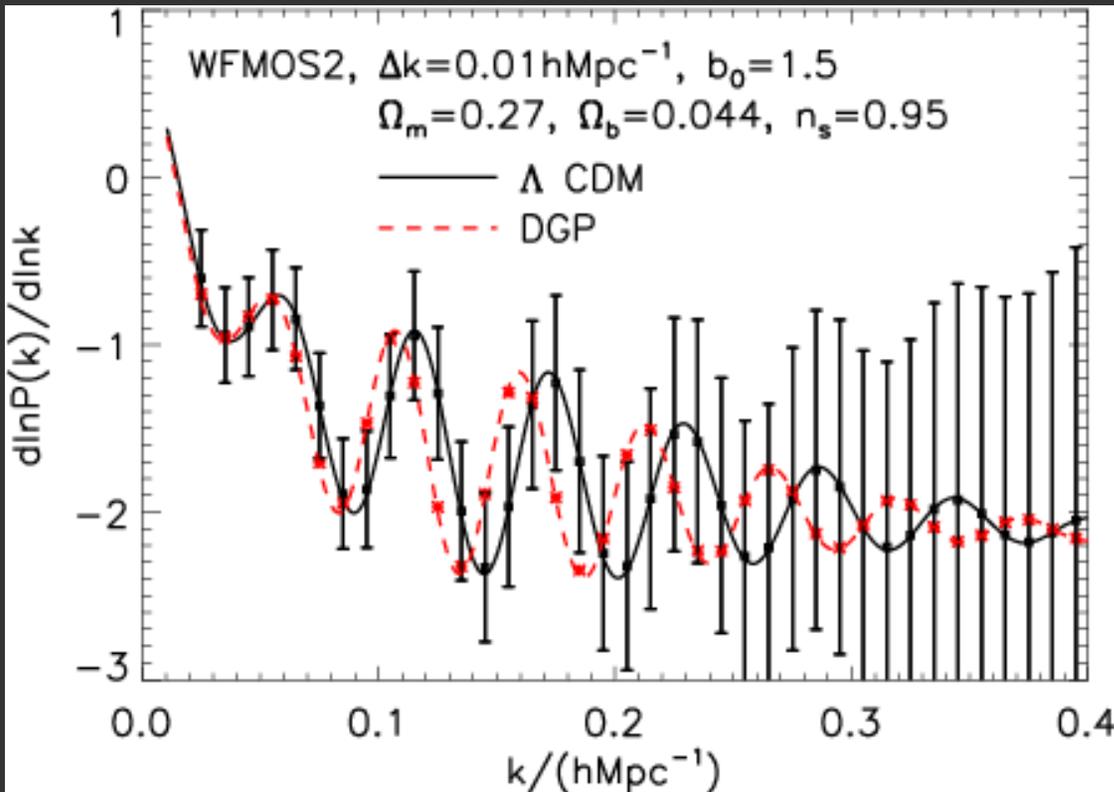
Yamamoto et al. astro-ph/0605278

Expected constraints from future WFMOS $z=1$ sample



Yamamoto et al. astro-ph/0605278

Expected constraints from future WFMOS z=3 sample



Yamamoto et al. astro-ph/0605278

BAO研究における分光サーベイの意義

- **ダークエネルギー問題に対して重要な天文学的貢献をなすことが期待できる**
 - 測光観測サーベイの提案は数多くあるが、大規模分光観測サーベイ提案は他に存在しない
 - FMOSからWF MOSへ
 - すばるを用いて日本が主導権をとれる位置にある
- **ダークエネルギー探査とはいえ、実質的にはSDSSを高赤方偏移にひろげたもの(つまり、天文学の自然な発展形)という考え方もできる**
 - 物理のコミュニティーから天文に対する予算を増やす
 - ダークエネルギーにこだわらない広い天文学的研究が可能になるはずで、この機会を**利用する**という発想が大切／得策
 - ある割合を高分散分光器にして惑星探査・フォローアップなどにも使えないか？
 - ダークエネルギーに最適化しきらないことが重要かもしれない