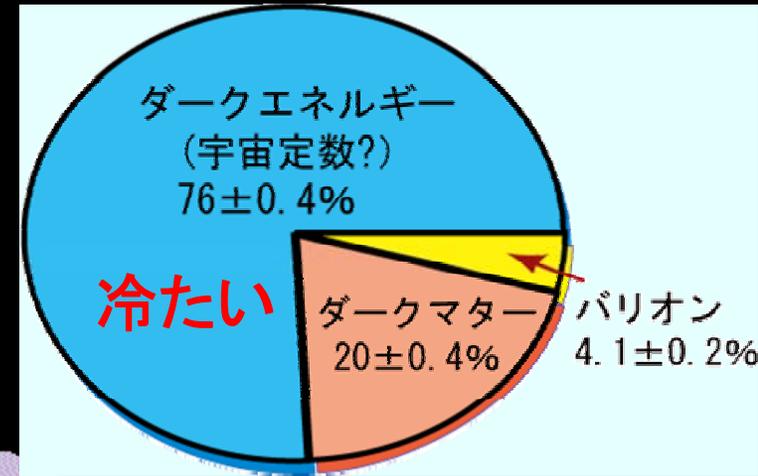


宇宙のダークエネルギー

昨日はクリスマス。
でも世の中が冷たい
ダークマターとダークエネルギーだらけ
という話は、本当
だったみたい、、、



東京大学大学院理学系研究科 須藤 靖

2006年12月26日 理論懇シンポジウム@立教大学

<http://www.geocities.co.jp/SiliconValley-PaloAlto/8371/index.html>

昼



(すばる観測所、田中壱氏撮影)

夜

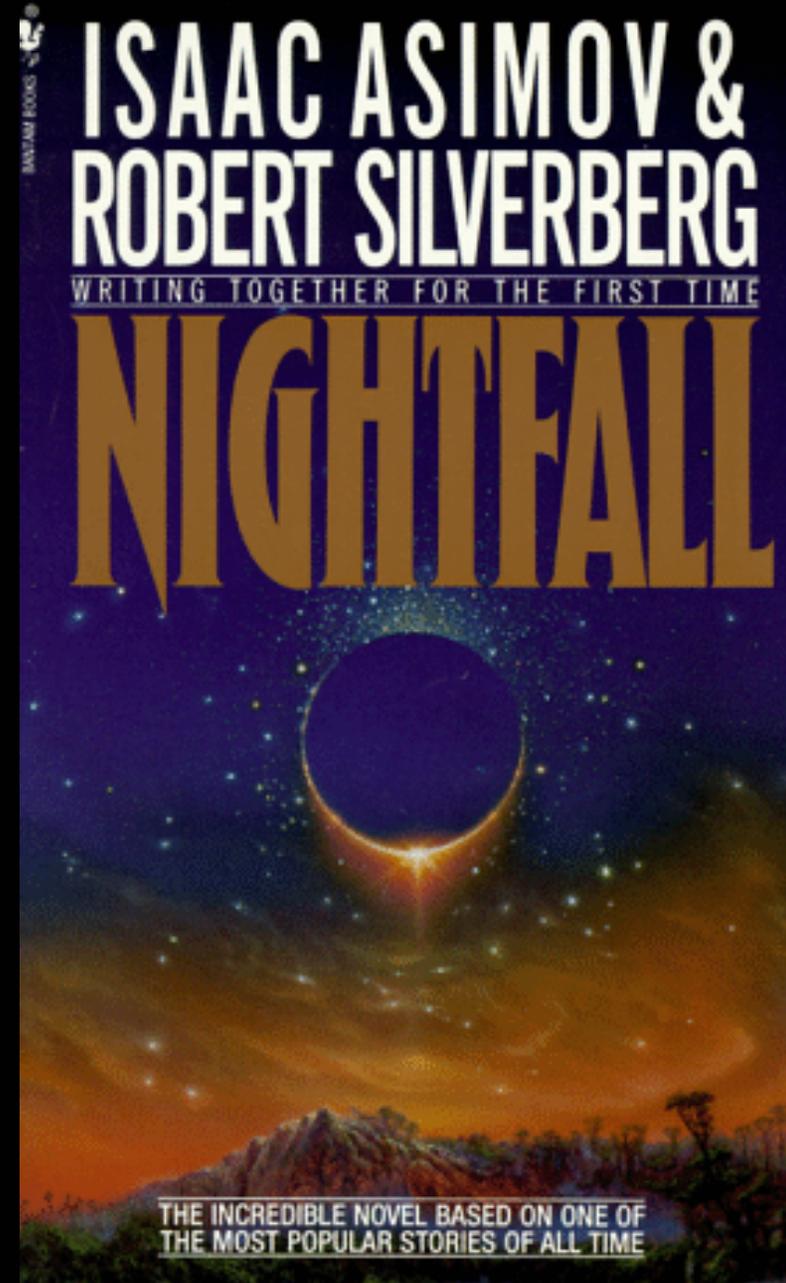
A night sky filled with a dense field of stars, ranging from bright white and yellow to faint blue and red. In the lower foreground, the dark silhouette of a building or observatory structure is visible, featuring a prominent cylindrical tower with a flat top and several rectangular openings. The overall scene is a clear, dark night sky with a high density of stars.

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

夜来たる



- 6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに2049年に一度の夜が訪れる



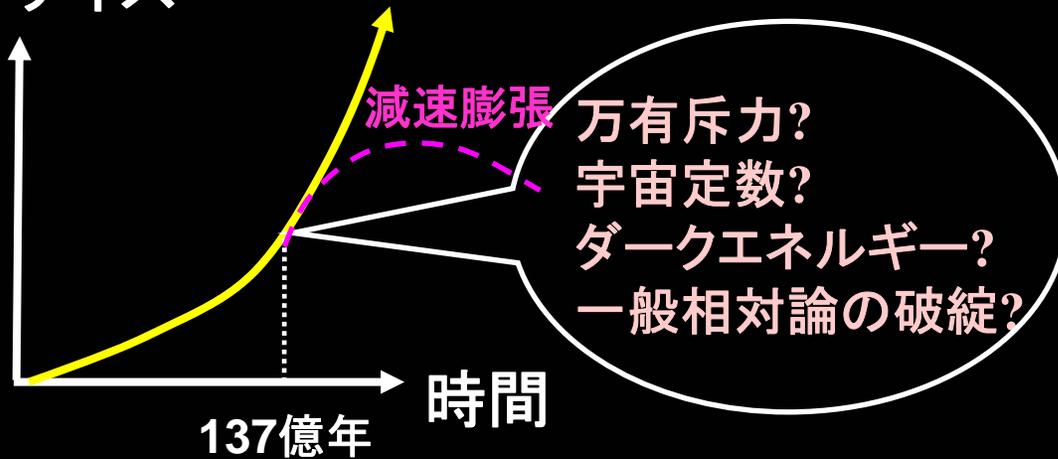
ダークな時間があることの幸せ

- 暗いので昼間にはできない悪いこともできる
- リラックスできる
- ゆっくり眠れる
- 集中して何かに取り組める
- **地上の世界以外にも、夜空の向こうに別の世界がひろがっていることを教えてくれる**
 - 宇宙とは何か、物質とは何か
 - 天文学の発端、哲学・自然科学の源流
 - 第2の地球？ マルチバース？
 - ダークマター、ダークエネルギー

暗黒／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**



宇宙定数(≡ダークエネルギー)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！

暗黒エネルギーと宇宙の状態方程式

■ 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
- 相対論では重力は
 $\Delta \phi = 4 \pi G (\rho + 3p) = 4 \pi G \rho (1 + 3w)$ なので

$w < -1/3 \Rightarrow$ 万有斥力

- w が時間に依存しなければ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
- $-1 < w < 0$: (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

$w = w(t)$

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”

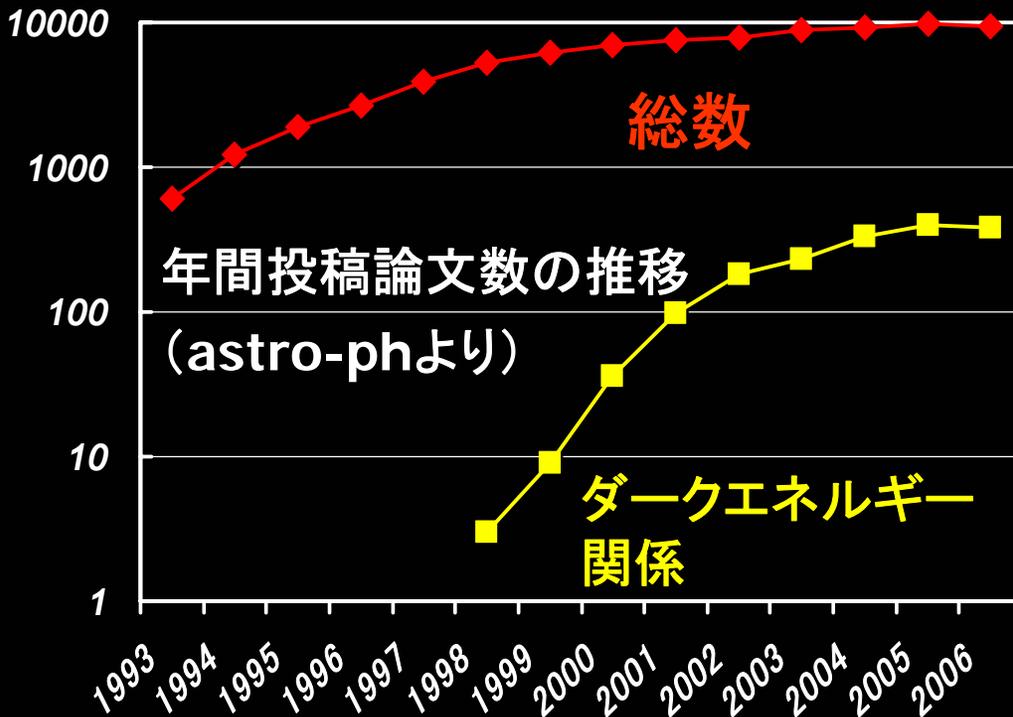
■ Steven Weinberg (1979年度ノーベル物理学賞)

■ “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”

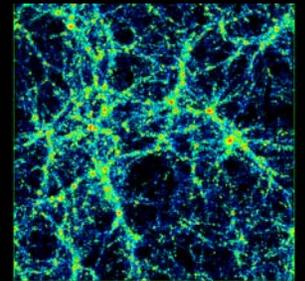
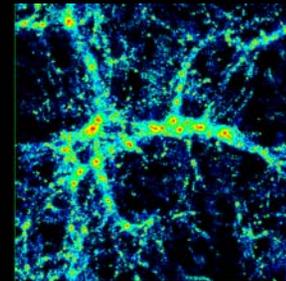
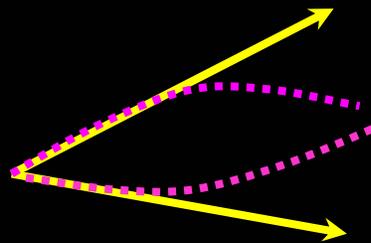
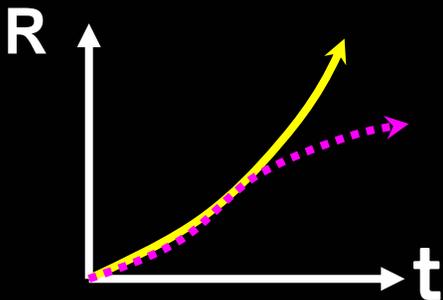
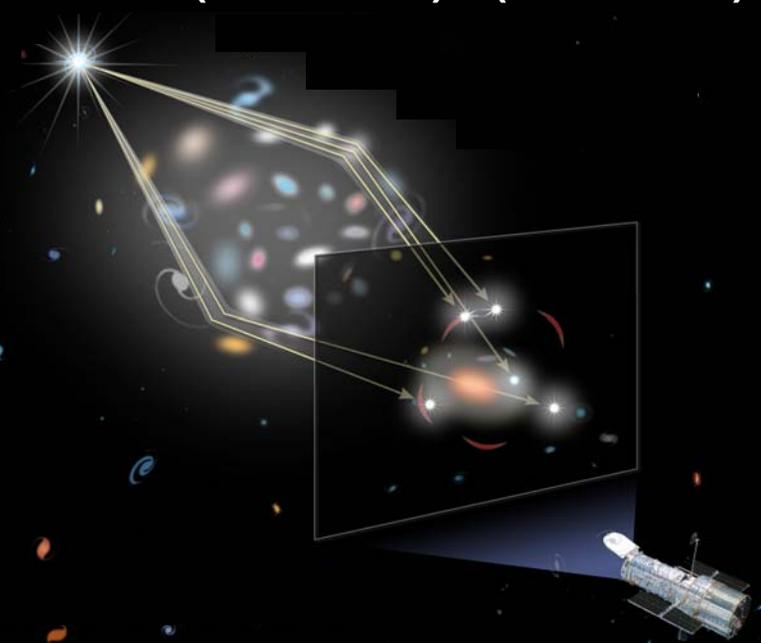
■ Frank Wilczek (2004年度ノーベル物理学賞)



重力レンズ \propto (宇宙の幾何) \times (宇宙の構造)

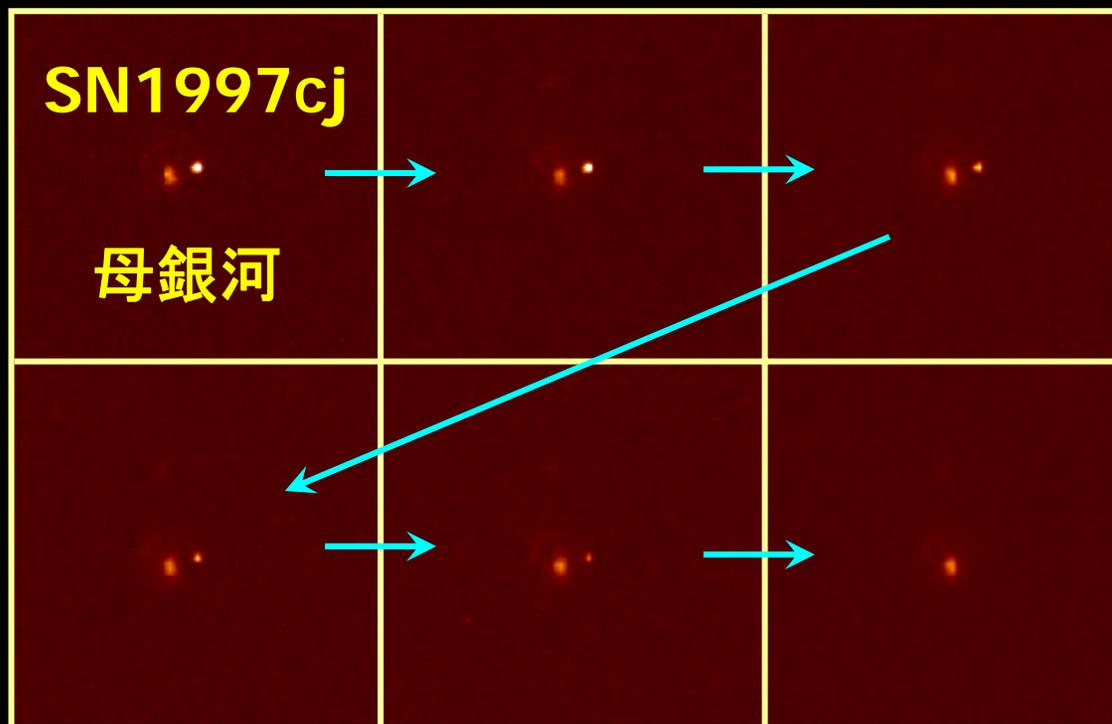
ダークエネルギーの “見え方”

- 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

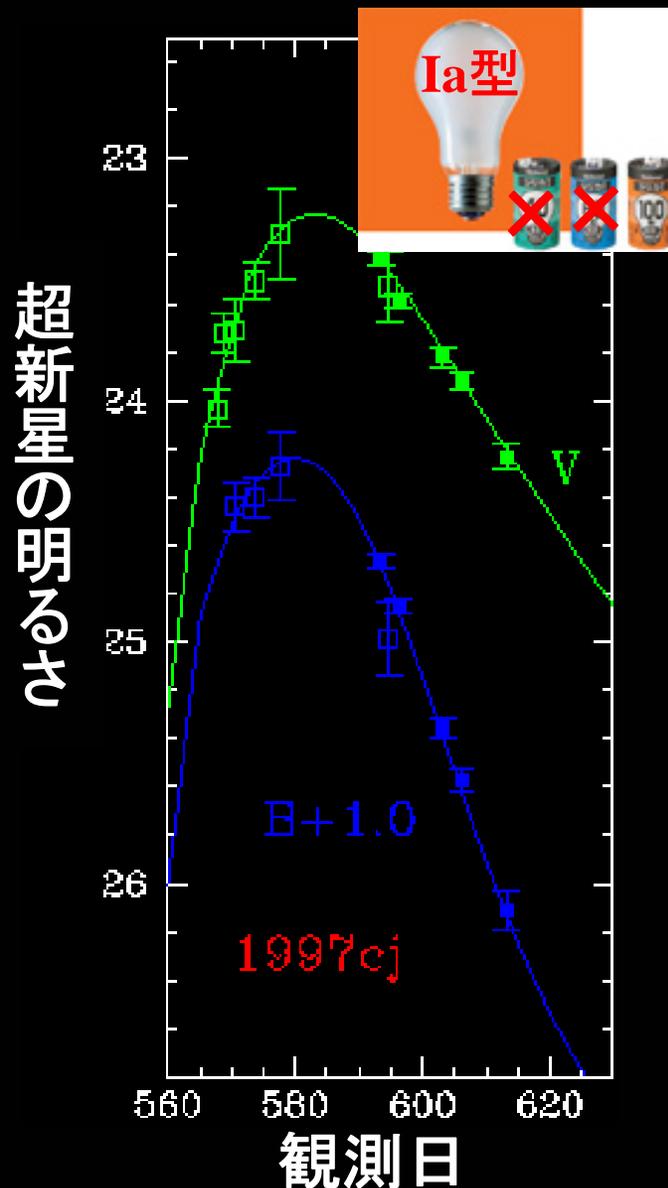


Ia型超新星の光度曲線の測定

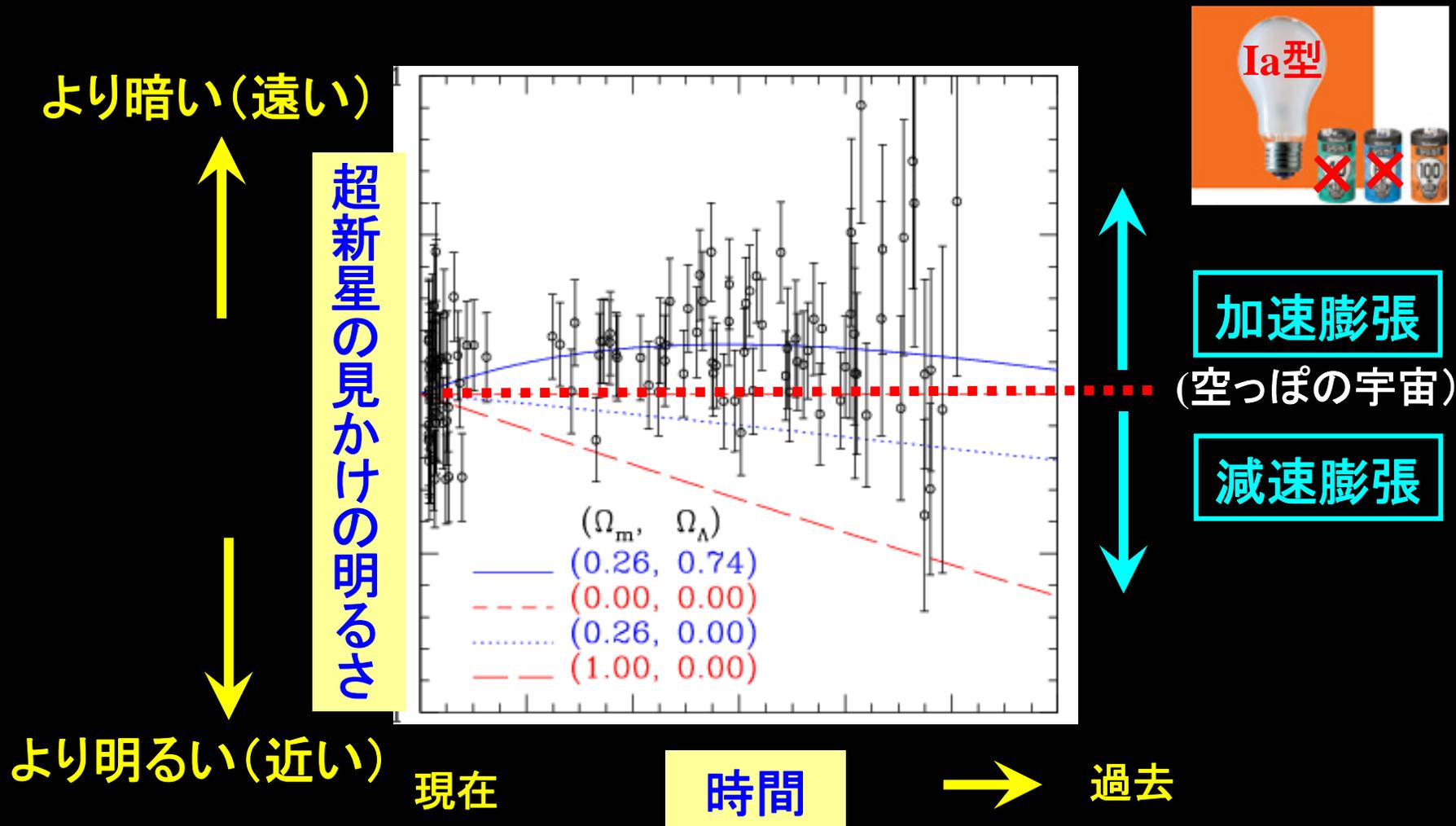
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測

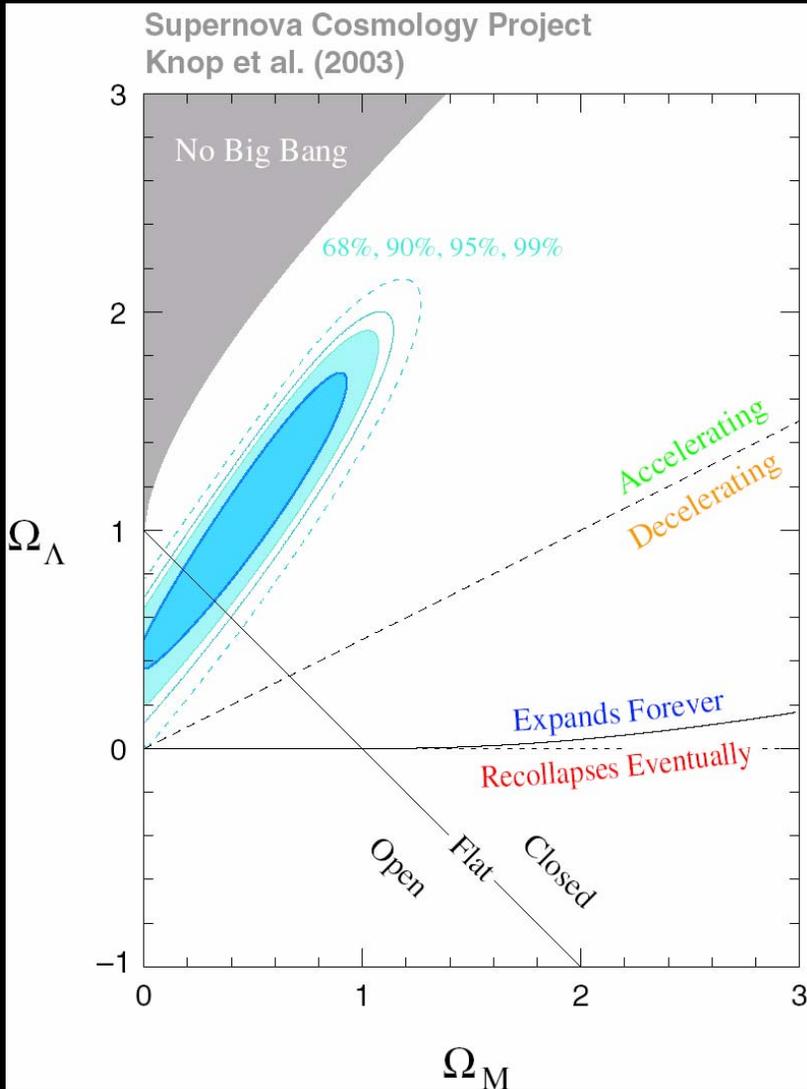


超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 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

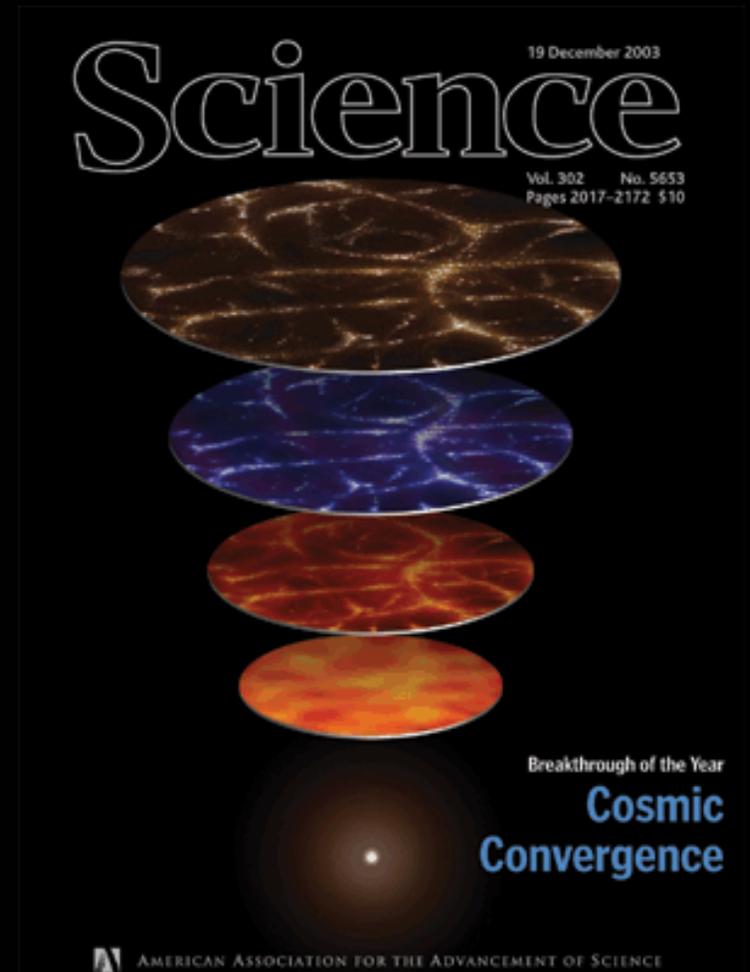
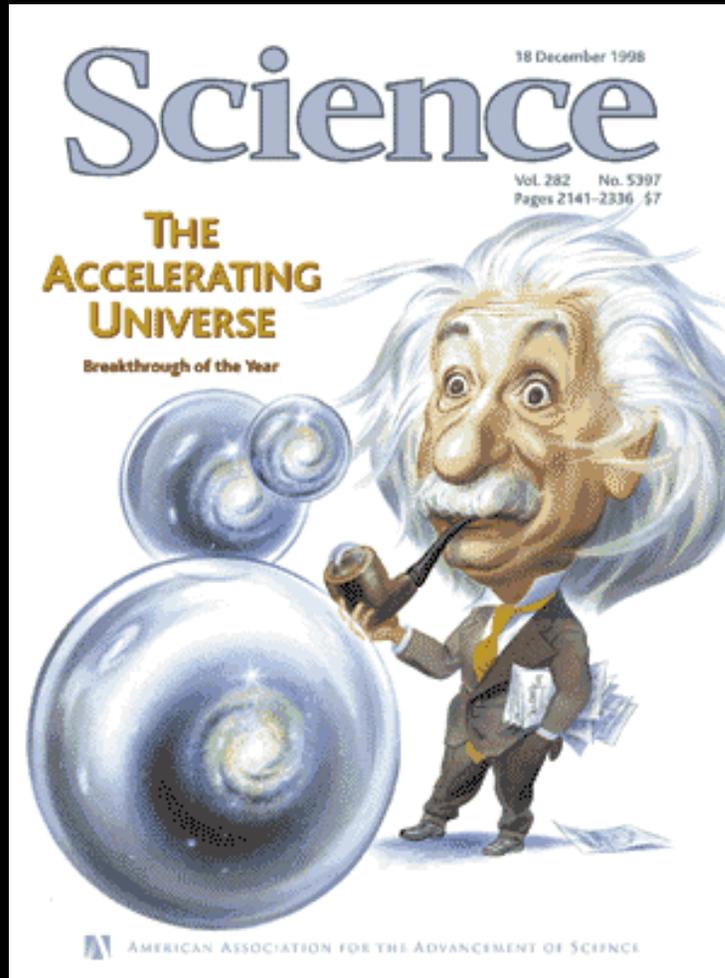
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 現在の宇宙では

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

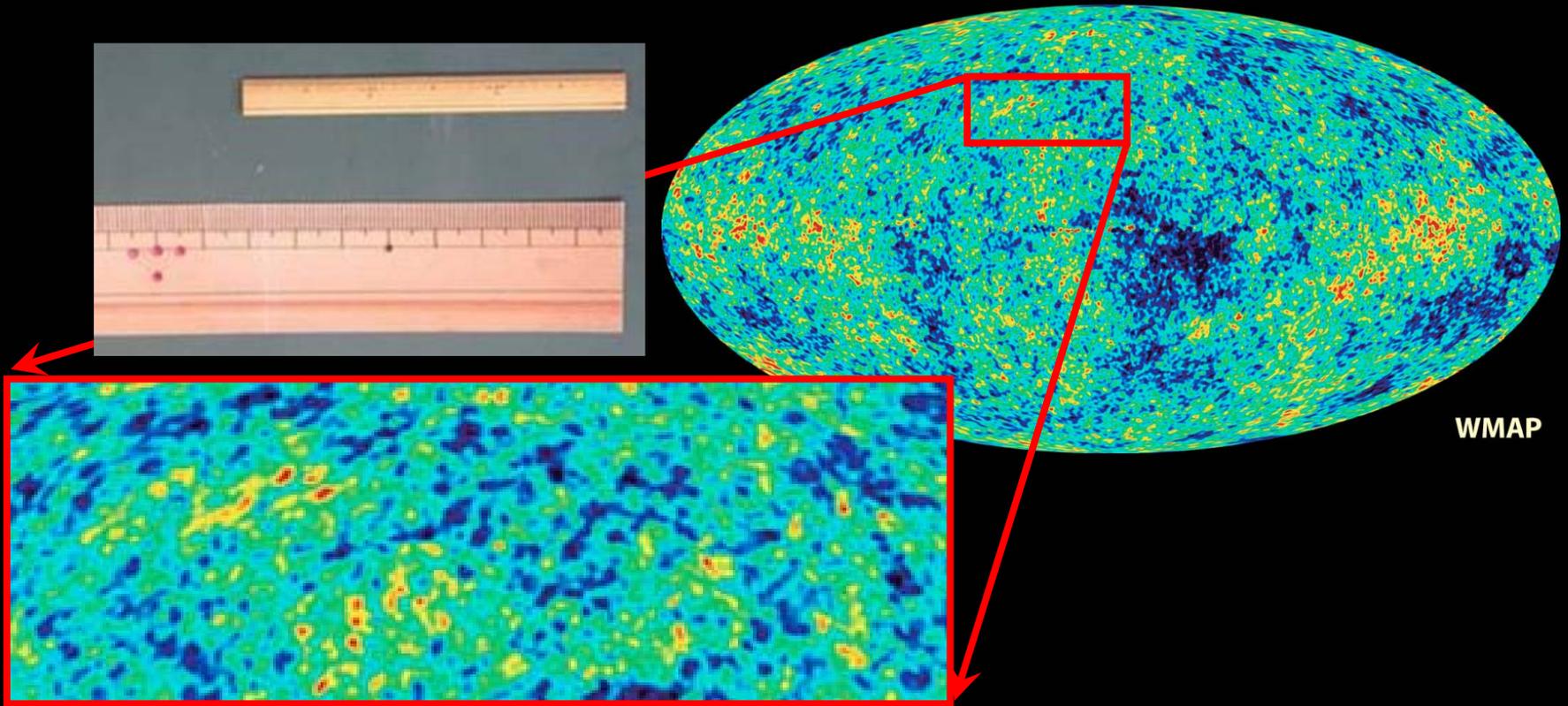
- $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$ であれば現在の宇宙は加速膨張

宇宙の加速膨張と宇宙の組成



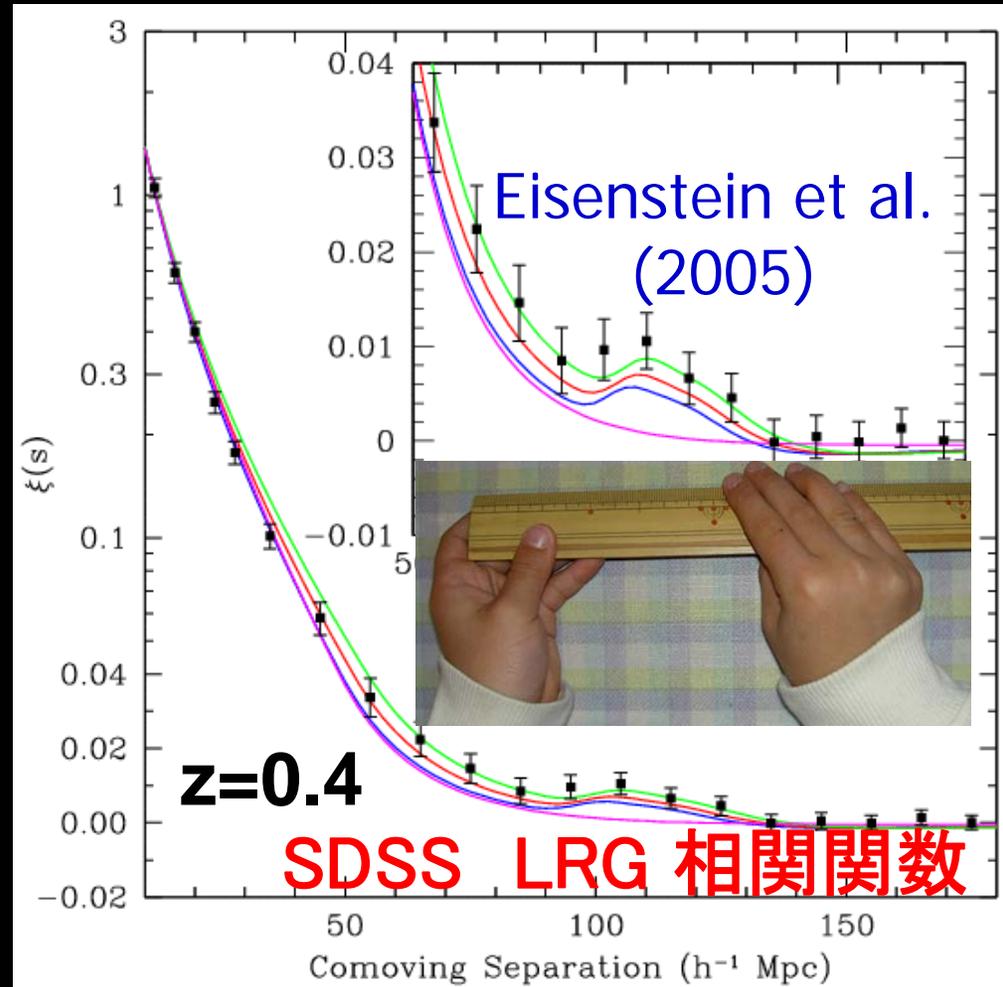
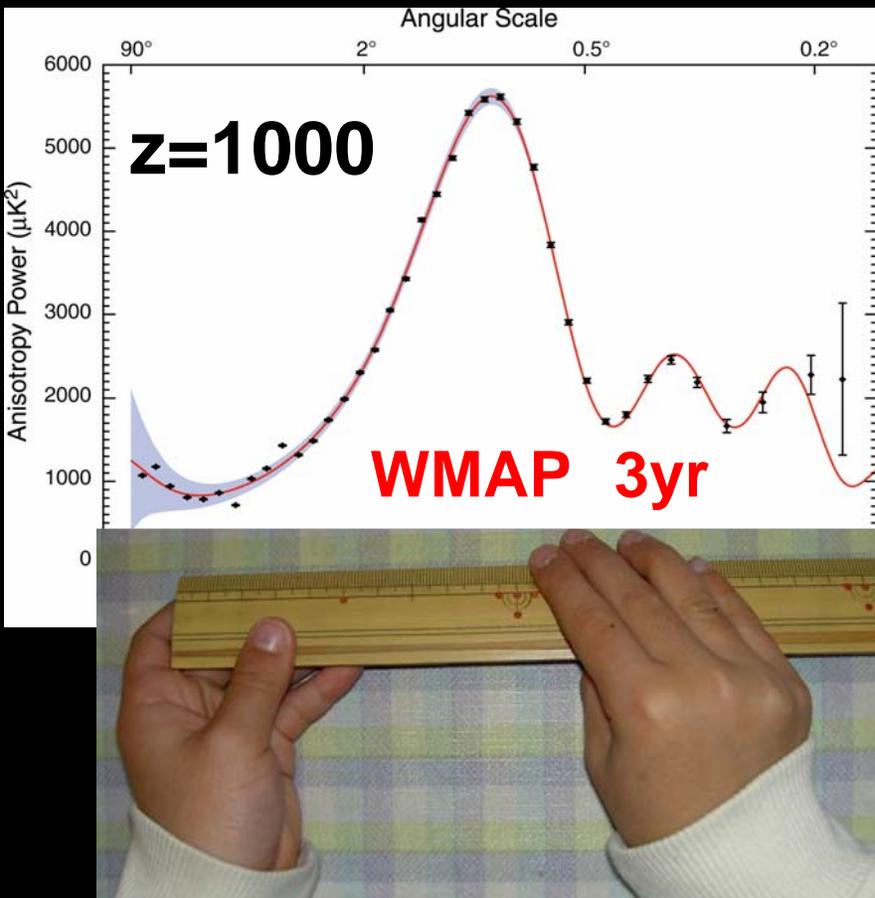
米国の科学雑誌Scienceが選んだ「その年の大発見」(breakthrough of the year)
1998年 宇宙の加速膨張、2003年 宇宙の暗黒エネルギー

CMB中のバリオン・光子弾性振動の痕跡



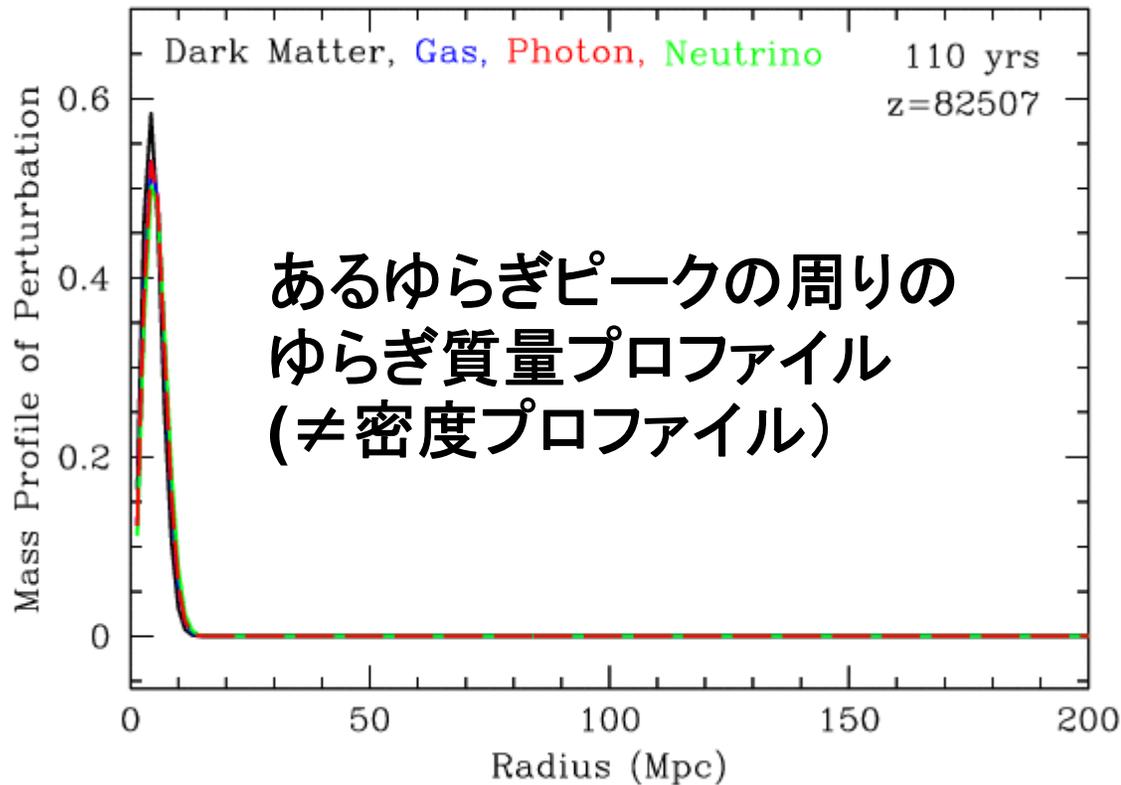
- 再結合時の音波の地平線長 (= 音速 × 宇宙時刻)
 - $147 (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25} (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08} \text{ Mpc}$
- これを幾何学的な標準ものさしとして、宇宙の距離を決定

CMBとバリオン弾性振動 (BAO)



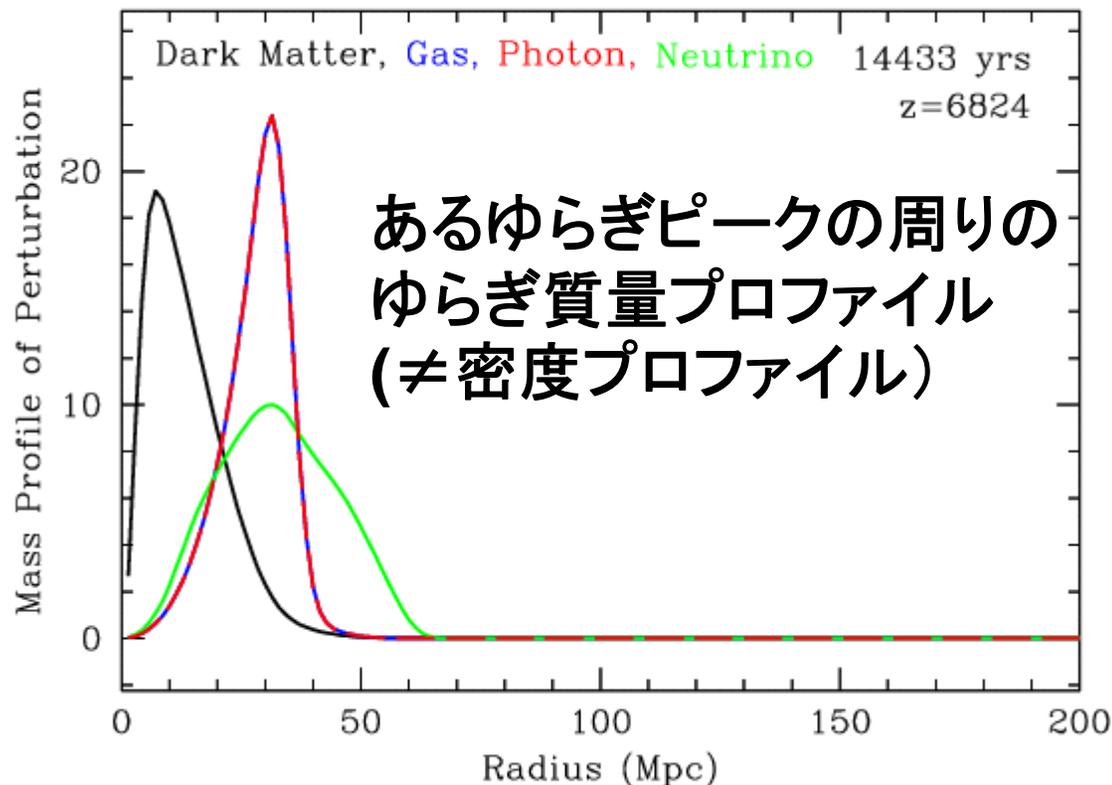
$$147 \left(\frac{0.13}{\Omega_m h^2} \right)^{0.25} \left(\frac{0.024}{\Omega_b h^2} \right)^{0.08} \text{ Mpc}$$

バリオン振動 (1)



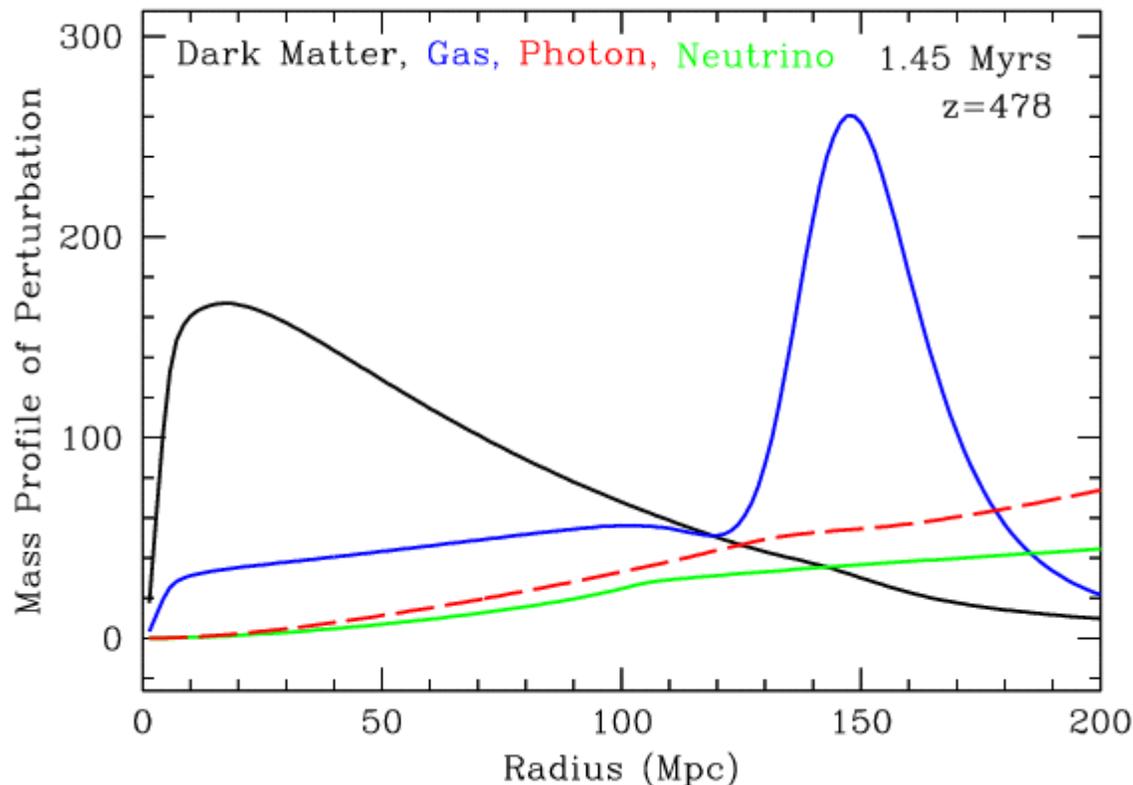
- 宇宙初期では、
ダークマター、バリ
オンガス、光子、
ニュートリノの4成
分すべてが一流体
として振舞う

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

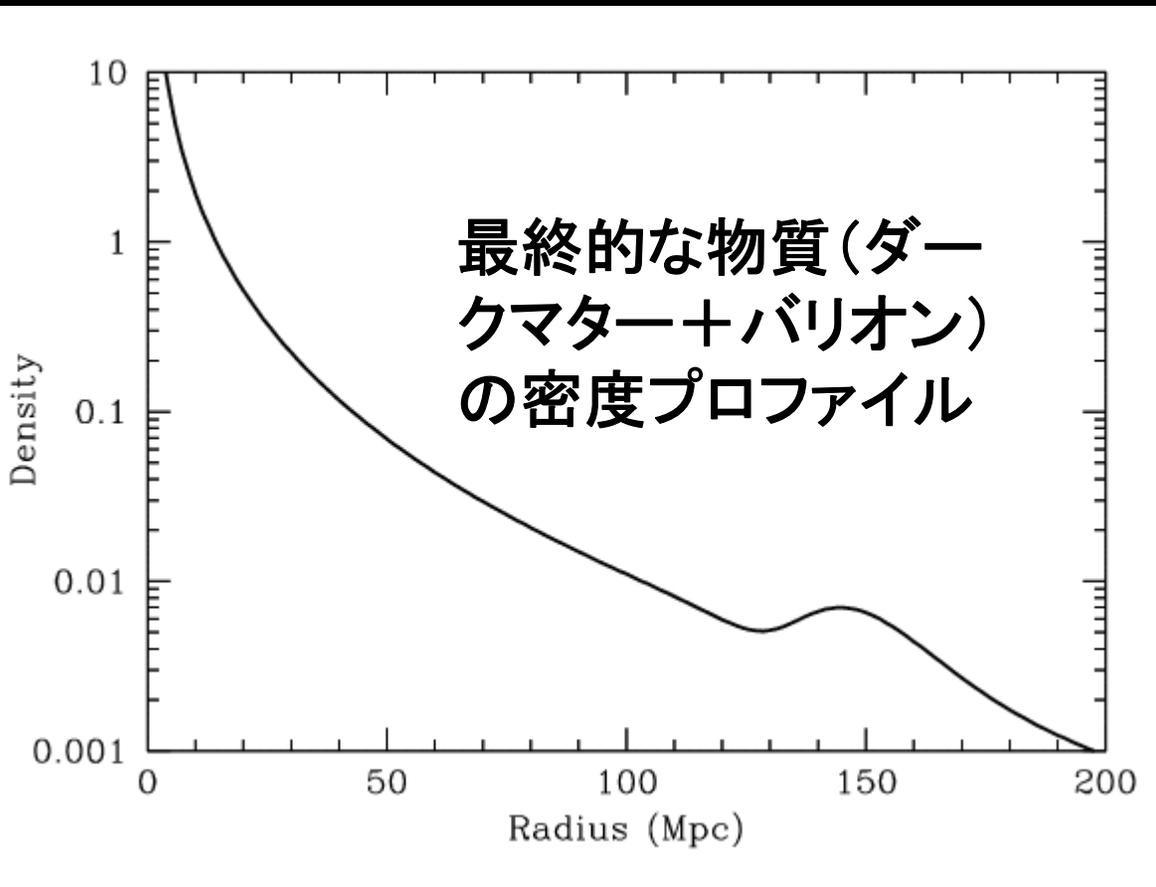
バリオン振動 (3)



■ 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。**

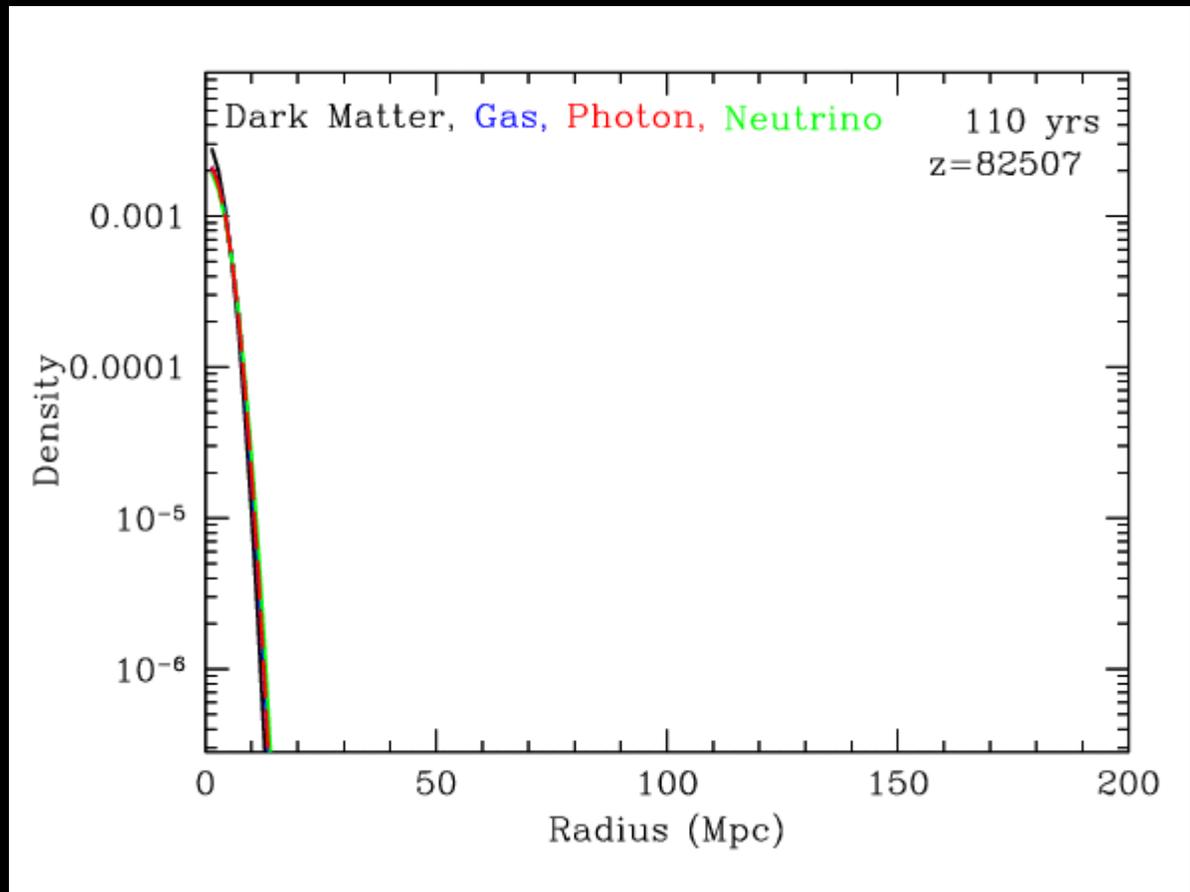
バリオン振動 (4)



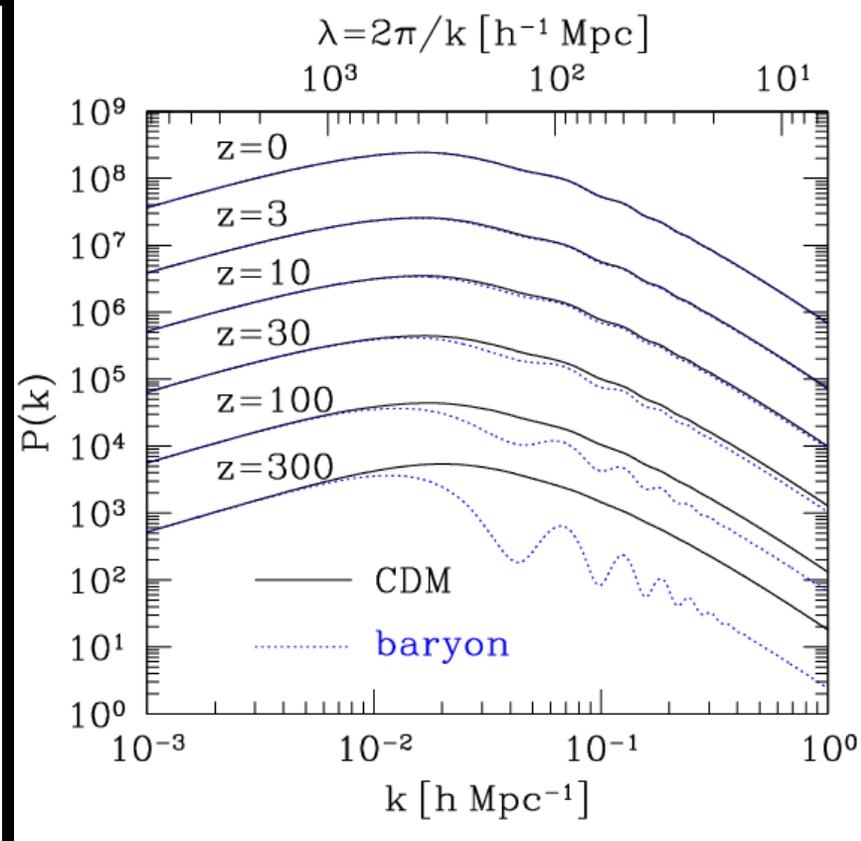
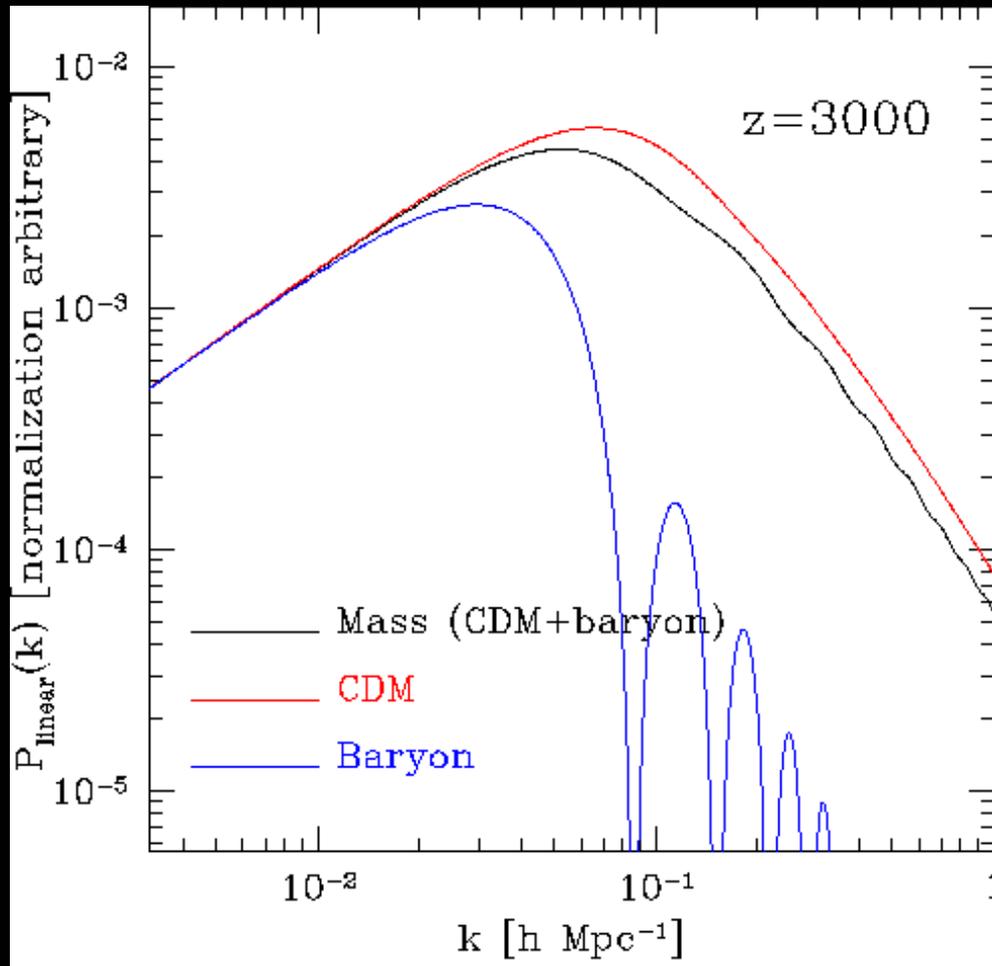
■ バリオンガスと光子の相互作用が切れると、バリオンはダークマターのつくる重力ポテンシャルに落ち込んで揺らぎが成長する。

■ **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



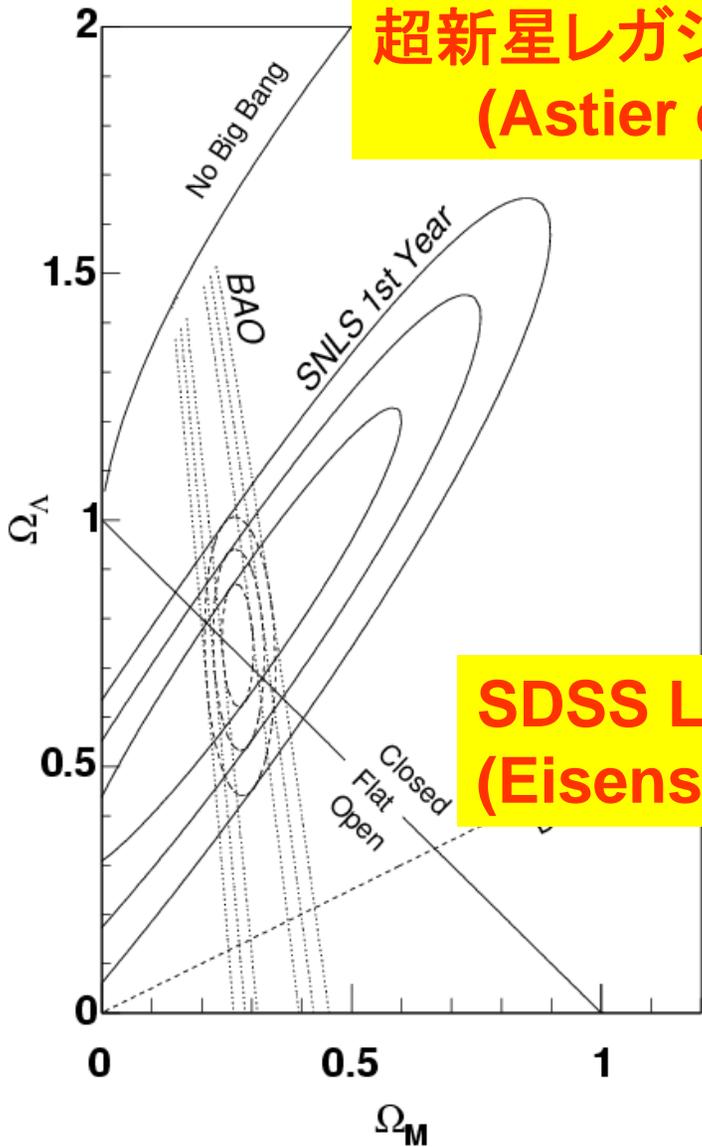
BAO(バリオン弾性振動)と 3Dパワースペクトルの進化



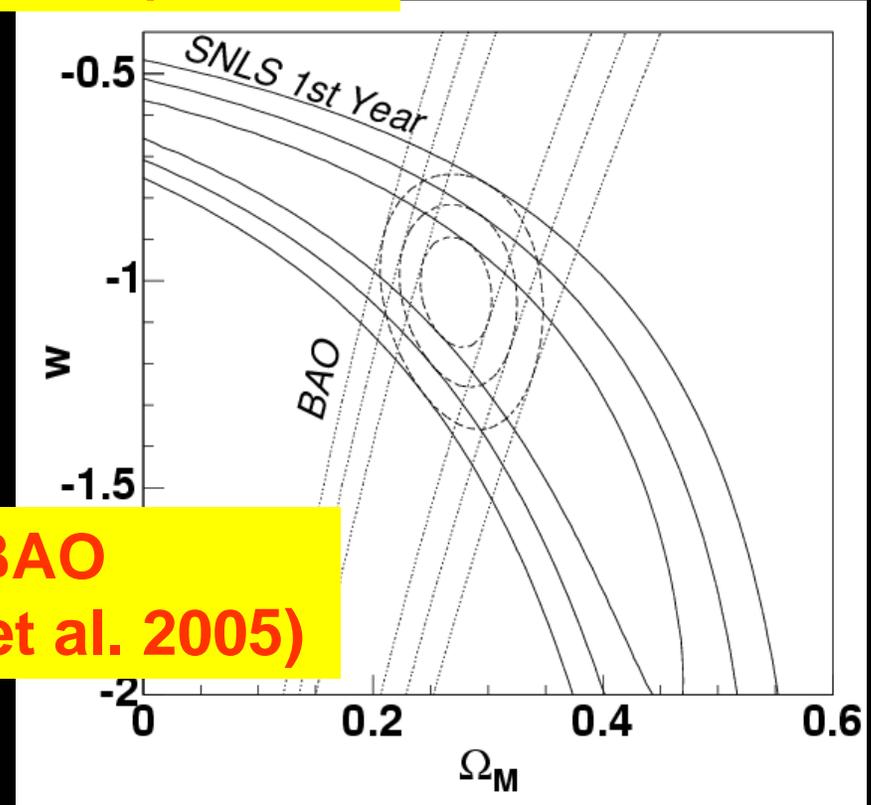
**CMBFAST/CAMBによる
結果 (東大:樽家篤史、
西道啓博)**

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)



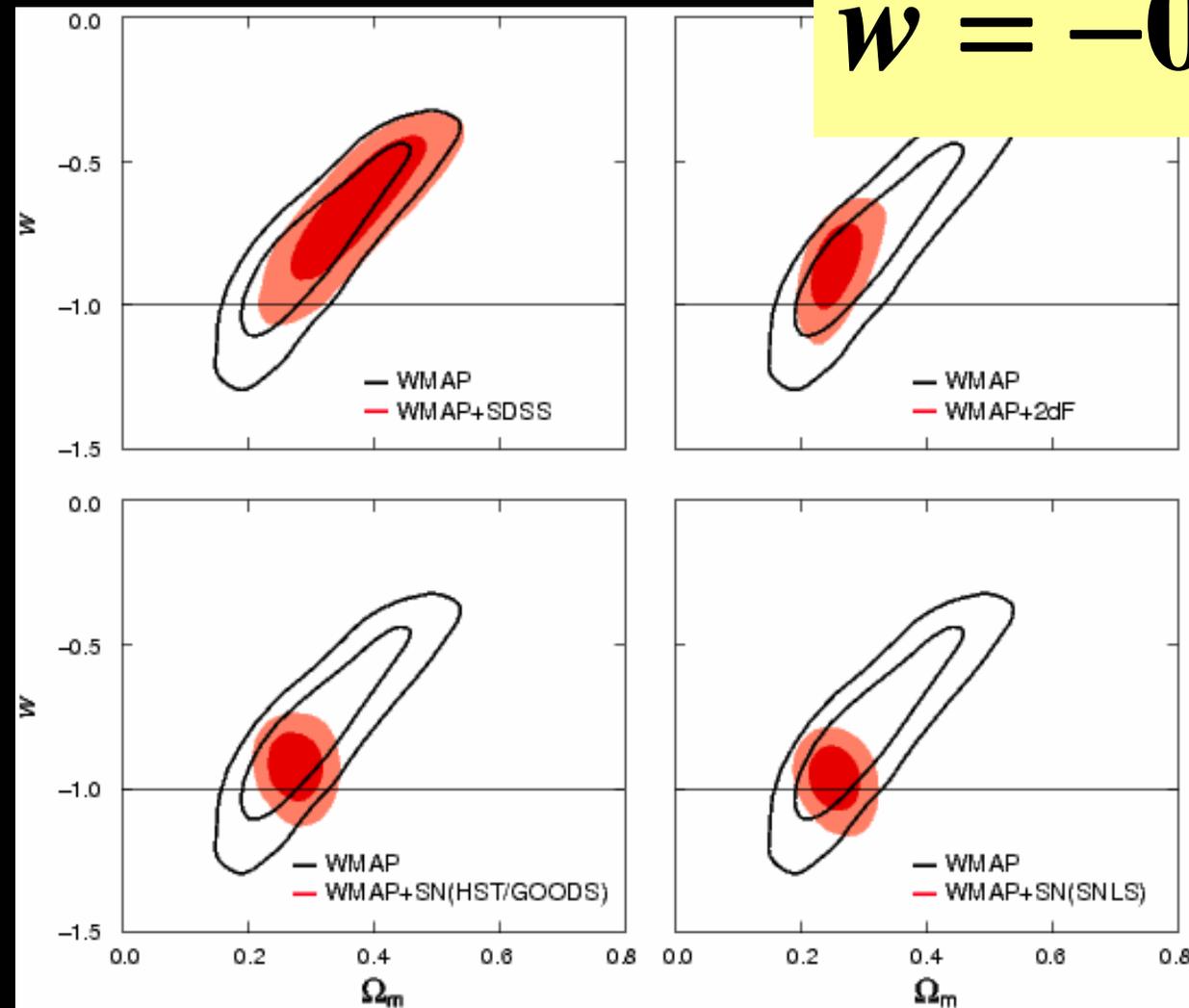
SDSS LRG BAO
(Eisenstein et al. 2005)



$w = -1.023 \pm 0.090$ (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への制限

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

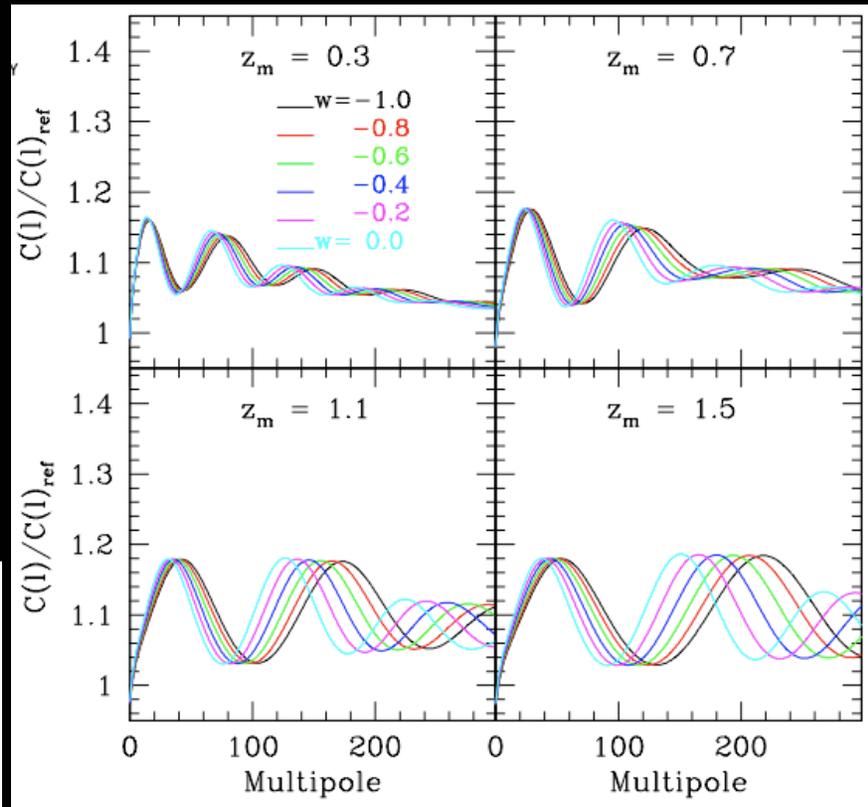


1パーセントレ
ベルでの制限
を課せるかど
うかが将来計
画の鍵

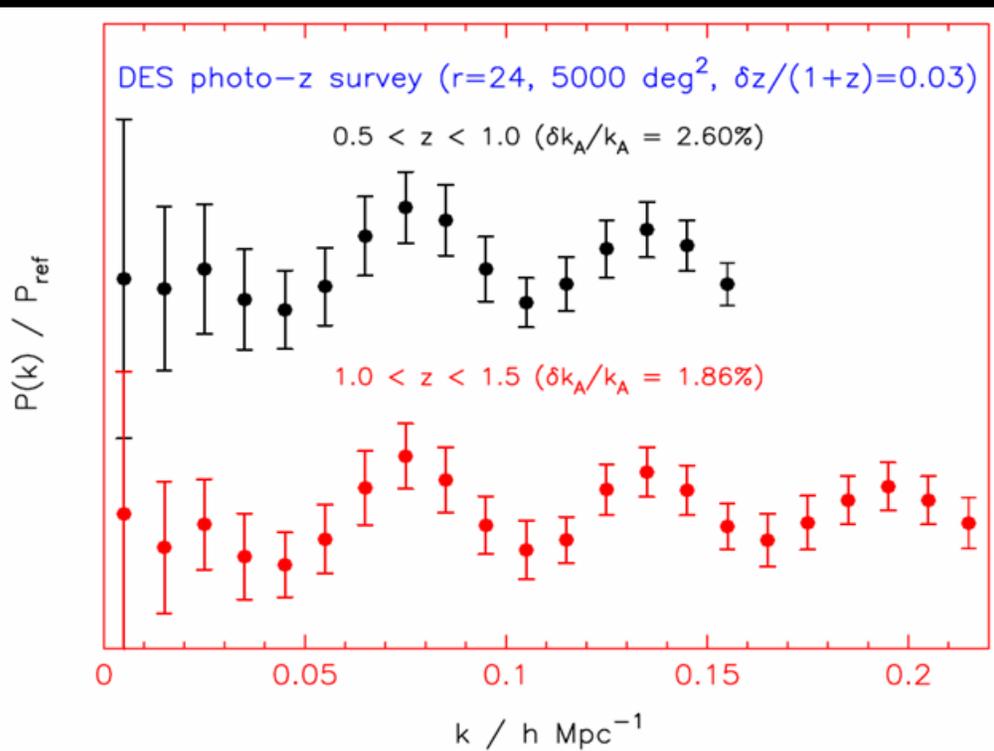
測光サーベイによるダークエネルギー探査

- **DES: Dark Energy Survey**
 - 5000平方度の測光サーベイ@チリ4m
 - 2011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@チリ8.4m
 - 2014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

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



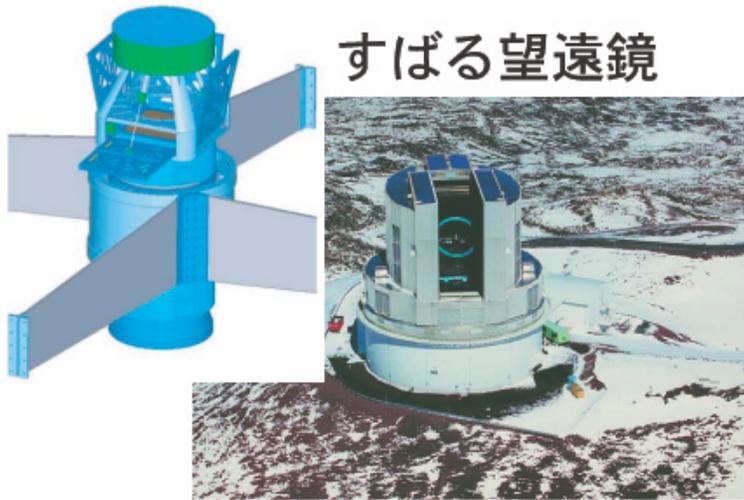
Fosalba & Gaztanaga

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: 寄生虫

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: さらなる1000 deg² サーベイの追加観測



樽家

浜名

千葉

戸谷

有本

松原

唐牛

小宮山

山本

相原

高田

宮崎

2006年11月特定領域国際会議@東大小柴ホール
Cosmology with wide-field photometric and spectroscopic galaxy surveys

WF MOS: すばる+Geminiの分光サーベイ

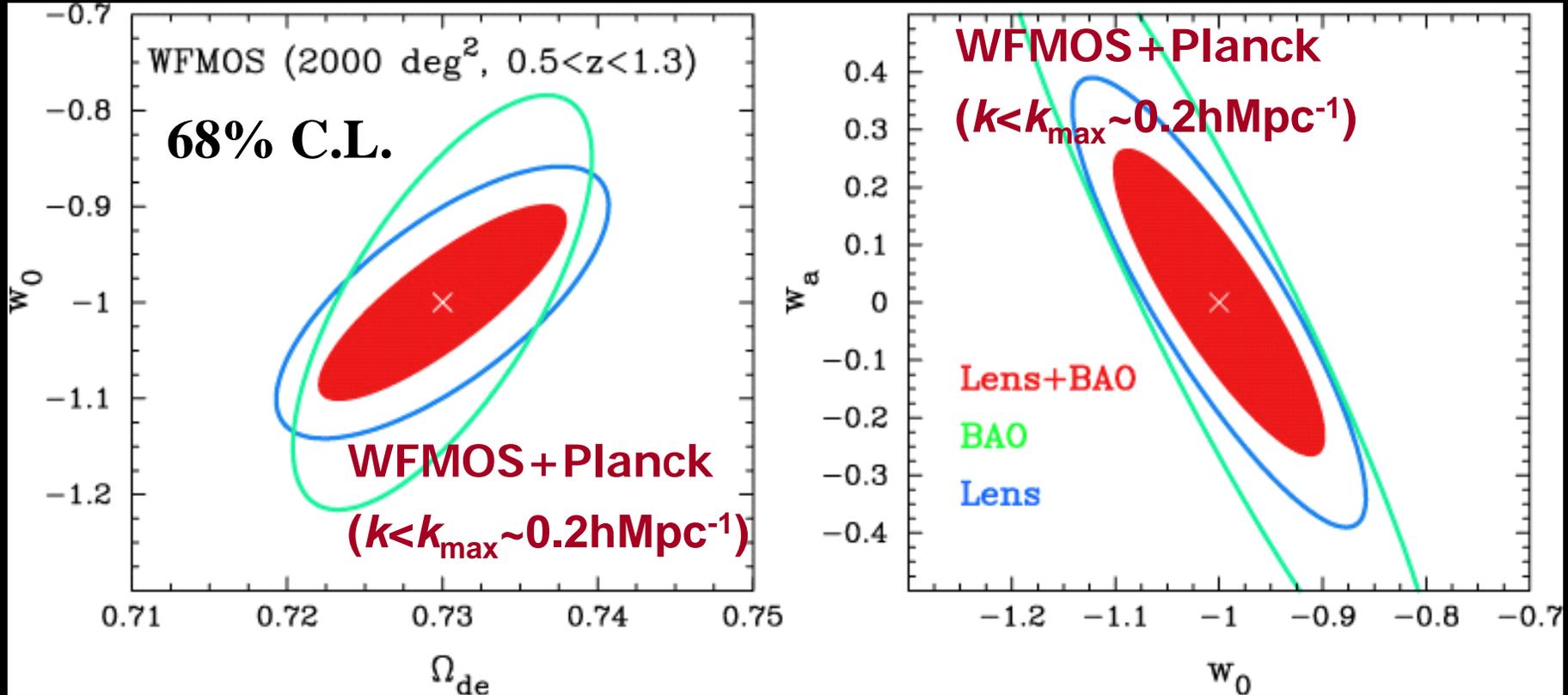
- すばる主焦点に口径 1.5° の広視野カメラ
- 4000天体分光器による赤方偏移サーベイ
 - $0.5 < z < 1.3$: emission line galaxies
 - 2×10^6 個/2000平方度 \Rightarrow 1400ポイントング(900時間)
 - $2.3 < z < 3.3$: Lyman-break galaxies
 - 6×10^5 個/300平方度 \Rightarrow 200ポイントング(800時間)
- 銀河空間分布のバリオン振動スケールを決定し、 $H(z)$, $D_A(z)$ を1%レベルで決定
- w を $\pm 3\%$? , 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

WF MOSの科学的意義・位置づけ

- **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**
 - 現在大規模分光観測サーベイ提案としては唯一
 - 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＝実質的にはSDSSを高赤方偏移にひろげたものとみなせる**
 - 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のために**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

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

(東北大 高田昌広)

ダークエネルギー or 一般相対論の限界？

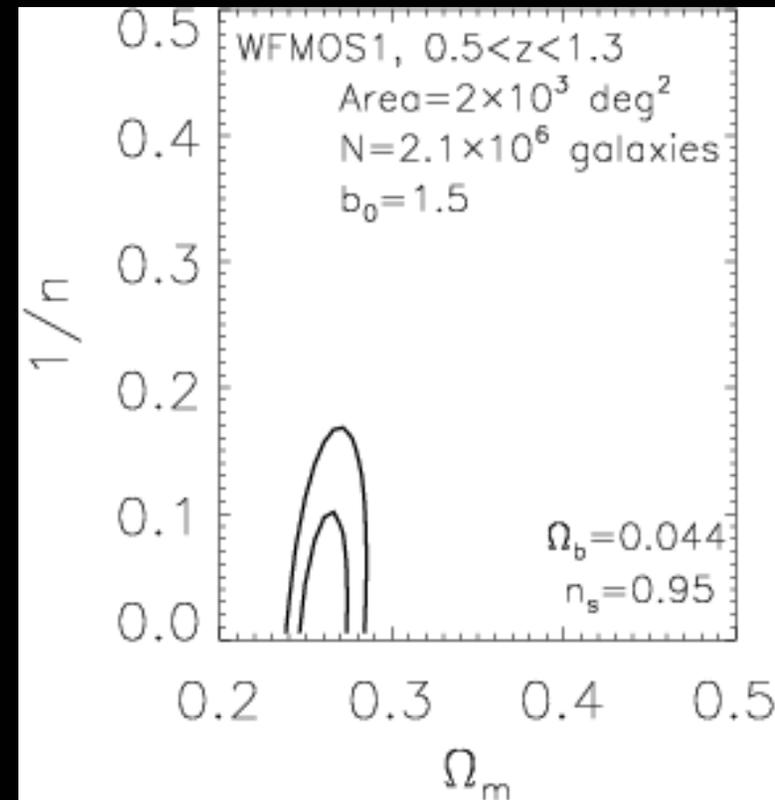
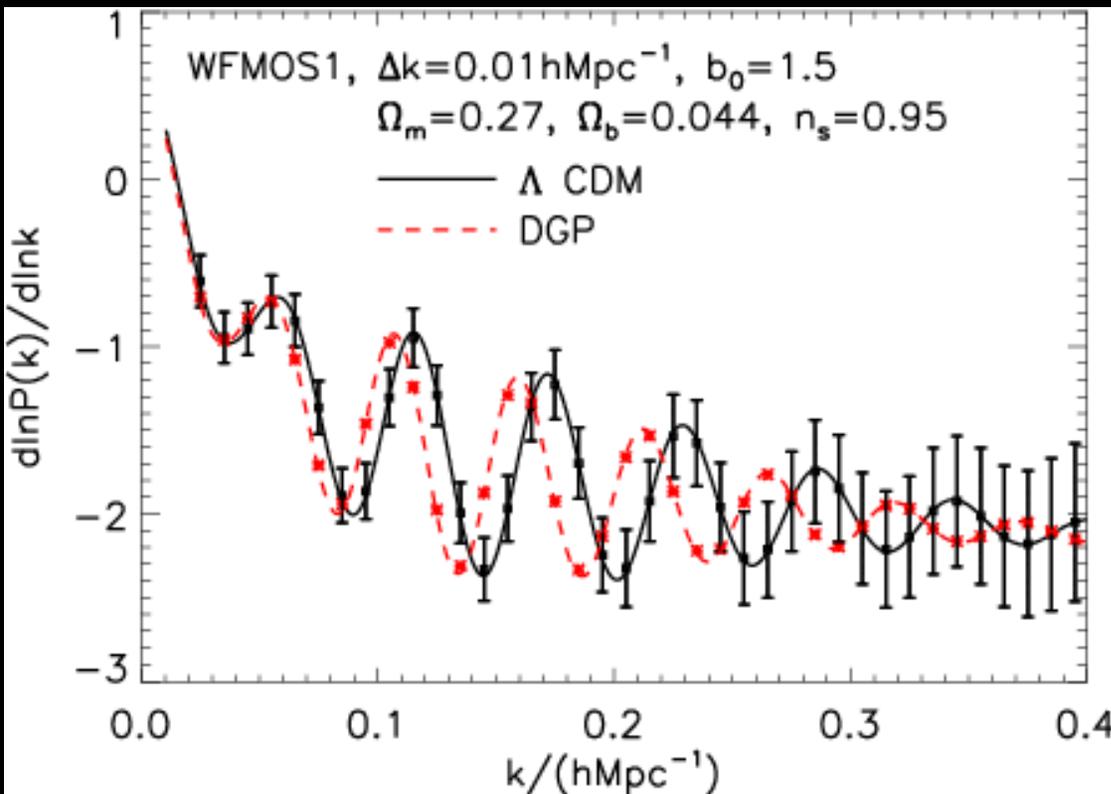
Yamamoto, Bassett, Nichol, Suto & Yahata
PRD 74(2006)063525, astro-ph/0605278

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

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



WF MOSをめぐる政治情勢

- 2002年 KAOS@Gemini広域サーベイ計画
 - 2003年夏 アспенでGeminiの次期装置としてWF MOS提案
 - 2005年3月 WF MOS Feasibility Study: Geminiから ずばるへ
 - 2005年12月 WF MOS概念設計開始
 - 2006年5月 概念設計中止
 - 2006年7月 HSC特定領域研究採択
 - 2006年9月 概念設計中止撤回
 - 2006年10月 英国PPARCで推進採択
- 1853年 黒船来航
 - 1854年 日米和親条約
 - 1858年 日米修好通商条約
 - 1862年 生麦事件
 - 1868年 明治維新
 - 1911年 関税自主権回復



**Gemini Wide-Field Fiber-Fed Optical
Multi-Object Spectrograph (WF MOS)**

WF MOSの問題点・課題

- すでに $w = -0.98 \pm 0.12$ という結果があるのなら、「ダークエネルギー＝宇宙定数」と結論してよいのではないか？
- 予想されている精度が本当に達成できるか？
- 数値がわかったとしても、ダークエネルギーの正体の解明につながるような信頼できる理論が存在するか？
- 結局どこかが別の方法でやるはずだから、あえてすばるでやらなくても良いのでは？
- 日本がサイエンスをリードできるか？
- すばるでの他の観測プロジェクトの遂行に重大な支障が出るのではないか？
- 必要な予算は本当に確保できるか？
- このような大掛かりな計画には多大な労力と資源の注入が必要で、それに対する責任体制は確立しているか？

歴史から学ぶ: SDSSと日本

- プリンストン、シカゴを中心としたアメリカの計画として出発、その後日本への参加要請を受けて正式に共同研究を開始
- 実は日本グループは基礎的かつ重要な貢献をした
 - モザイクカメラの製作(関口)
 - フィルターの製作(嶋作、土居、福来)
 - 標準星の決定と較正(市川、福来)
 - 測光パイプラインの開発(安田)
 - 重カレンズサーベイ(稲田、大栗)
 - KL変換を用いた構造の定量化(松原)
- しかし、SDSS外部からはvisibleでなかったのも事実

SDSS papers have had huge impact

- 1345 refereed papers to date
- These papers have been cited over 39,000 times
- 30 of the 200 most cited papers in astronomy since 2000 used SDSS data.
- Impact in many areas we didn't anticipate:
 - White dwarfs
 - Brown dwarfs
 - Ultra-low metallicity stars
 - Galaxy-galaxy lensing
 - Supernovae
 - Epoch of reionization
 - Etc., etc.

(Dec. 19, 2006@NAOJ, Michael Strauss)

ADS High-Impact Papers 2005

Facility	Number of Citations	Fraction of the Total
WMAP	1892	24.9%
SDSS	848	11.2%
Keck	562	7.4%
ESO	549	7.2%
HST	466	6.1%
Chandra	380	5.0%
Kamiokande	324	4.3%
2MASS	250	3.3%
XMM-Newton	185	2.4%
CBI	149	2.0%

(Dec. 19, 2006@NAOJ, Michael Strauss)

ADS High-Impact Papers 2006

Facility	Number of Citations	Fraction of the Total
SDSS	1843	17.4%
ESO	1365	12.9%
HST	1124	10.6%
WMAP	1121	10.6%
Keck	642	6.0%
Kamiokande	372	3.5%
Chandra	365	3.4%
ACBAR	207	2.0%
NOAO (KPNO/CTIO)	202	1.9%
Las Campanas	176	1.7%

(Dec. 19, 2006@NAOJ, Michael Strauss)

SDSSの教訓

- 日本人はおとなしい・礼儀正しい
 - アメリカ主導で始まった計画をのっとるようなことはできない
 - 結局あくまで一協力者的な立場に終始してしまった
- 人間関係が重要
 - プリンストングループとは太いパイプを持っていたが、それ以外の機関とは信頼関係を築いていなかった
 - 複数の機関間での調整は困難(地理、時差、言語)
- オールジャパン体制で対抗すべき
 - 人的資源を考えると、日本グループは研究テーマを絞りこんで、集中的な研究投資をすべきだった
 - 種々の理由で各メンバーがばらばらに研究をした
 - もっと広く国内で共同研究を推進すべきであった

HSC/WFMOSに生かすべきこと

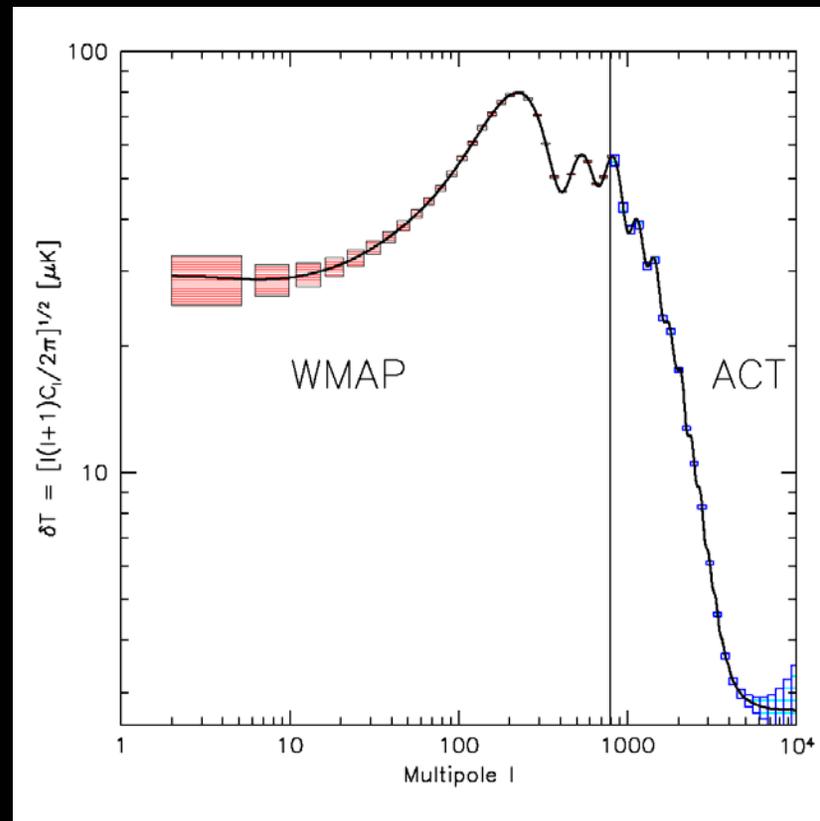
- **あくまで日本主導の計画であること**
 - HSCはOK
 - WFMOSについては、今後そのような方向への誘導が不可欠。少なくとも完全に対等なパートナーとしての提案であるべき。
 - 場合によっては、Geminiとではなく、別の枠組みでの国際共同計画を日本から提案する
 - サイエンスの結果を出す段階で、日本が十分貢献できること。少なくとも論文の半分はPASJに出版することが目標。
- **実際にデータを用いてサイエンスを行う興味をもつ国内研究者の参加を奨励すること**
 - オールジャパン体制を確立することで、日本のvisibilityを最適化
 - これを通じて、汎用望遠鏡であるすばるから、サーベイモードに多くの夜数を割り当ててもらふことが正当化される

最近の動向

- プリンストン大学が、すばるとの共同研究の締結を真剣に検討中
 - HiCiao (PI:田村元秀)
 - HSC (PI:唐牛宏、宮崎聡)
 - 2体問題、過去の信頼関係からいっても理想的
 - 一年以上滞在：池内、福来、須藤、梅村、関口、土居、嶋作、安田、杉之原、小松、戸谷、住、大栗
- もっと非公式なレベルでは他に3つの研究機関から打診がある
 - すばるの実績が認められている証拠に他ならず、日本として誇るべき事実
 - 今後の8m望遠鏡の国際的共有・有効利用の先鞭をきるという意味においても画期的

ACT: The Next Step After WMAP

- Atacama Cosmology Telescope
- Funded by NSF
- CMB fluctuations on small angular scales
- Probe the primordial power spectrum and the growth of structure



(Dec. 19, 2006@NAOJ, David Spergel)

ACT COLLABORATIONS

Government Labs

Schools

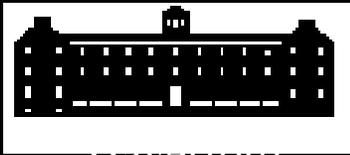
Museums



PENN



Católica



Haverford



Drexel
UNIVERSITY



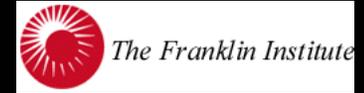
Princeton



CUNY



Kwa-Zulu Natal

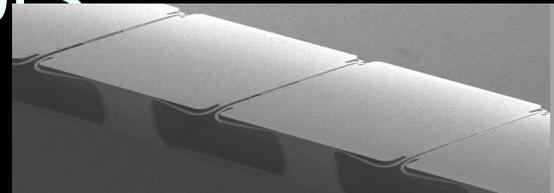


Toronto



(Dec. 19, 2006@NAOJ, David Spergel)

The Millimeter Bolometric Array Camera: 3000 Detectors



Tricolor:

145, 225, & 265 GHz

3 independent 32x32 arrays

TES PUDs from GSFC

- PUDs = Pop-Up Devices
- TES = Transition Edge Sensor
Each pixel: 1 mm x 1 mm

TDM Multiplexing

- 2-stage 1x33 **mux** chips, followed by Series Array SQUIDs: SAs -- from NIST
- Nyquist inductors -- from NIST
- Mux servo electronics & DAQ from UBC (who provided these for SCUBA)

(Dec. 19, 2006@NAOJ, David Spergel)

ACT Operational Plans

- Single Frequency survey in 2007
- Multifrequency survey in 2008/2009
- Plans to survey 1000 square degrees in equatorial strip
- Data will be made publically available
- Polarization Survey as Possible Follow-up

(Dec. 19, 2006@NAOJ, David Spergel)

Combining Optical & CMB

■ Cosmology

■ SZ/galaxy cross-correlations

- Where are the baryons?

■ Optical Lensing/SZ/CMB Lensing Correlations

- Powerful probe of growth rate of structure
- Dark Energy/Neutrino Mass

■ Galaxy Evolution

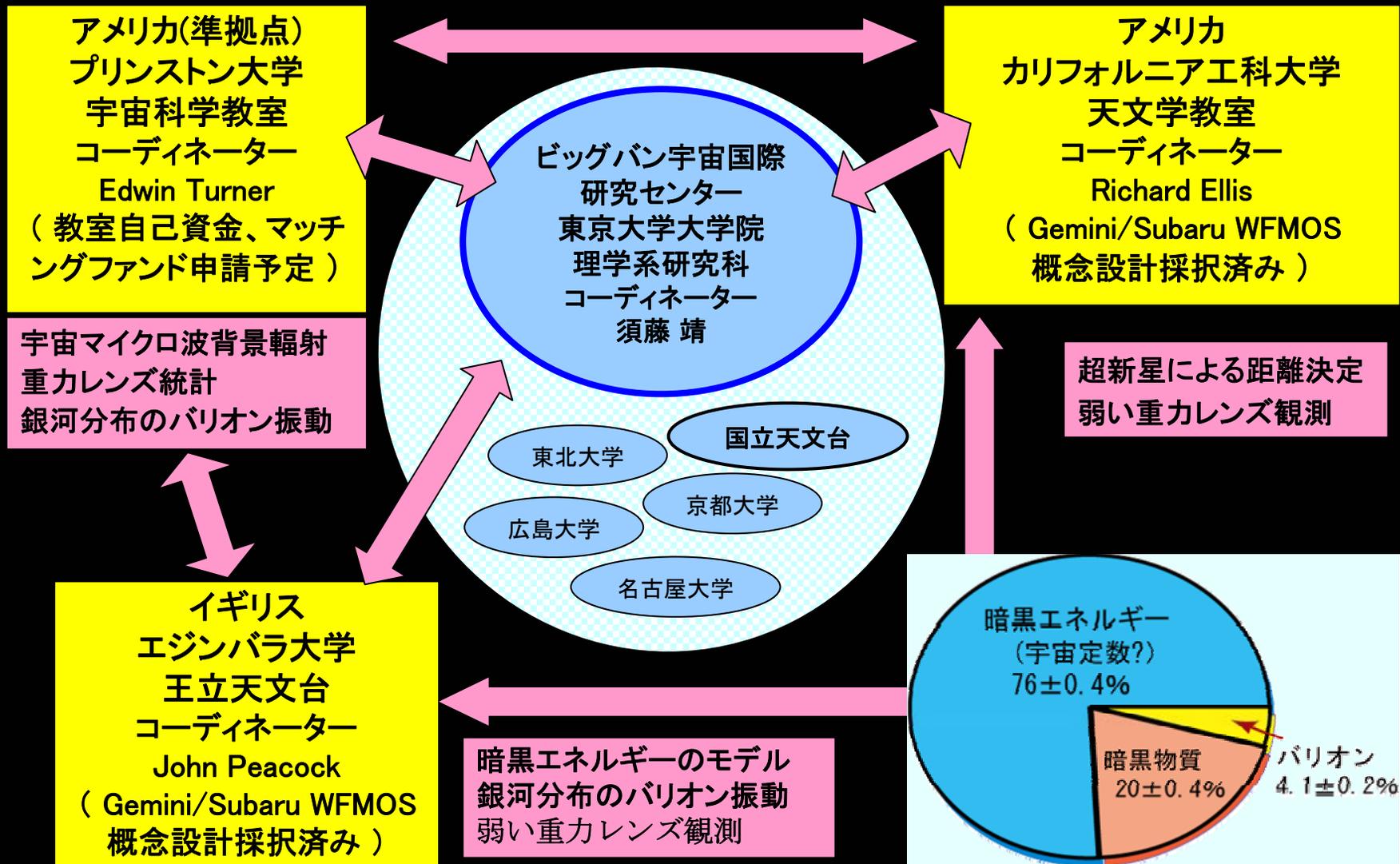
- Group and cluster properties

■ Submillimeter Galaxies

- ALMA follow-up

(Dec. 19, 2006@NAOJ, David Spergel)

暗黒エネルギー研究国際ネットワーク (先端拠点形成プログラム申請中)



まとめ

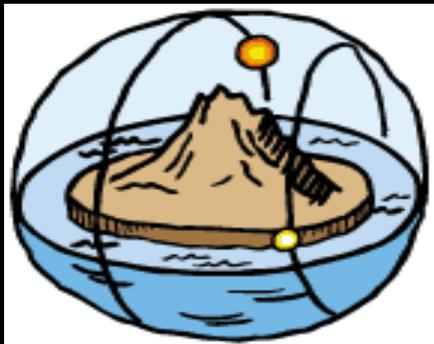
- 興味のある人は誰でもどんどん参加してほしい
- ダークエネルギーという名前ではあるが、バリオン振動、重力レンズ、CMB、超新星、SZ、銀河進化など、宇宙論の広い領域をカバーする研究を展開する土台としたい
- 2007年3月ごろに国内でダークエネルギー研究会を計画中
- 先端拠点形成プログラムが採択されると、毎年、日本とアメリカでそれぞれ1回ずつ研究会を開催

宇宙観は本当に進歩したか？

古代エジプト



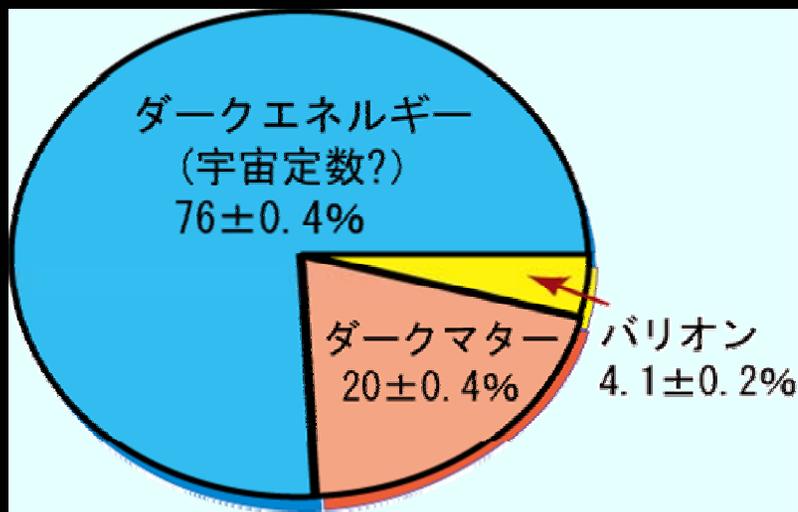
古代中国



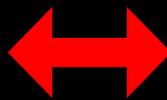
古代インド



2006年

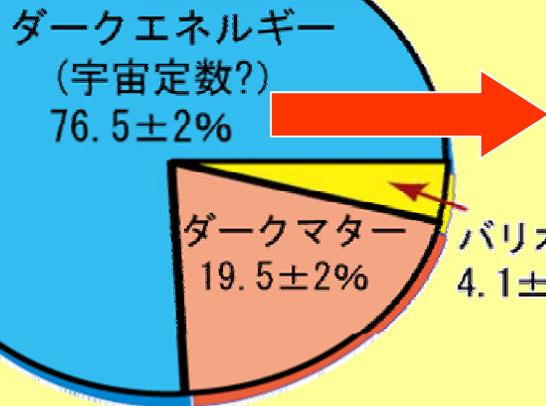


進歩？



「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

~~宇宙の組成比~~
研究費の配分比



「20XX年の教養物理の教科書」

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、(左巻き)トモノリーノ

第二世代 タカダン、(左巻き)マサヒローノ

第三世代 ヨシダン、(左巻き)ナオキーノ

これらは美しい対称性を欠くものの、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)

