

# Probing the Dark Side of the Universe

国立天文台  
理論研究部  
杉山直

# 宇宙論の現状

- 宇宙論パラメーターがほぼ決定された
  - 宇宙マイクロ波背景放射の観測
    - COBE
    - 気球・地上観測
    - WMAP
  - 超新星探査
    - 2つのグループ: 専用望遠鏡を用いた成果
    - 最近では大望遠鏡で高赤方偏移のものを探している
  - 重水素の存在量の確定: 元素合成
    - Keck望遠鏡
  - 重力レンズ効果: Strong Lensing, Shear Field
    - 広視野カメラ



# 天文学・宇宙論の現状(続き)

## ■ 宇宙の地図作り

- 比較的近傍での赤方偏移決定
- 物質分布のパワースペクトル決定(特にバリオン振動)

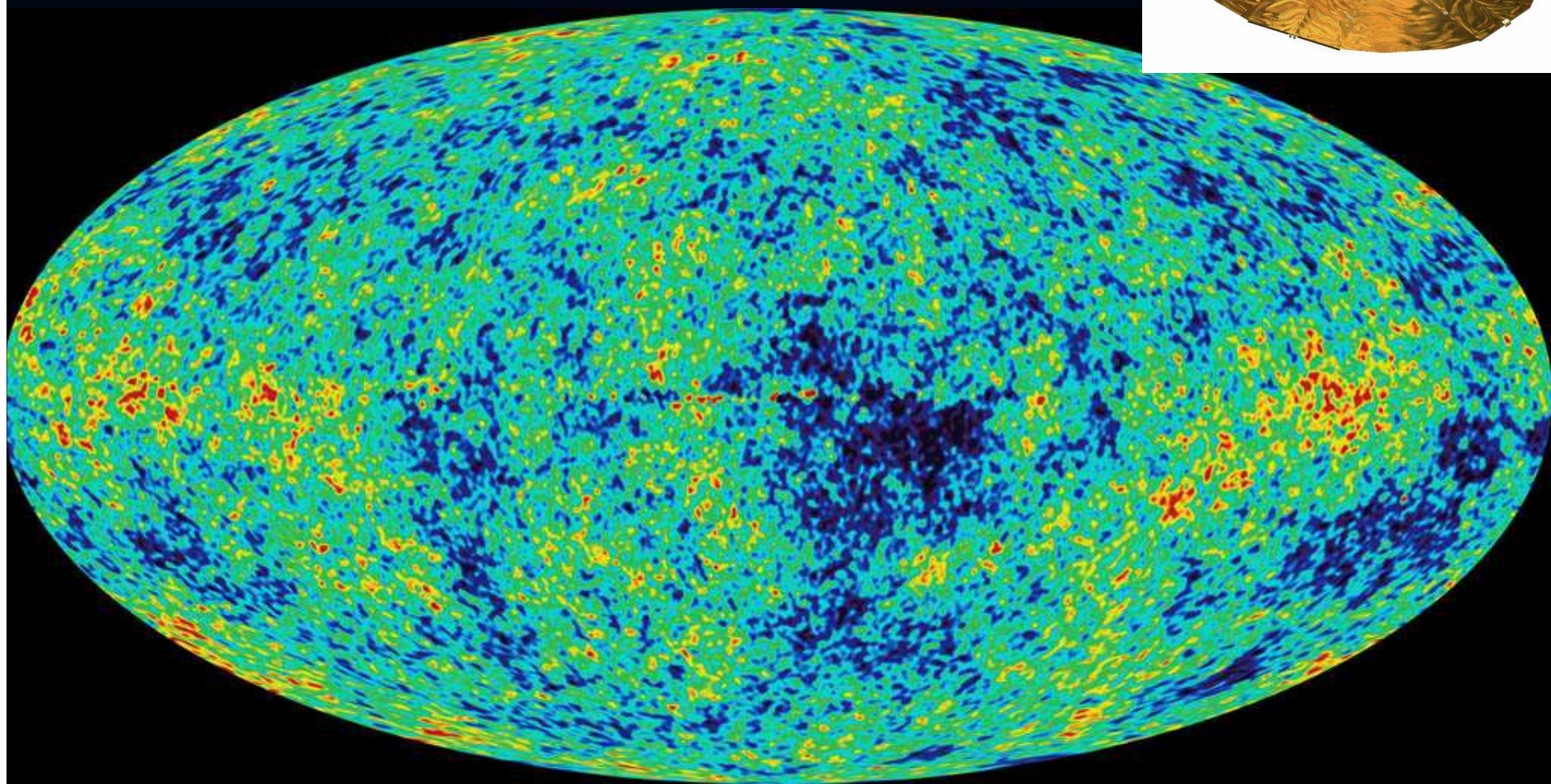
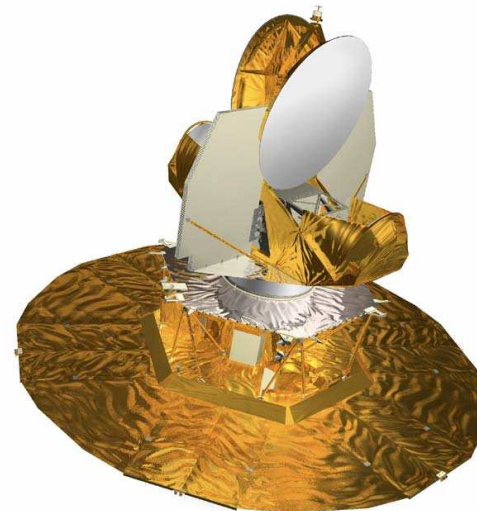
## ■ 最遠方天体探査

- WMAPは $z \sim 20$ での再加熱を示唆
- 銀河: 巨大望遠鏡によるLy-alpha emitter探査
- QSO: SDSSによる探査

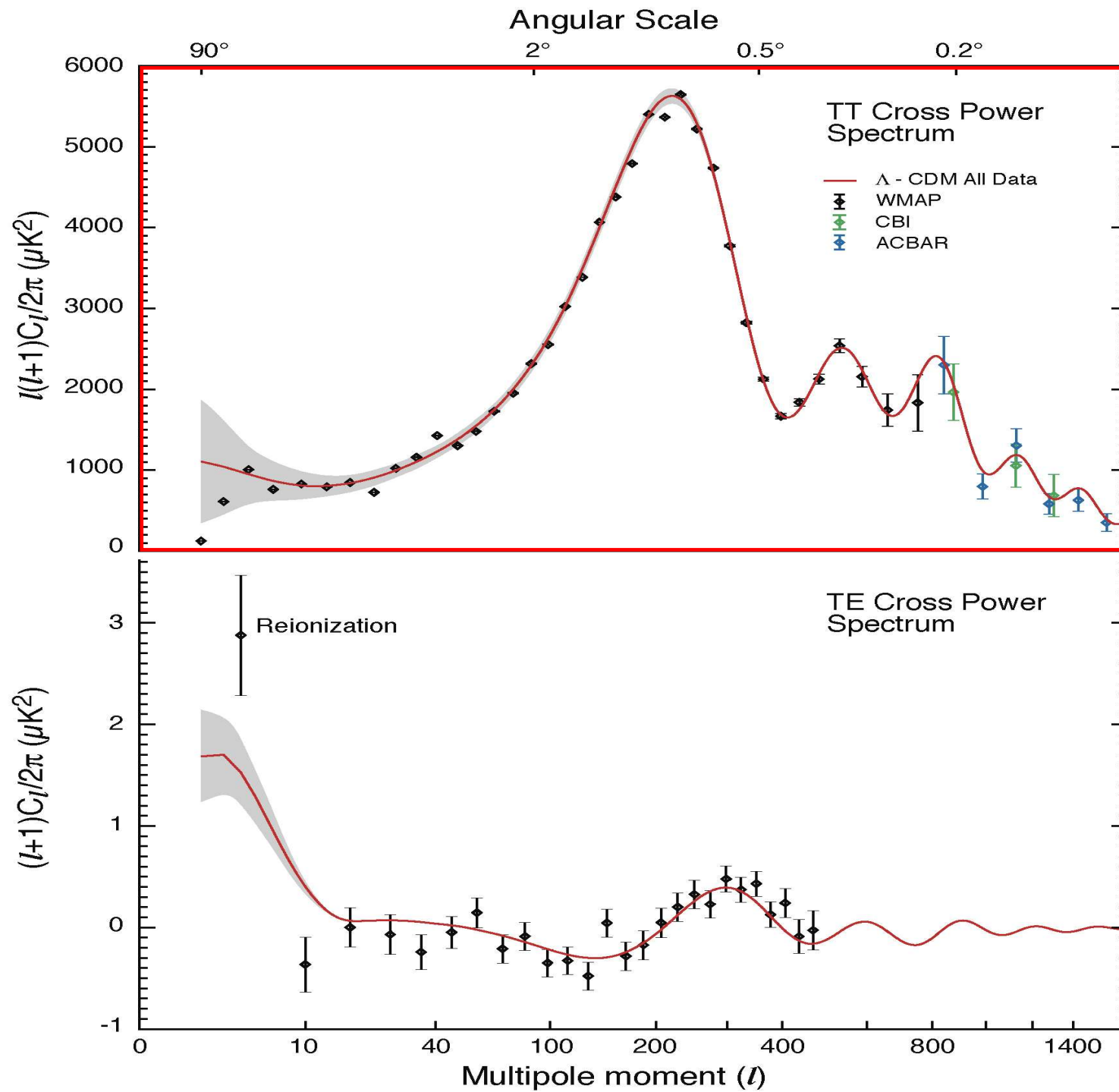
## ■ 構造形成の時間進化

- 赤方偏移 $z \sim 5$ での大規模構造(銀河団の種)の発見
- $z=6.4$ のGRBの発見

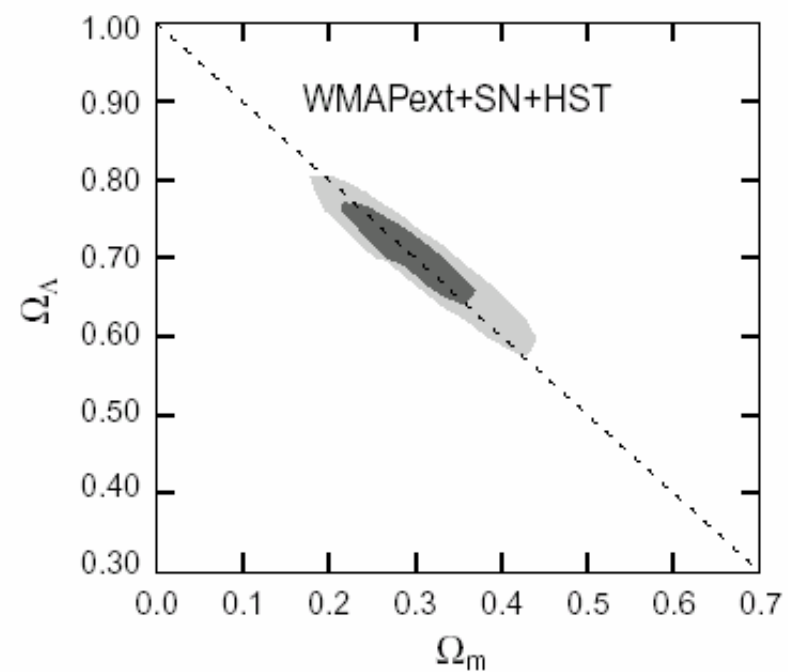
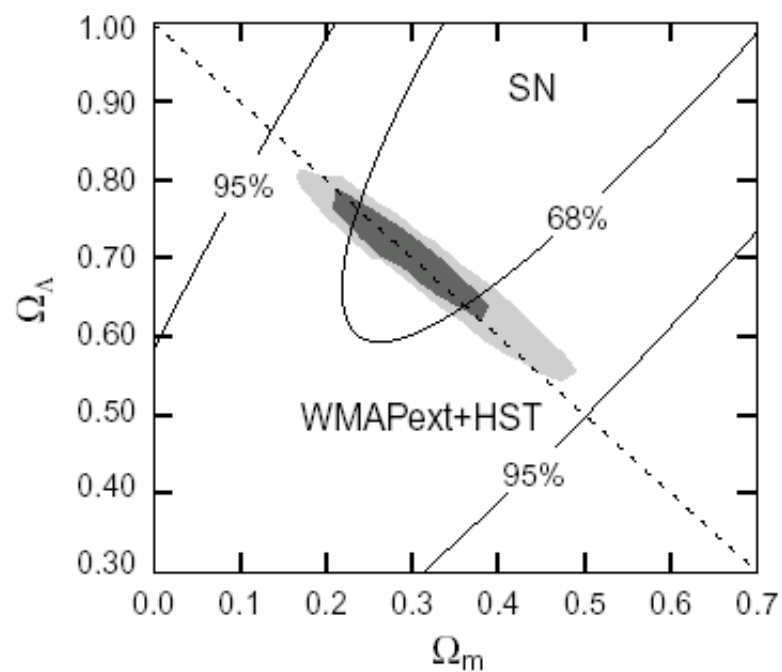
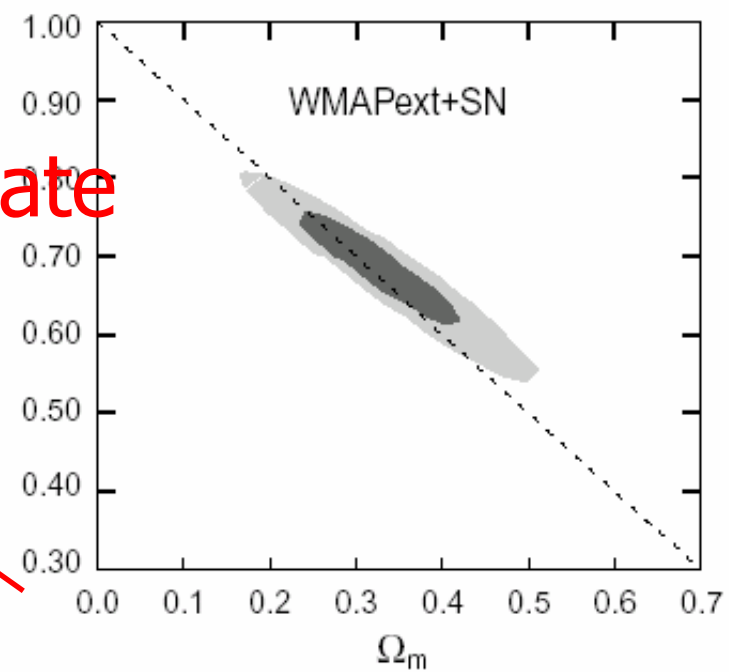
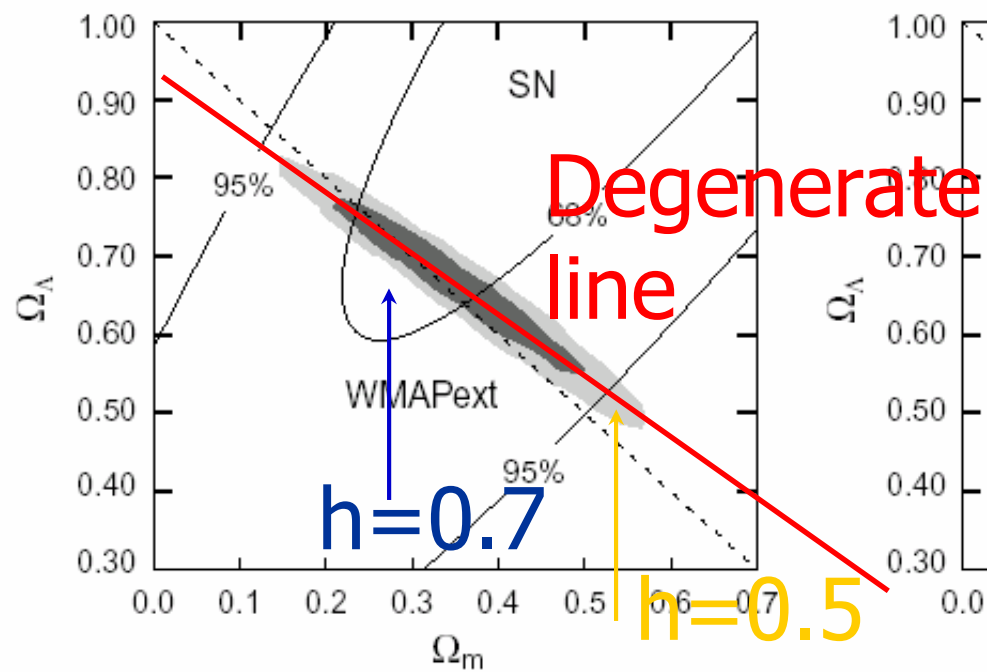
WMAP



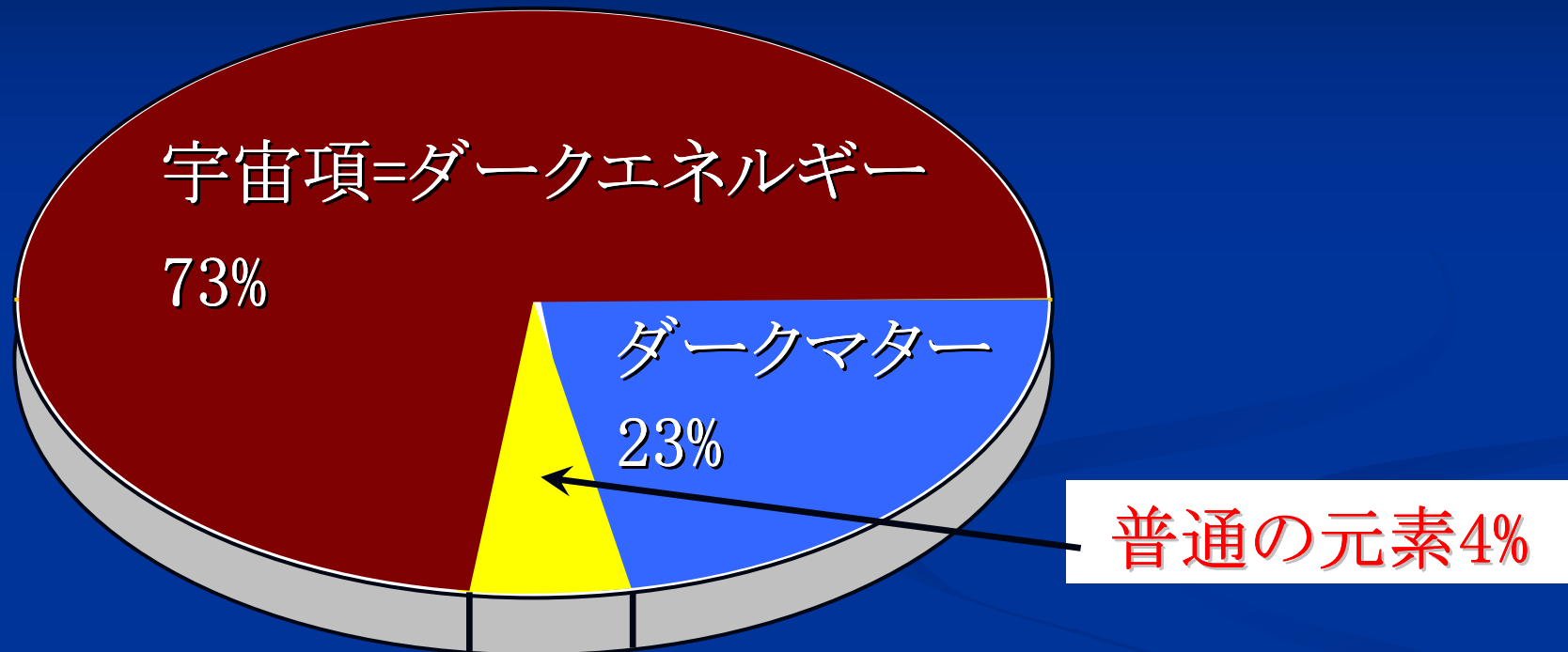




**Obs. of  
WMAP**



# 明らかになった宇宙の姿



ダークエネルギー、ダークマターに支配  
される宇宙



2dF銀河探索チーム提供  
2dF Galaxy Redshift Survey

16 August 2001

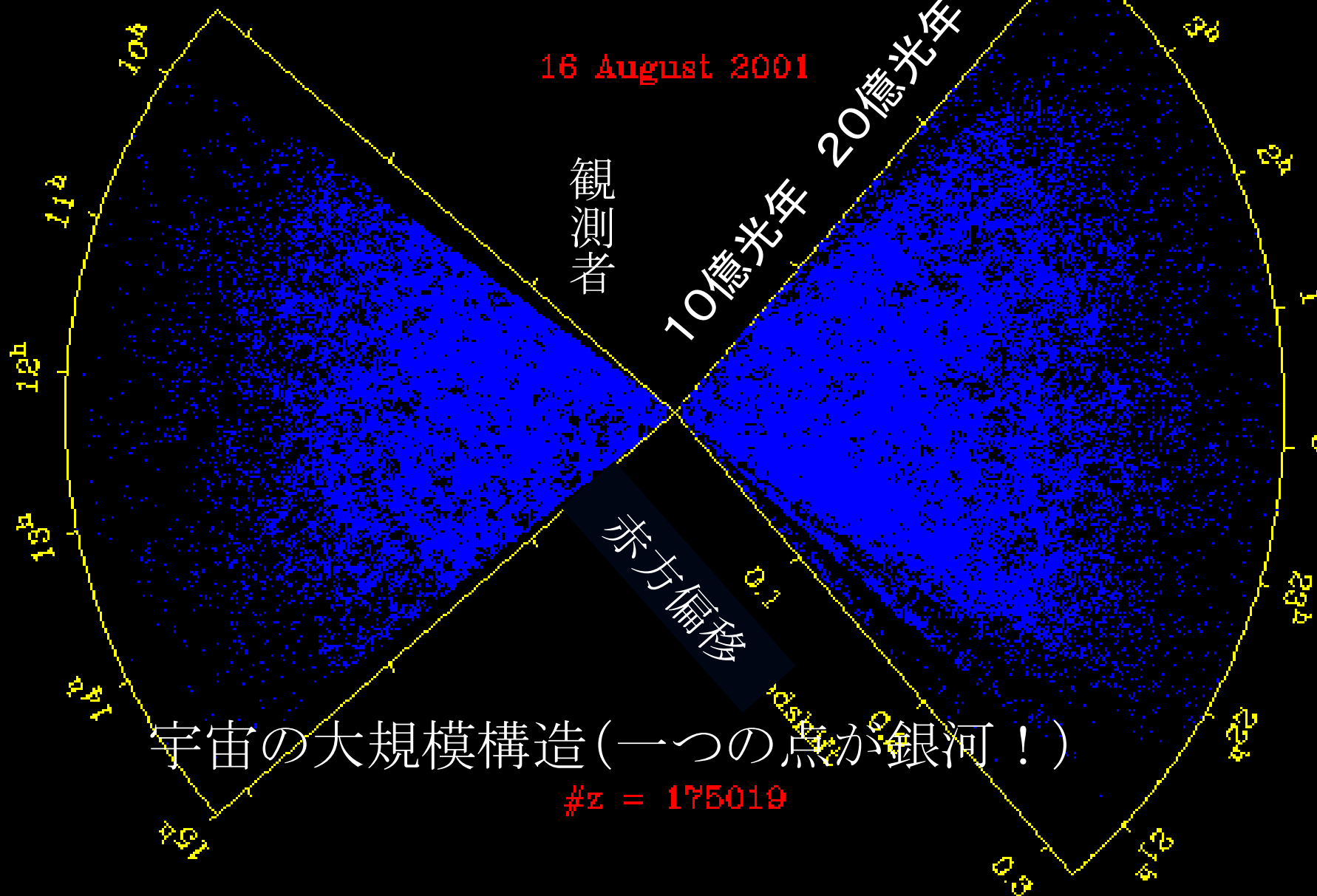
観測者

10億光年 20億光年 30億光年

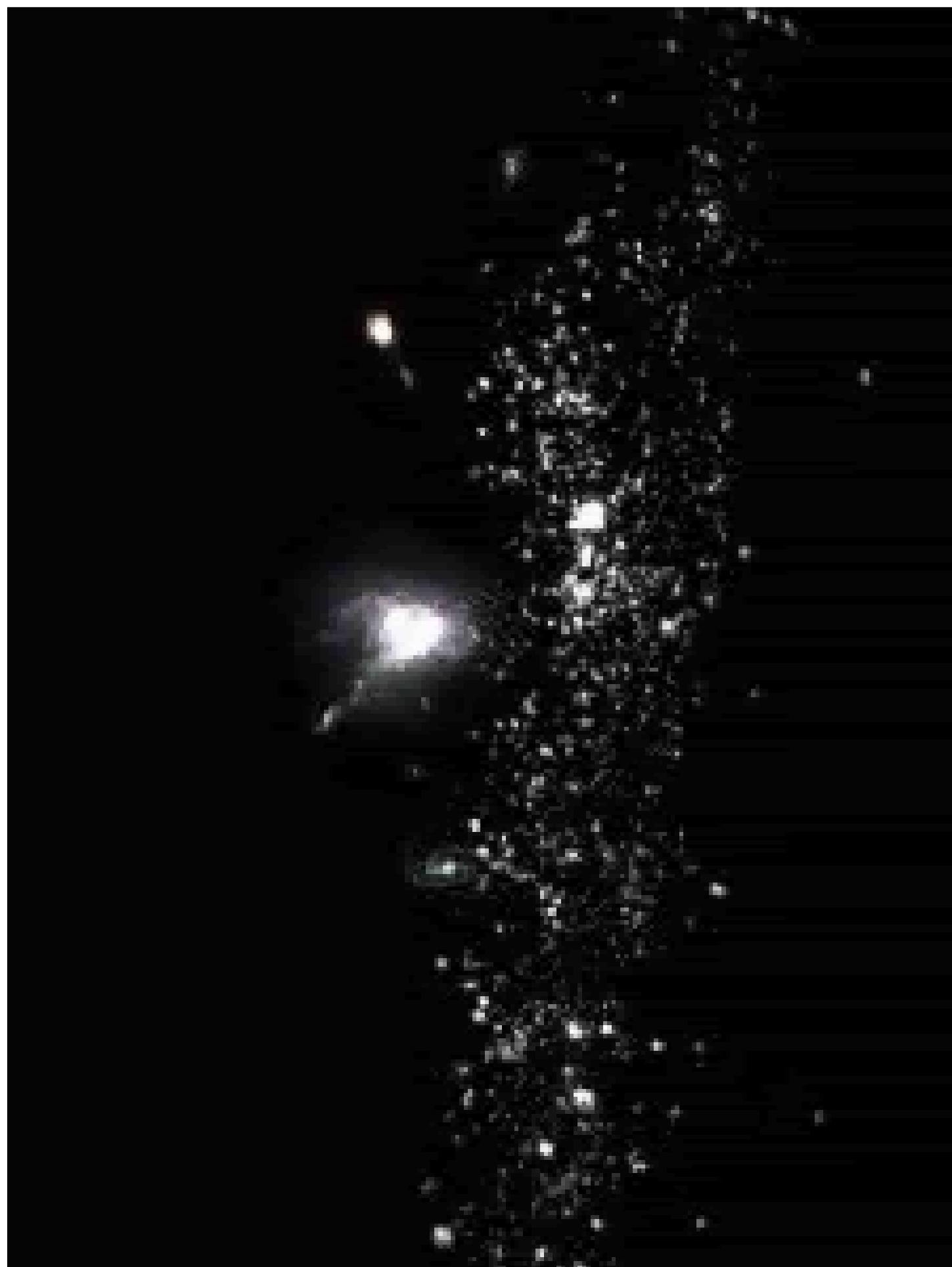
赤方偏移

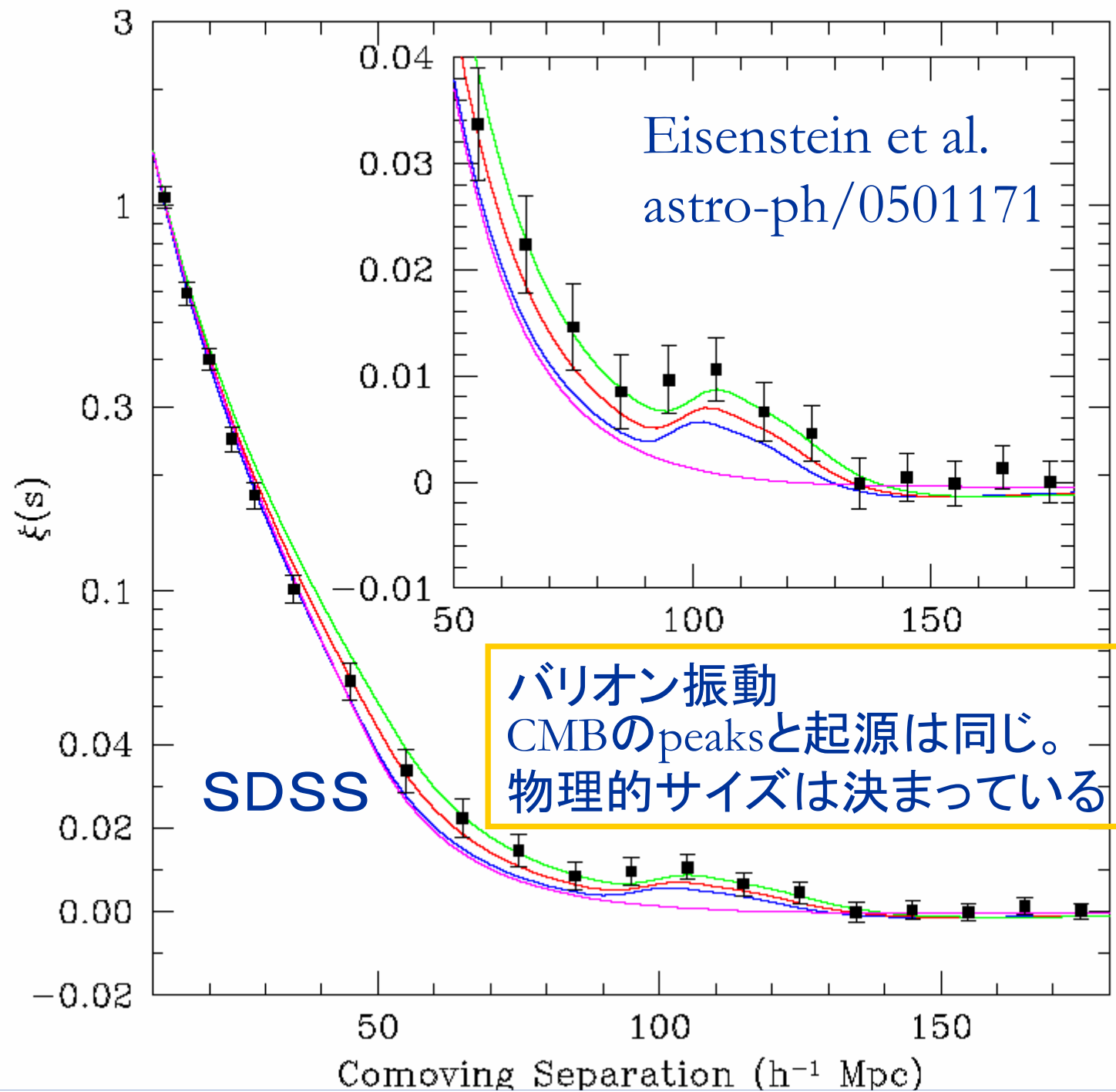
宇宙の大規模構造(一つの点が銀河！)

#z = 175019

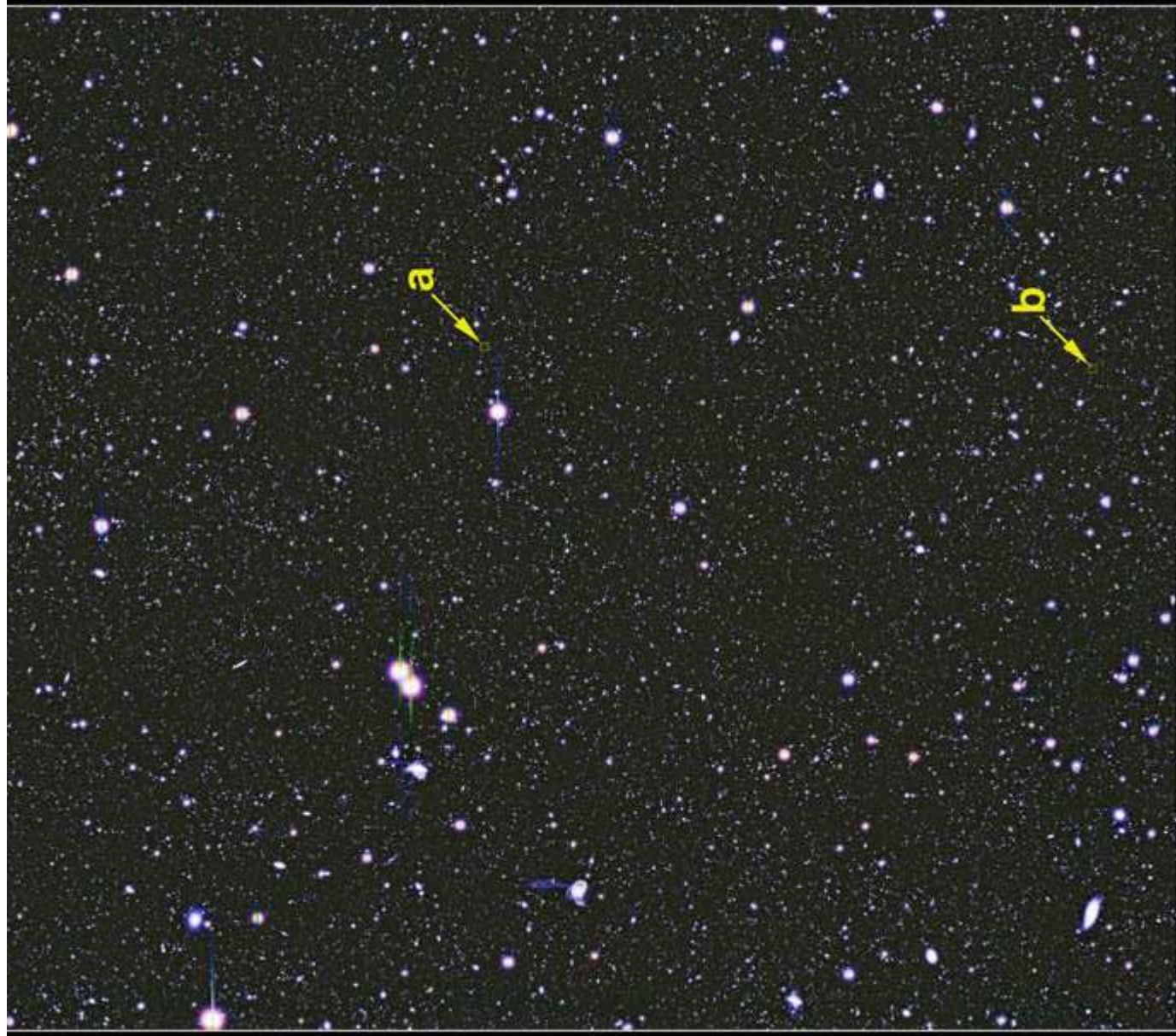






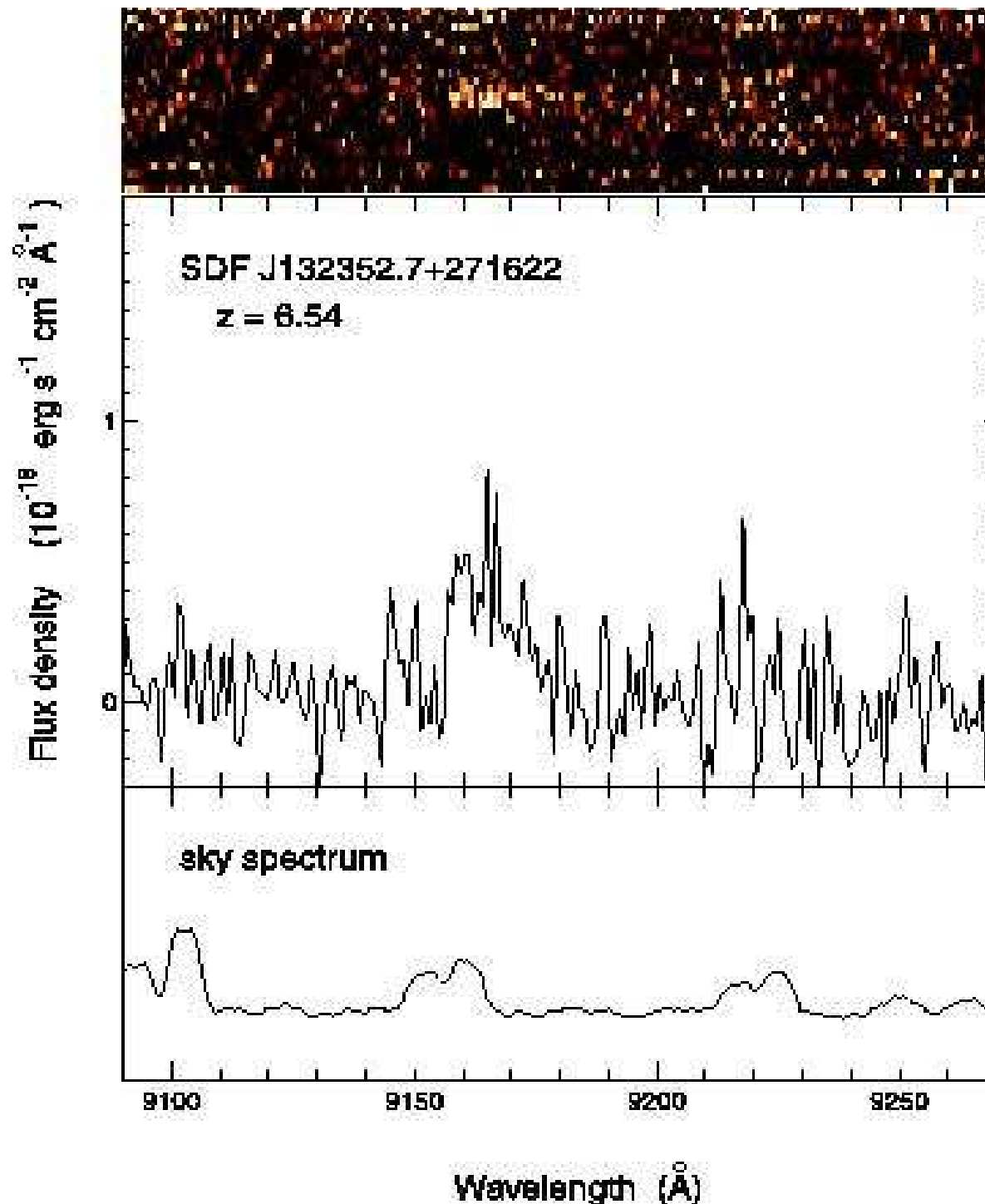


# もはるの発見した最遠方の銀河



Subaru Deep Field: The Most Distant Galaxy Known



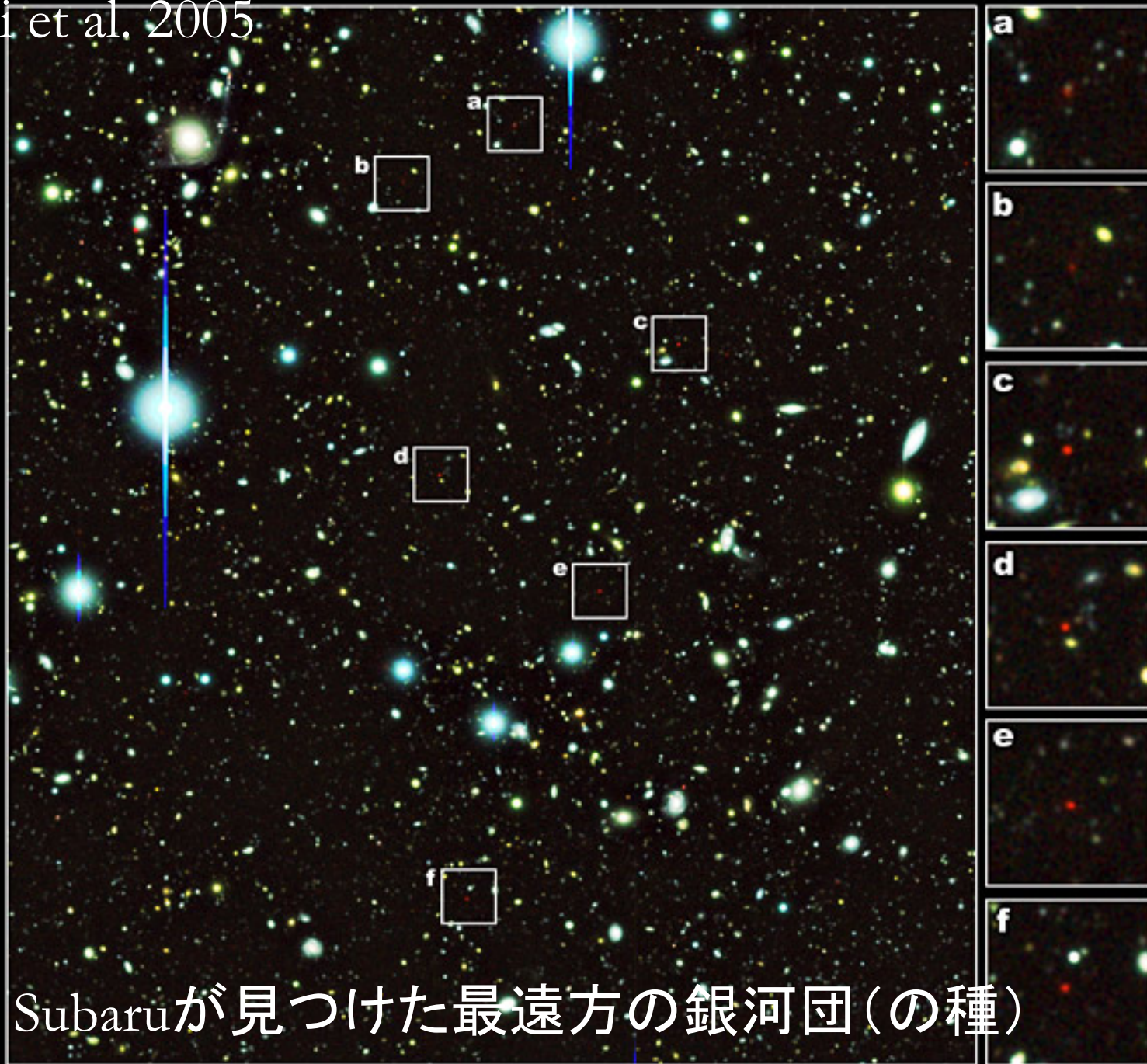


すばるで見つけた  
 $z \sim 6.6$ でのLy-  
alpha emitter 9  
個のうちの一つ

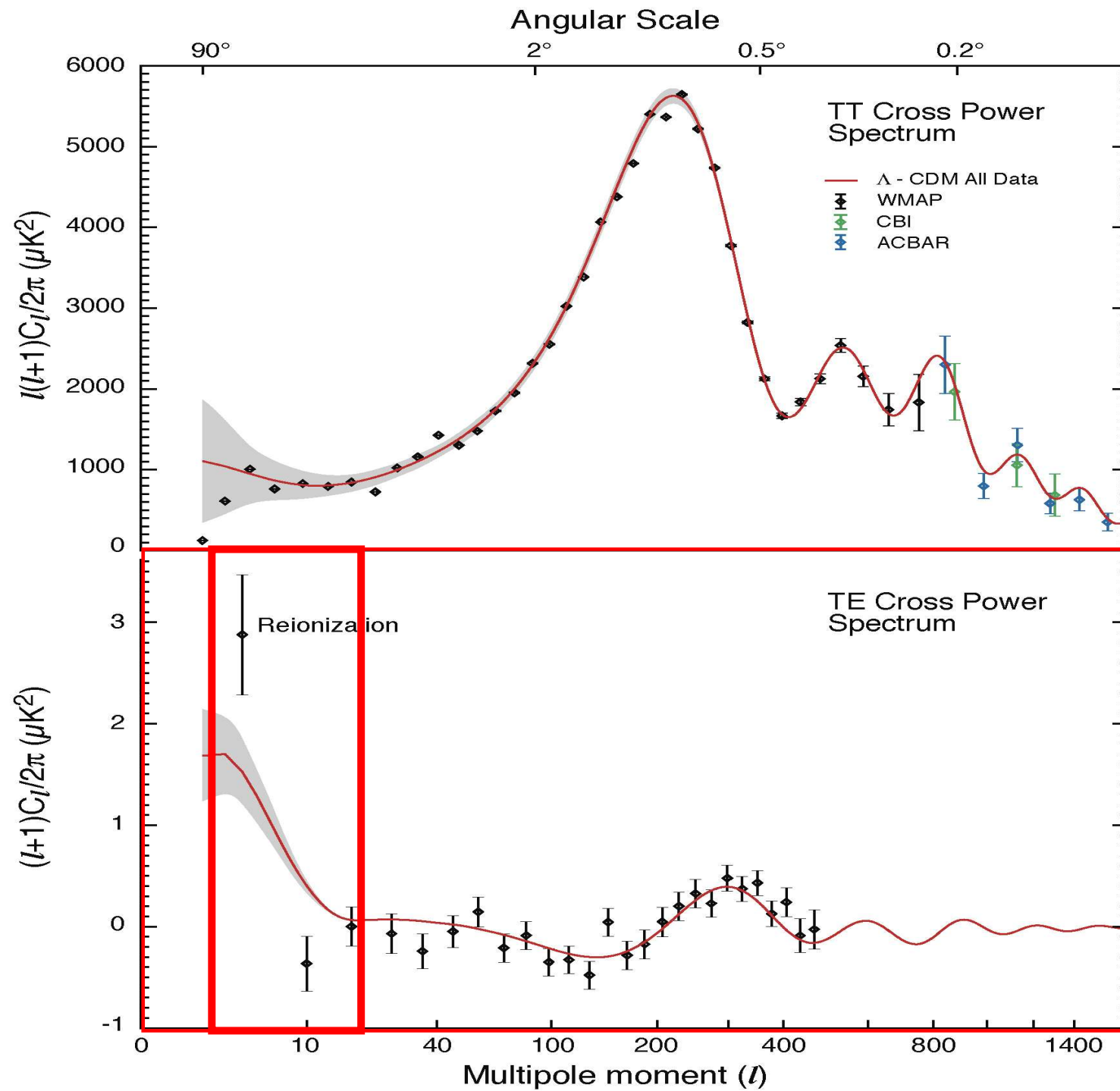
Taniguchi et al.  
Publ. Astron. Soc.  
Japan 57, 165-182,  
2005



Ouchi et al. 2005



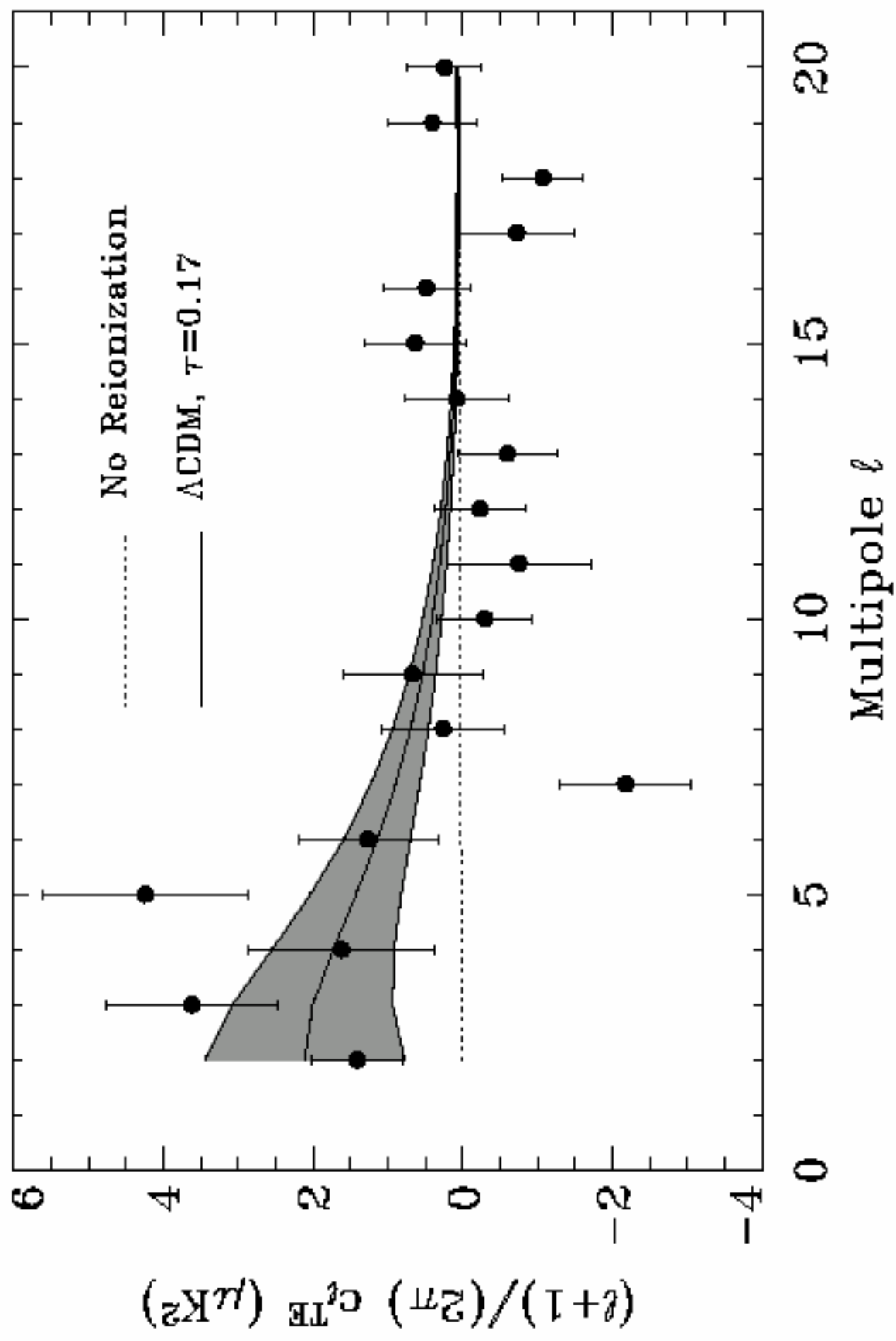
Subaruが見つけた最遠方の銀河団(の種)



Obs. of  
WMAP

Temp-Pol





# First Star Formation Epoch was $z=20$

Detect Reionization from polarization

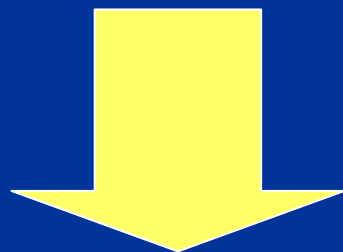
$$\tau = 0.166^{+0.076}_{-0.071} (\text{WMAP}) \quad \text{Optical Depth from present epoch}$$
$$= 0.17 \pm 0.04 (\text{all})$$

$$z_{\text{reio}} = 20^{+10}_{-9} (95\%CL), 17 \pm 5 (\text{instant reio})$$

$$t_{\text{rio}} = 180^{+220}_{-80} (95\%)$$

# サーベイ

広く OR 深く



広く AND 深く

# 今後の宇宙論の3大テーマ

- Dark Energy
- Dark Matter
- Dark Ages: 最初为天体が形成される頃

Dark Side of the Universeを明らかにする

## ■ Dark Energy

### ■ 何が知りたいか

時間進化を調べ、「宇宙項」なのかどうかを決着つけ、  
状態方程式を決定する

$p = w c^2 \rho$  :  $w$ を決める → 宇宙の膨張は  $\rho \propto a^{-3(1+w)}$

### ■ どのように解明するか

宇宙の膨張速度を赤方偏移の関数として決定できれば、  
ダークエネルギーの状態方程式が決められる  
超新星探査、重力レンズ、密度揺らぎのパワースペクトルのバリオン振動、さらにCMBも組み合わせる

**広い視野、かつ比較的高赤方偏移 ( $z \sim 1$  to  $2$ )  
での光赤外観測、特にimaging**

■ 8mクラスの広視野地上専用望遠鏡: SDSS+すばる

■ 2mクラスの広視野スペース専用望遠鏡: スペースSDSS

# 宇宙項とダークエネルギー

宇宙項:  $p = -\rho c^2$  :  $p$  圧力、 $\rho$  密度、 $c$  光速

ダークエネルギー:  $p = w\rho c^2$

斥力として宇宙を加速させる条件  $w < -1/3$

ダークエネルギーは宇宙項( $w = -1$ )の一般化

■  $w$  は時間変化もあり得る





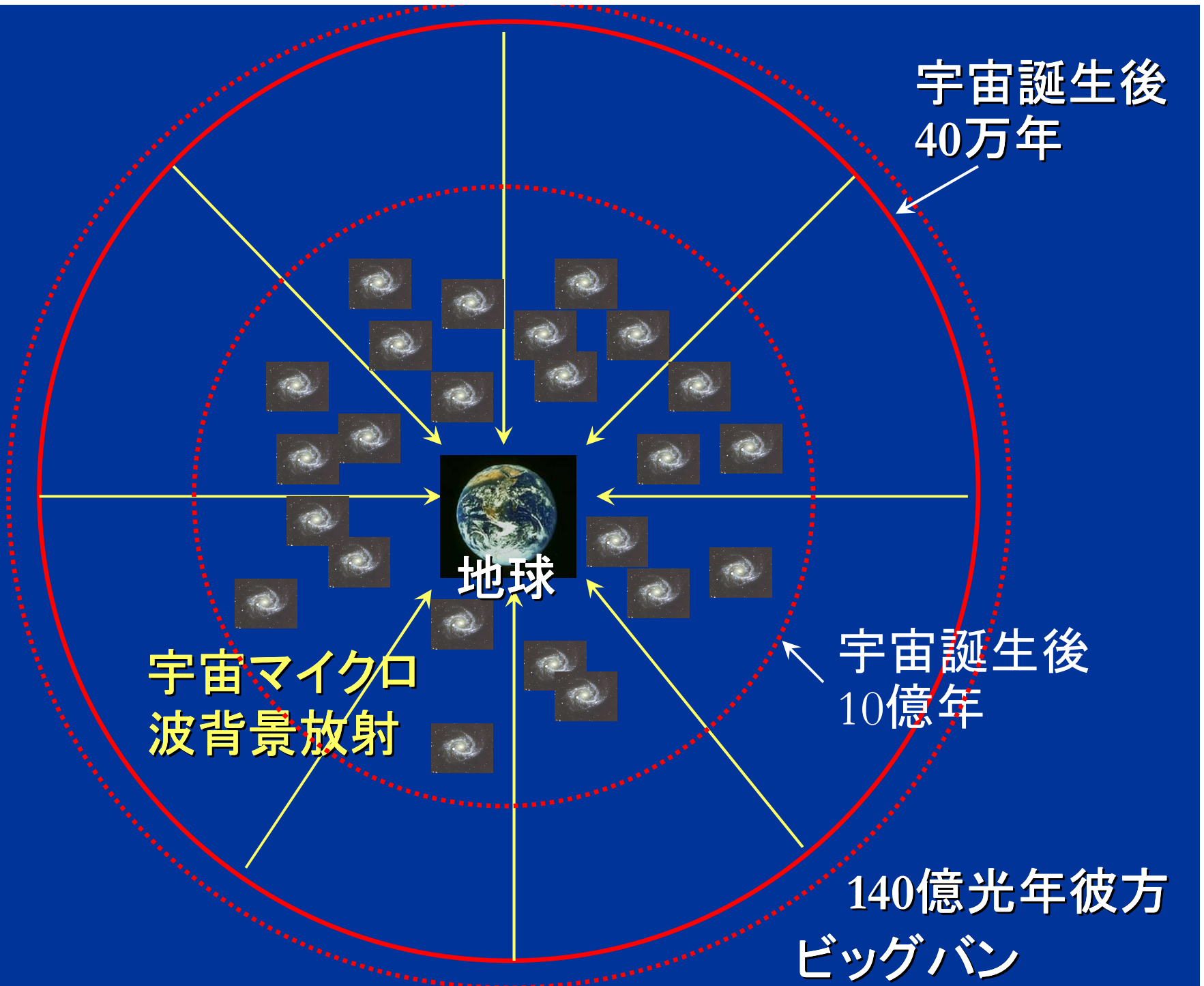
宇宙誕生後  
40万年

宇宙誕生後  
10億年

140億光年彼方  
ビッグバン

地球

宇宙マイクロ  
波背景放射



## ■ Dark Matter

### ■ 何が知りたいか

光ではなく、質量の分布を決定する

### ■ どのように解明するか

重力レンズ効果を用いて、ダークハローの質量を直接測定する

銀河などの中心に存在するcuspからのガンマ線を測定する

■ 広い視野、かつ比較的高赤方偏移( $z \sim 1$  to  $2$ )での光赤外観測、特にimaging

■ ガンマ線での観測

■ 8mクラスの広視野地上専用望遠鏡::SDSS+すばる

■ TeVチェレンコフ望遠鏡

## ■ Dark Ages

### ■ 何が知りたいか

最初の天体はいつどのように誕生したのか  
どのように現在の構造に成長していったのか

### ■ どのように解明するか

最初期の天体からの光を直接捉える  
銀河間ガスのイオン化の状態を調べる

### ■ ガンマ線バースト

### ■ マイクロ波背景放射揺らぎ

### ■ 21cm線によるbrightness Temp.の揺らぎ

### ■ CMBの衛星

### ■ 21cmのための大規模干渉計

## ■ 物理定数の時間進化

### ■ 何が知りたいか

重力定数や微細構造定数が果たして過去でも同じ値であったのか

### ■ どのように解明するか

$z \sim 3$ 程度のQSOの吸収線(10億年)、CMB温度ゆらぎ(40万年)、ビッグバン元素合成(3分)

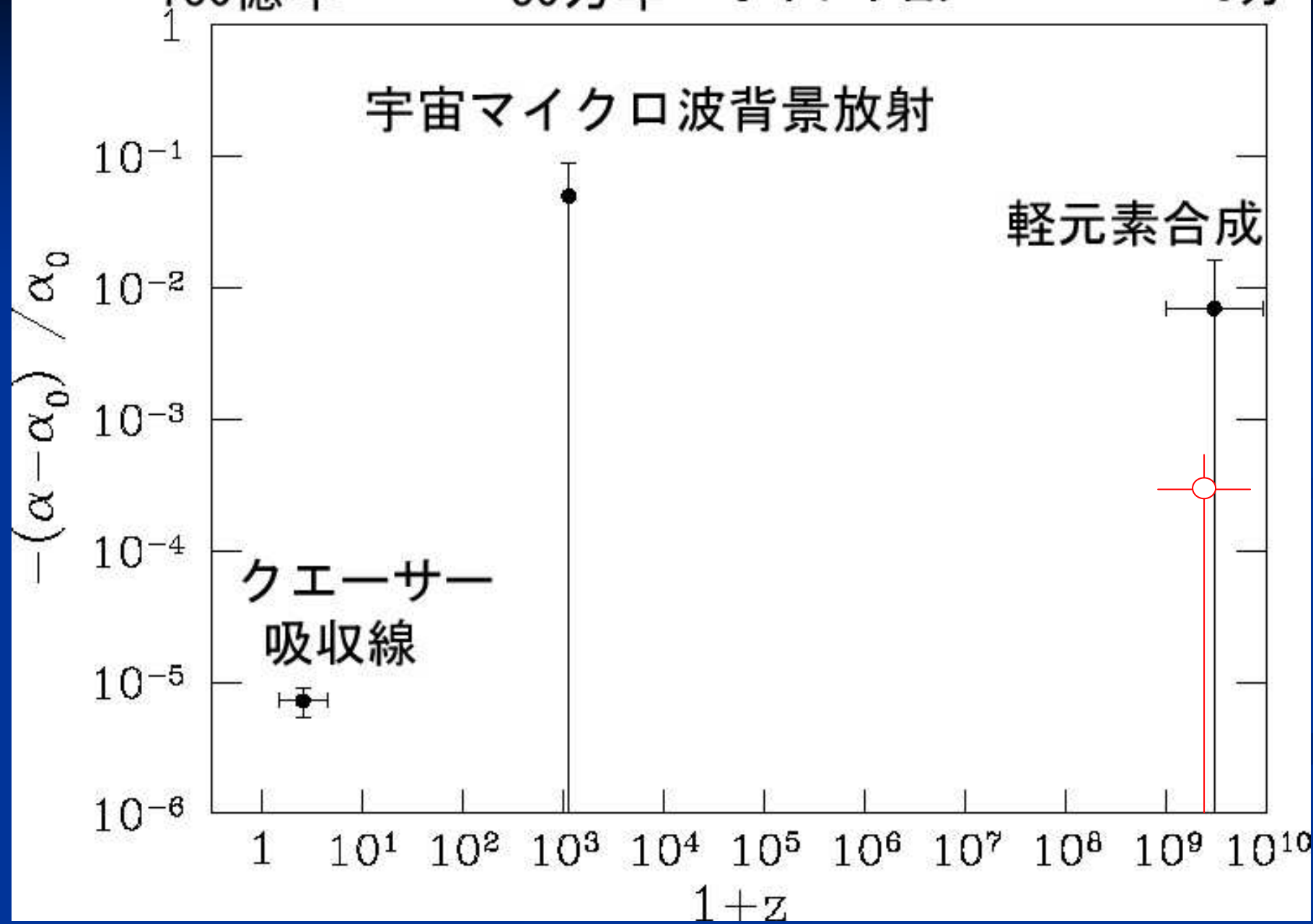
### ■ 高赤方偏移( $z \sim 3$ )でのSpectroscopyの測定

### ■ CMBの温度揺らぎ、polarizationの詳細な測定

■ 20-30mクラスの次世代巨大望遠鏡: 次世代Keck望遠鏡

■ スペースCMB望遠鏡: 次世代WMAP

150億年      50万年      宇宙年齢      3分



# 今後の展開

- さらに深く

- 大口径望遠鏡: 光バケツ

30mクラスへ

- さらに広く

- 高視野望遠鏡、専用化

8mクラスでのSDSS

- さらにクリアーに

- 宇宙望遠鏡
- Adaptive Optics (AO、補償光学)

6mクラスへ

- さらに多くの波長で

- 長波長電波からガンマ線まで
- 宇宙最初期の星の光は赤外線に赤方偏移

- 電磁波以外での観測



# 光・近赤外での観測 さらに深く: 大口径望遠鏡

- 見かけ暗い天体を見つける: imaging
  - 遠方 and/or intrinsicに暗い 天体
- 暗い天体のSpectroscopyを取る
- クリアーな像を得るためには補償光学(AO)が鍵
  - レーザーガイド星
  - Multi-conjugate AO: 多数のレーザーガイド星使う

# 8mクラス光望遠鏡のまとめ

## ■ 現存する望遠鏡

- すばる8.2m ハワイ
- Gemini (米欧) 8.1m南北に1台ずつ ハワイ、チリ
- VLT (欧) 8.1mが4台 チリ
- Keck(米) 10mが2台
- Hobby-Eberly望遠鏡 9.2mだが部分的にのみ可動
- South Africa Large Telescope(SALT) 9.2mで部分的にのみ可動

## ■ 建設中の望遠鏡

- Large Binocular Telescope(LBT) (イタリア他でアリゾナに設置) 8.4mを2台同時に
- カナリア大望遠鏡(GTC) (スペイン) 10m

世界の大型地上天体望遠鏡(口径6.5m以上)



Large Binocular Telescope(LBT)  
8.4m × 2 Mt.Grahamに建設中



13台完成+3台建設中

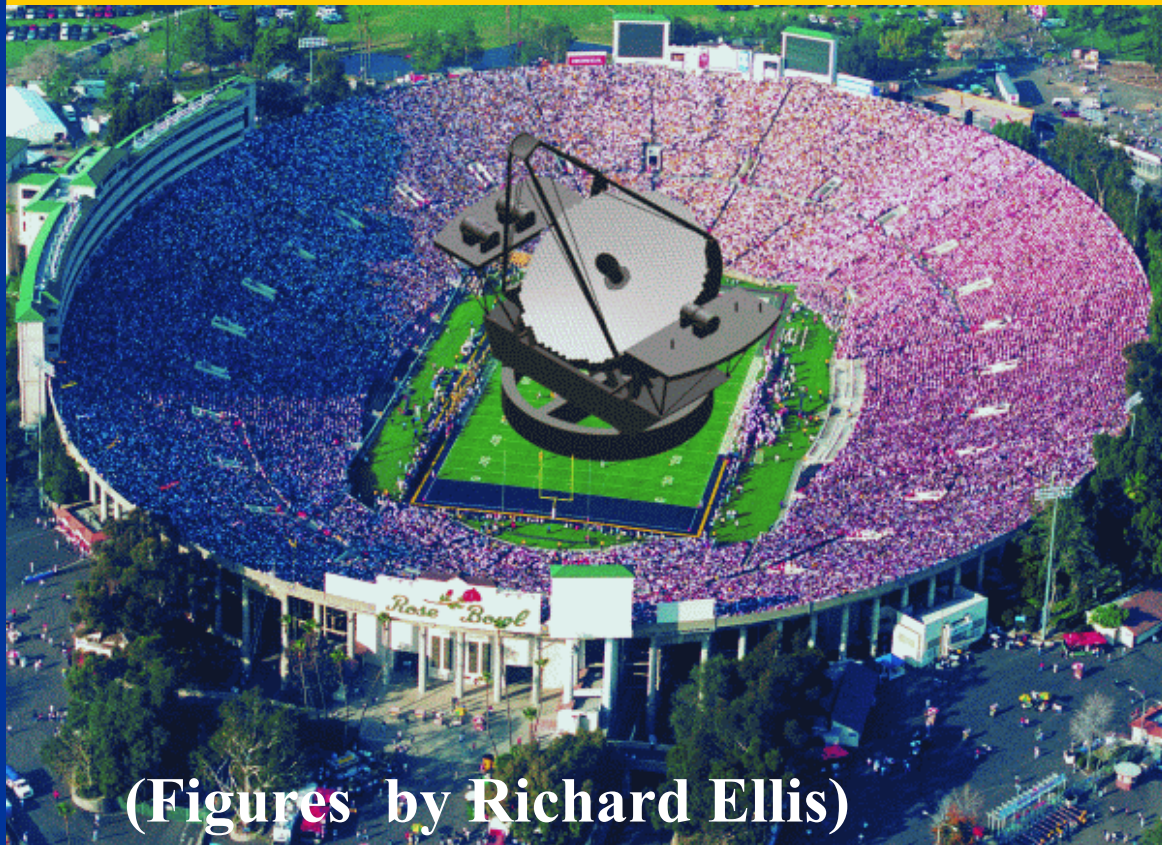
さらに18台の3m-6m望遠鏡(理科年表による)、より多くの小型望遠鏡  
東大・京大によるアタカマ6.5m望遠鏡計画・岡山3m級望遠鏡計画もあり



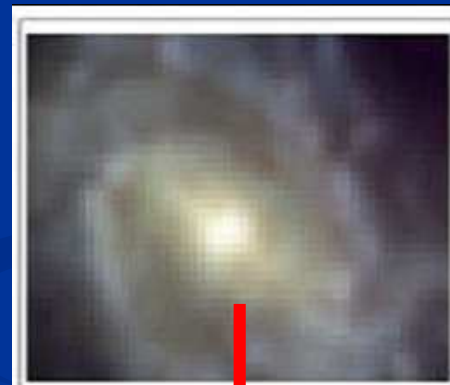


# 巨大口径望遠鏡プロジェクト Extremely Large Telescope: ELT

米欧の複数提案が、米、欧それぞれでまとめられつつある  
日本でもようやく検討が始まっている: JELT



(Figures by Richard Ellis)



HST

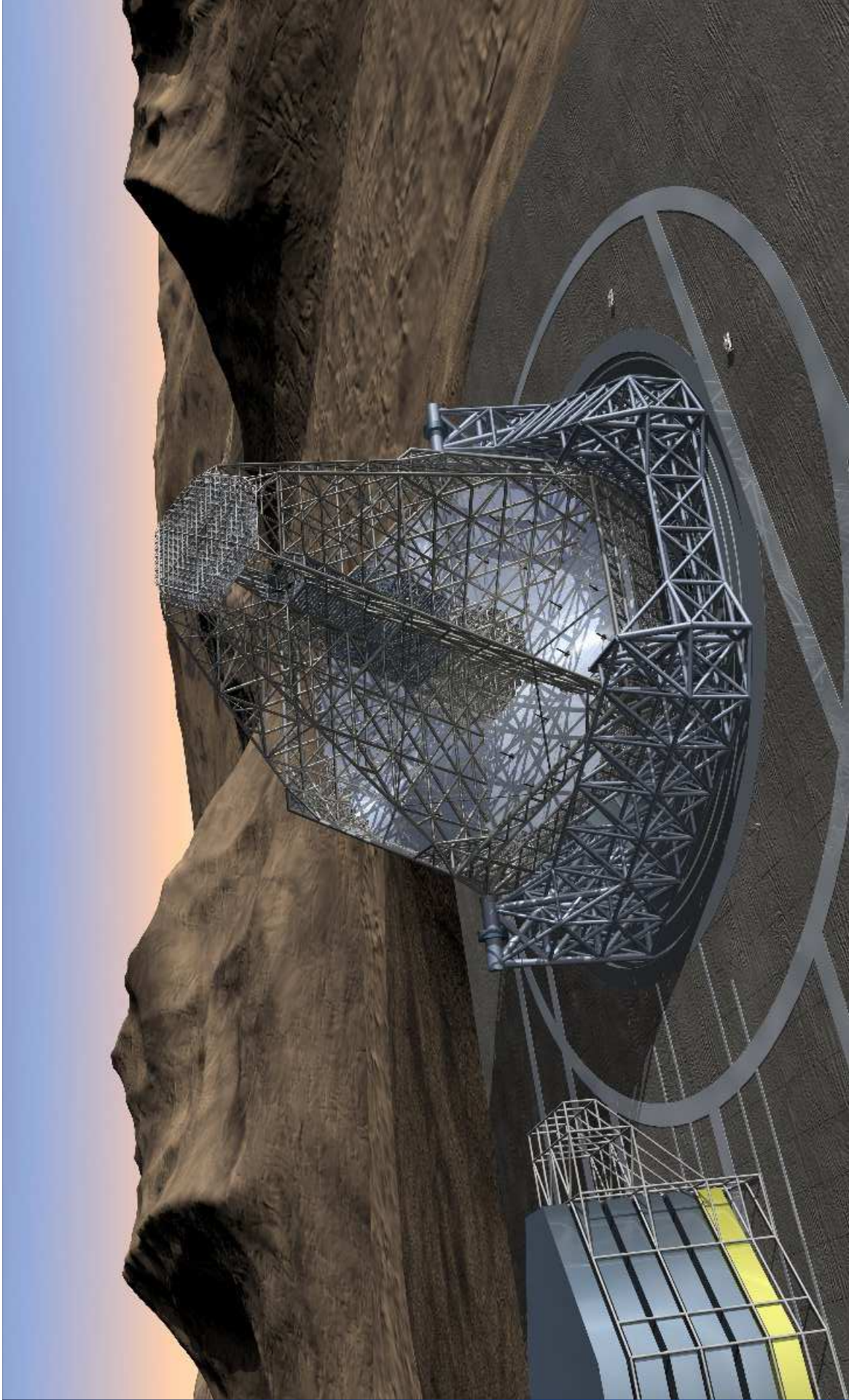


ELT

## ■ ヨーロッパの提案

- Over Whelming Large Telescope : OWL  
ESO(ヨーロッパ南天文台)
- Euro50  
Sweden中心
- 口径50-100m
- Design Studyがスタート 2008年まで:31MEuro
- 総額は1200MEuro? (50m?)
- 2015-2020頃完成?





## ■ アメリカのELT Project

### ■ Thirty-Meter Telescope (TMT) project

#### ■ メンバー

- Caltech, UC: The California Extremely Large Telescope - CELT
- Association of Universities for Research in Astronomy (AURA, 32 U.S. inst. 7 international affiliates): Giant Segmented Mirror Telescope - GSMT
- Association of Canadian Universities for Research in Astronomy (ACURA): Very Large Optical Telescope - VLOT

#### ■ 予定

すでにdesign and development phase

2007年までに基礎開発、望遠鏡設計、サイト決定、  
2015年完成を目指す

#### ■ 予算

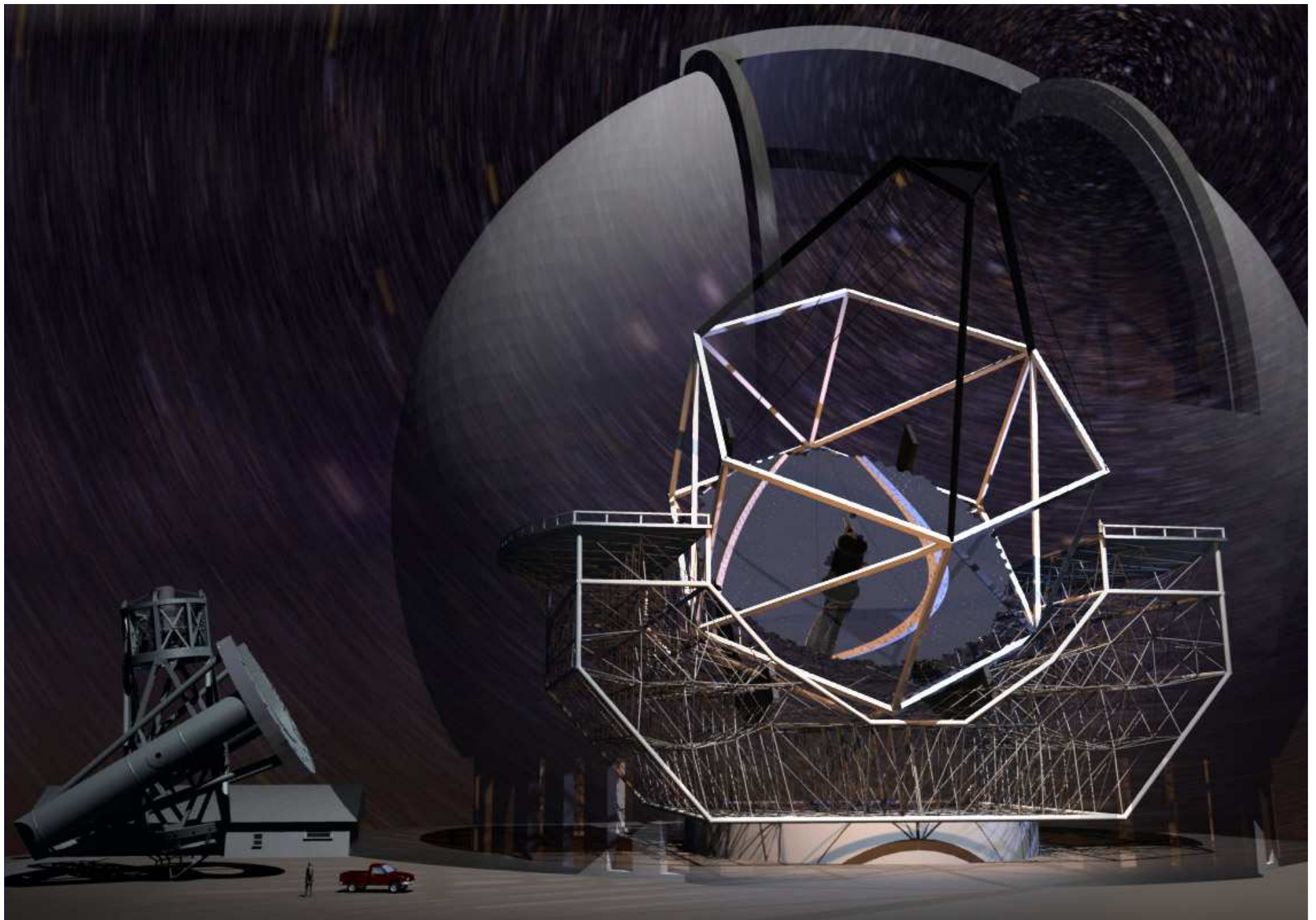
2003年にはMoore Foundationが\$35 million

ACURAが2005年に\$10 million Canadian

4者で\$700Mが目標、2007年までに\$70M集める (NSF=AURA  
だけがまだ)

日本の参画検討中

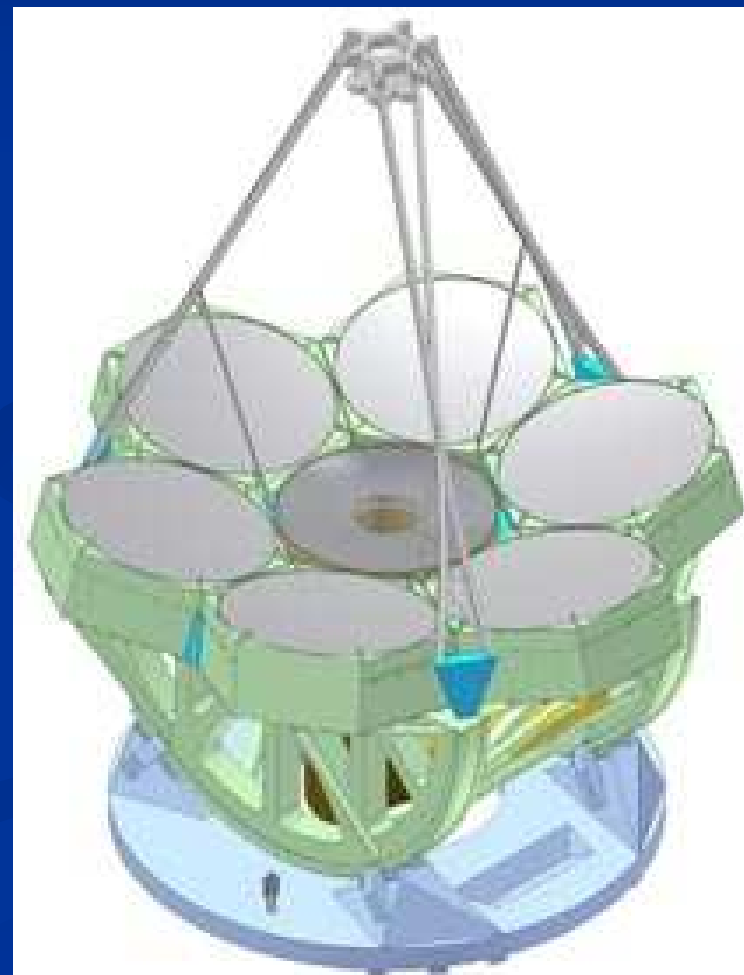




5m望遠鏡と、30mの比較

# 巨大口径望遠鏡プロジェクト(続き) Giant Magellan Telescope (GMT)

- カーネギー財団、アリゾナ大学のプロジェクト
- 有効口径21m (8.4mの単一鏡が7枚)
- チリ・ラスカンパナス観測所が候補地
- 星像がきれいにとれる



# さらに広視野

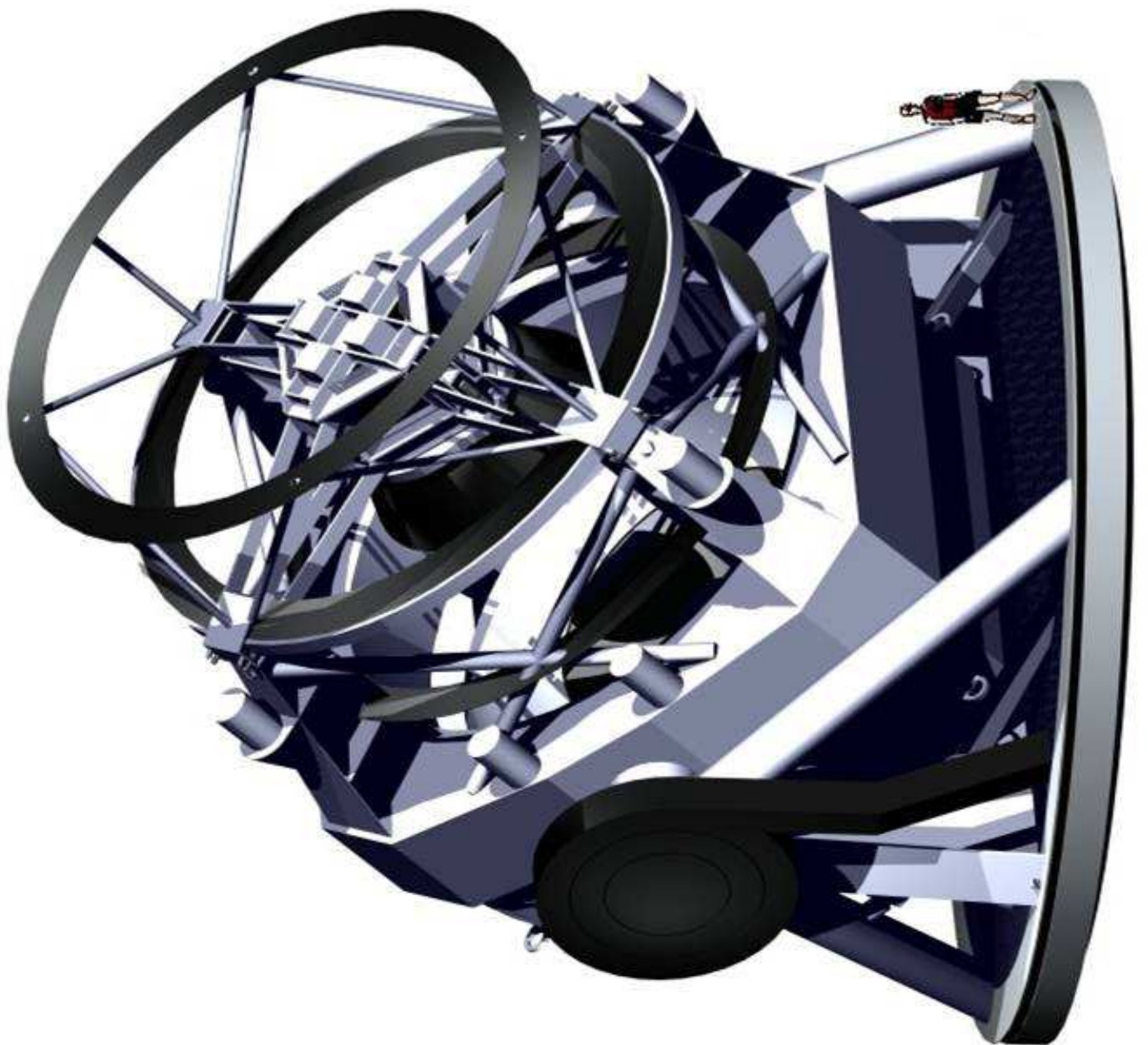
- Hyper Suprime Cam
  - PI: 宮崎聡(国立天文台)
  - すばるに設置する新しい超広視野カメラ
  - 視野 3 square-degree (現在のすばるのSuprime Camは 0.25 square-degree)
  - 十億円超？
  - 専用して使えれば世界最高の成果が出せる！  
(次のLSSTに負けない！)

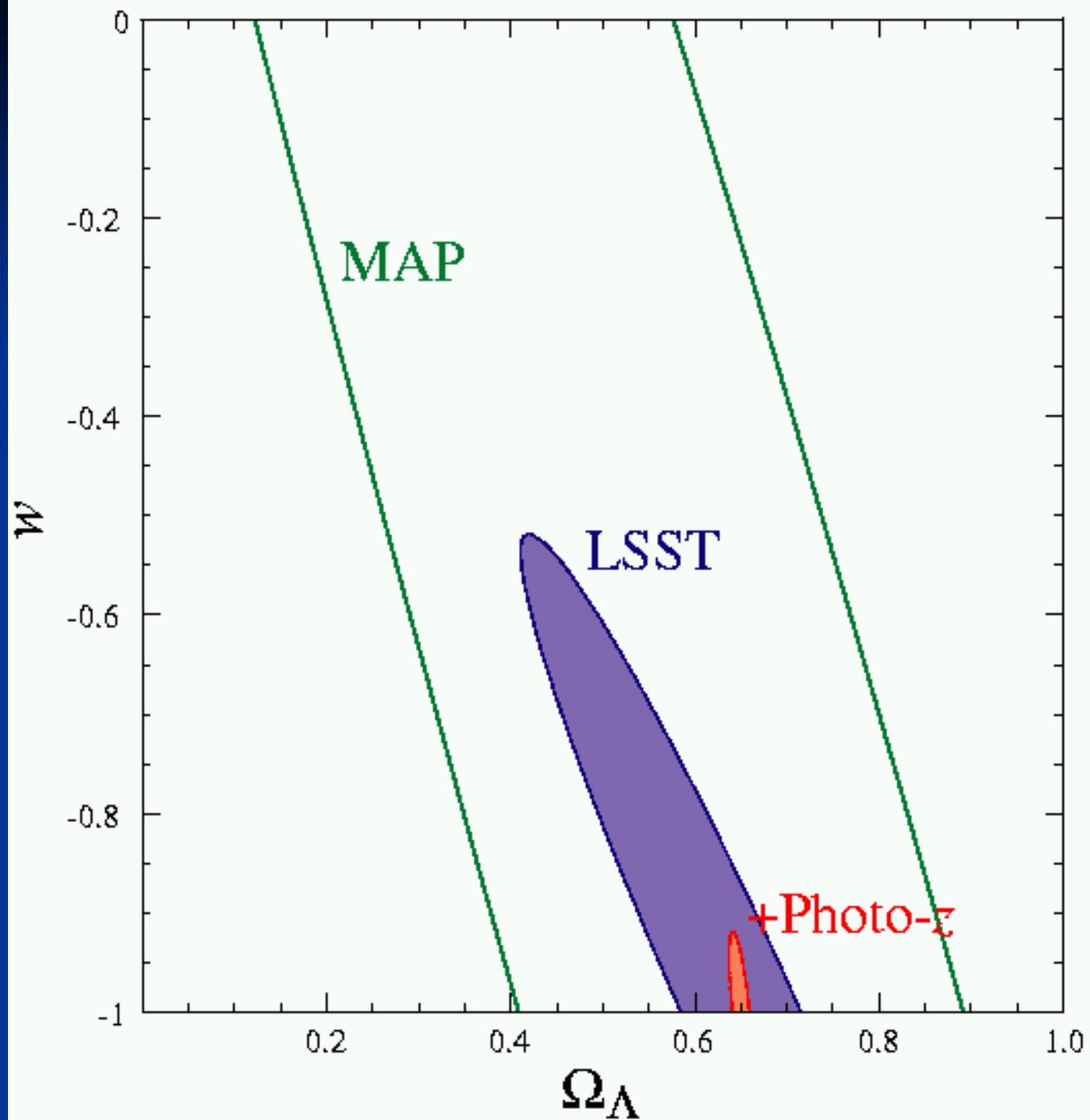
## ■ Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

- PI: J.A.Tyson(UCDavis); Stanford, Washington, National Optical Astronomy Observatory など
- 口径8.4m地上望遠鏡
- 視野 10 square-degree (すばるは0.25 square-degree): 10秒の露光で3日間で見る事が可能な範囲の全天探査を完了。ただしspectroscopyはない。
- 専用望遠鏡に近い
  - Dark Matter: strong lens
  - Dark Energy: weak lens 3-D mass reconstruction tomographyによって密度揺らぎの時間進化を測定する
  - Optical Transients: 例えばgamma-ray burstのoptical flash
  - Objects of Outer Solar System: 例えばKuiper Belt天体
  - Near-Earth Objects: 例えばAsteroid 絶滅を避ける！









$$p = w c^2 \rho$$



# サーベイ能力を16倍へ

Camera Name	Telescope			Vendor	CCD		FOV $\Omega$ [deg <sup>2</sup> ]	$A\Omega$	First Light
	$D$ [m]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$F$		Format	$N_{\text{CCD}}$			
WFPC2	2.5	3.46	12.9	Loral	800×800(15)	3	0.0015	0.01	Dec-93
UH8K	3.6	9.59	4.2	Loral	4k2k(15)	8	0.25	2.40	Sep-95
SDSS	2.5	3.83	5	SITe	2k2k(24)	30	6.0	22.99	May-98
NOAO8K	3.8	9.98	2.7	SITe	4k2k(15)	8	0.36	3.59	Jul-98 <sup>a</sup>
CFH12K	3.6	9.59	4.2	MIT/LL	4k2k(15)	12	0.375	3.60	Jan-99
Suprime-Cam	8.2	51.65	2.0	MIT/LL	4k2k(15)	10	<b>0.256</b>	<b>13.17</b>	Jul-99
MegaCam	3.6	9.59	4.2	Marconi	4.5k2k(13.5)	40	1	9.59	(Spring-02)
VISTA	4.0	11.33	1.0	Marconi	4.5k2k(13.5)	50	2	22.67	(Spring-04)
LSST <sup>b</sup>	8.4	37.40	1.25	(TBD)	(1k1k(10))	(1300)	(7.1)	265.54	(TBD)

ハイパー・シュープリーム・カメラ

超新星を1晩に

500個発見することが可能！

超新星  
発見能力

# LSSTと同様のプロジェクト

- The Dark Energy Survey (DES)
  - Fermilabを中心としたプロジェクト
  - CTIO 4m望遠鏡を5年間、30%使用する
  - 高視野カメラDark Energy Camera (DECam)
    - 520megapixel CCD camera
    - 3 square degree
    - 4band
    - 5年間で5000square degree
    - \$18.4M for Instrument + a few \$M for data processing

- The Discovery Channel Telescope (DCT)
  - Lowell ObservatoryとDiscovery Channelのプロジェクト
  - 4.2-meter telescope @ Arizona
  - 4 square degree



# ■ Pan-STARRS: the Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System

- ハワイ大学
- 1.8mの望遠鏡4台
- それぞれ3 degree field of view, 1 billion pixels
- cover 6,000 deg<sup>2</sup> per night
- 主として、asteroidの監視、でもcosmologyもできてしまう！
- Proto-type telescopeのfirst lightが2006年



# すばる望遠鏡とGEMINIの共同プロジェクト

- WFMOS: Wide Field Fiber-Fed Optical Multi Object Spectrograph
  - 一度に4000から5000の天体のスペクトルが取れる
  - 視野は1.5deg
  - 当初はGemini Telescope(8m)に搭載するつもりだったが、広視野の主焦点を使えることから、すばるに提案
  - \$70M近い共同プロジェクト？
  - 11月に最初のscience meetingハワイで開催

# WF MOSのサイエンスと利点

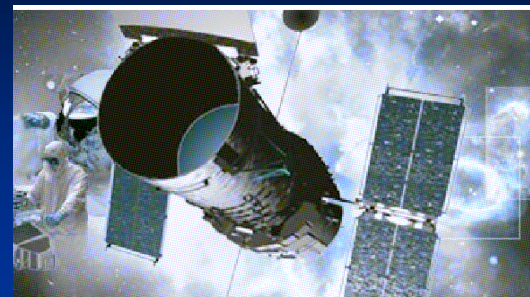
- 利点: スペクトルが取れるので、赤方偏移が正確に決定できる  
つまりSDSSや超新星探査のアップグレードになる！
- サイエンス
  - LensingのShearを用いたtomographyがより精密にできる
  - 大規模構造の進化、またバリオンの存在による密度揺らぎの振動を用いて、ダークエネルギーを決定できる
  - 超新星の探査にも用いることが可能



# スペース望遠鏡：現存、近未来

Hubble Space Telescope

口径2.4m 紫外～近赤外  
( $0.115\mu$ )～ $2.5\mu$



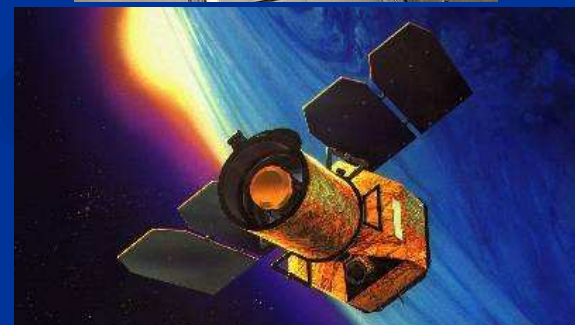
Spitzer Space Telescope

口径85cm 中間赤外～遠赤外  
 $3.6\sim 160\mu\text{m}$



GALEX 紫外

口径50cm  
 $0.135\sim 0.280\mu\text{m}$



Astro-F (来年1月) 近赤外～遠赤外

口径67cm  
 $2\sim 200\mu\text{m}$



# 光・赤外Space望遠鏡将来計画

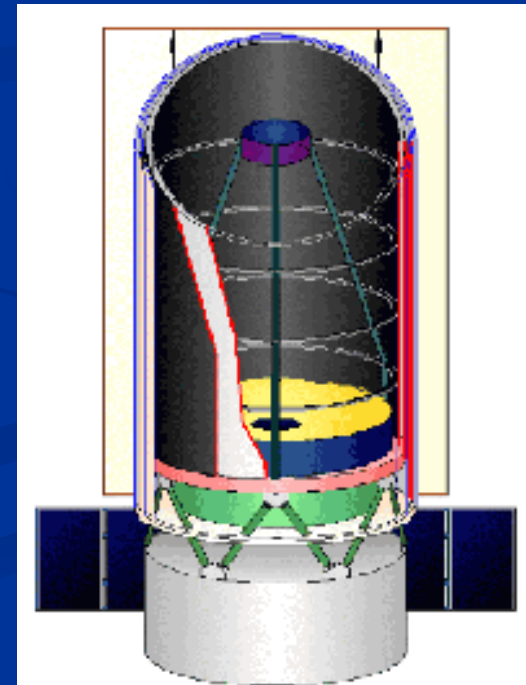
- James Webb Space Telescope: JWST
  - HST(口径2.4m)の後継機、NASAのプロジェクト
  - 予算はHSTの1/3程度? (~1000億円?)
  - 打ち上げは2011年???(2015年が現実的)
  - 口径6.5m
  - 観測装置は近赤外から可視(0.6-2.3 $\mu$ m)のカメラNIRCam、近赤外のmulti-object spectrograph (NIRSpec、中間赤外(2.4-5 $\mu$ m)のカメラとspectrograph (MIRI)
  - L2軌道
  - 角度分解能は回折限界
$$1.2\lambda/D \text{ [Rad]} = 0.084(\lambda/2.2 \mu\text{m})/(D/8\text{m}) \text{ [arcsec]}$$





## ■ SPICA

- 日本の中間赤外、遠赤外宇宙望遠鏡
- 口径3.5m
- 地上では観測不可能な波長に目的を絞る
- L2軌道
- 4.5Kまでの冷却を、放射冷却と機械式冷凍機だけを用いる(通常は液体ヘリウム)
- 予算400億程度



## ■ Herschel Space Observatory

- 2007年8月打ち上げ予定

- 口径3.5m

- 遠赤外線 60-670  $\mu\text{m}$

- L2軌道

- サイエンスの目的

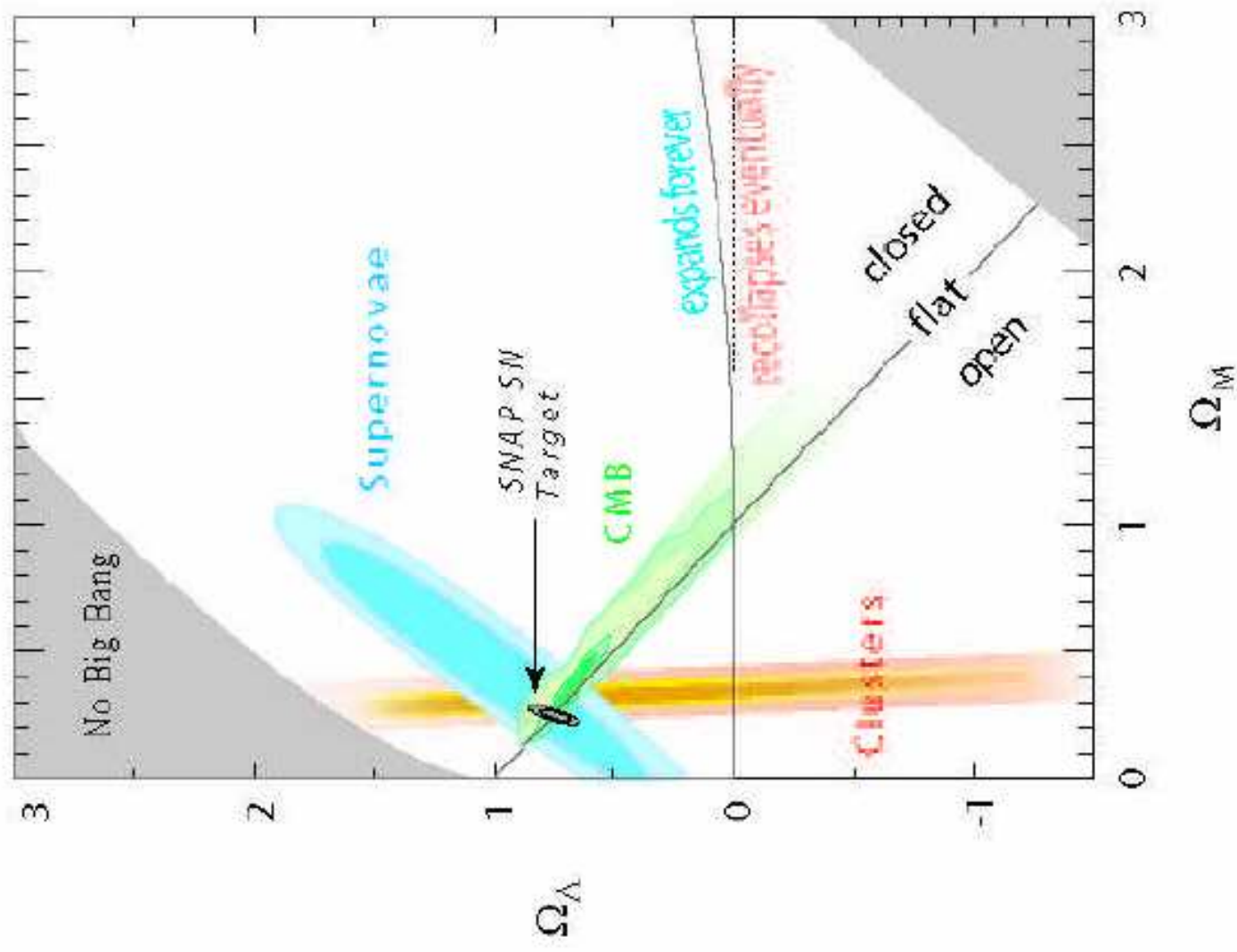
- The formation and evolution of Galaxies, and what it is that 'powers' them.
- Stellar evolution and development, and how stars grow from the interstellar medium.
- Astrochemistry (the formation of chemicals in space)



## ■ SNAP: Supernova/Acceleration Probe

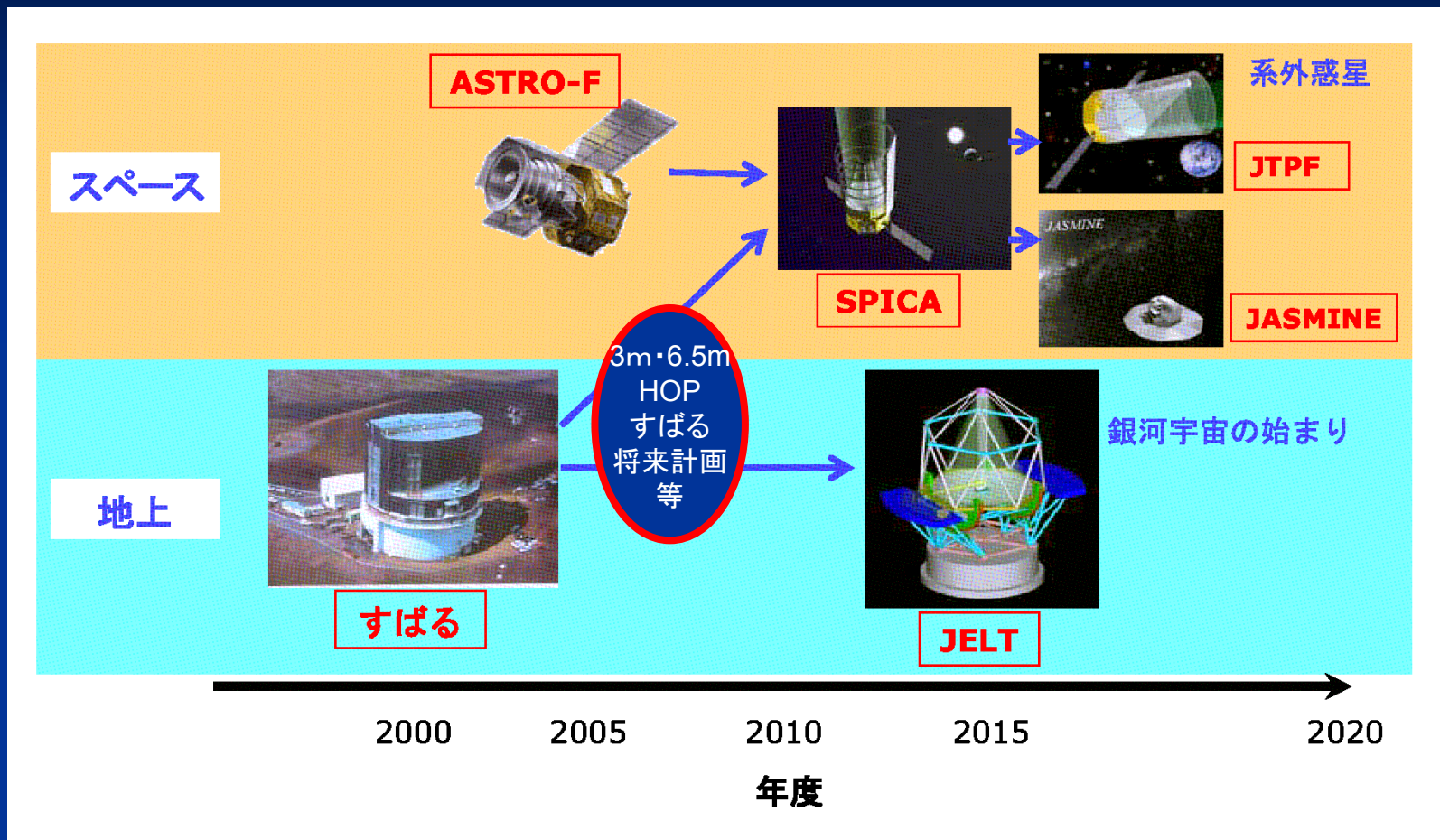
またはJDEM: Joint Dark Energy Mission

- 口径2m
- 視野0.34square degree、411Mpixels
- 波長は0.35-1.7 $\mu\text{m}$ （可視ほぼ全域と近赤外）
- カメラ（可視、赤外）とspectrographを搭載
- L2軌道
- 一年間で2000個の超新星
- 一年間で $\sim 1000$ square degreeのmappingを行い、gravitational lensingのshear fieldを測定する





# 日本の光赤外大型計画のRoad Map



将来計画検討報告書「2010年代の光赤外線天文学」より

# 電波の次期・将来プロジェクト

## ■ ALMA

### ■ 地上の大干渉系

- 12m口径64台+小口径(7m)

### ■ 周波数(波長)は30GHz(1cm)-950GHz(0.32mm)

### ■ 干渉系は、互いの間隔を広げれば高解像度、ただし視野が狭くなる

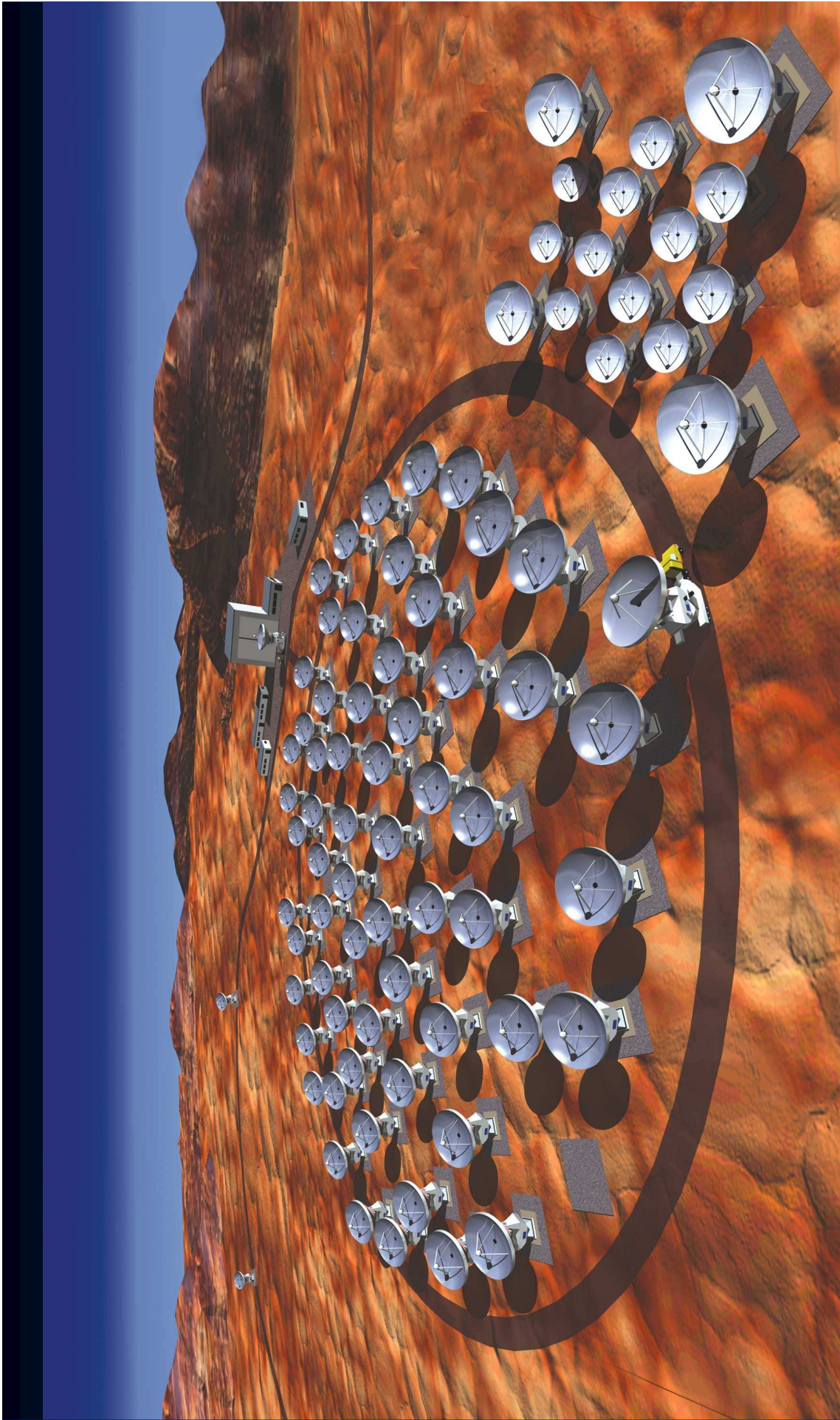
- 最大0.01秒角の分解能:14kmの基線長

- 視野は最大で100秒角程度、ただし小口径と、12m一台を組み合わせて運用すれば、広い視野も観測可能

### ■ アメリカ、ヨーロッパ+日本、台湾も参加か

### ■ 費用は1000億円(日本は256億円)





## ■ ALMAのサイエンス

### ■ 宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの fine angular resolutionでの測定

- 宇宙初期の銀河や銀河群の熱いガスによって、背景放射が inverse comptonでたたかれる、Sunyaev-Zeldovich効果
- 宇宙初期磁場による温度揺らぎ

### ■ 銀河団

### ■ 銀河形成

- 赤方偏移した炭素、窒素、酸素などの輝線を submmで測定

### ■ 活動銀河核

- ブラックホールからのジェットを測定

### ■ 星形成

- 近傍の巨大分子雲(星のゆりかご)の構造を解析

### ■ 惑星形成

- 原始惑星系円盤の観測

### ■ 星間分子

- 生命関連有機分子の探査

- 赤方偏移した21cm線(水素原子のhyper-fine line)を測定するプロジェクト
  - 狙う周波数帯はFMより少し上程度 数100MHz
  - 高赤方偏移での中性水素の空間分布を細かい赤方偏移のbinごとに得る。
    - その結果、銀河間物質がどのようにイオン化されてきたか、すなわち初期天体形成の過程が明らかになる
  - LOFAR: オランダ
  - MWA アメリカ、オーストラリア
  - 21CMA/PAST 中国、カナダ
    - どれも2007年頃の運用を目指している
  - 将来は、Square Kilometer Array: SKA





# LOFAR

- オランダのプロジェクト
- 25000個のアンテナを350kmに展開
- IBM BlueGeneで相関を計算する
- 2007年に初期運用、2009年から本格運用







# 21CMA/*PAST* data analysis

Ue-Li Pen 彭威礼

Chris Hirata

**CITA** Canadian Institute for  
Theoretical Astrophysics



Institut canadien  
d'astrophysique théorique **ICAT**

Xiang-Ping Wu 武向平, Jeff Peterson



# Ulaštai

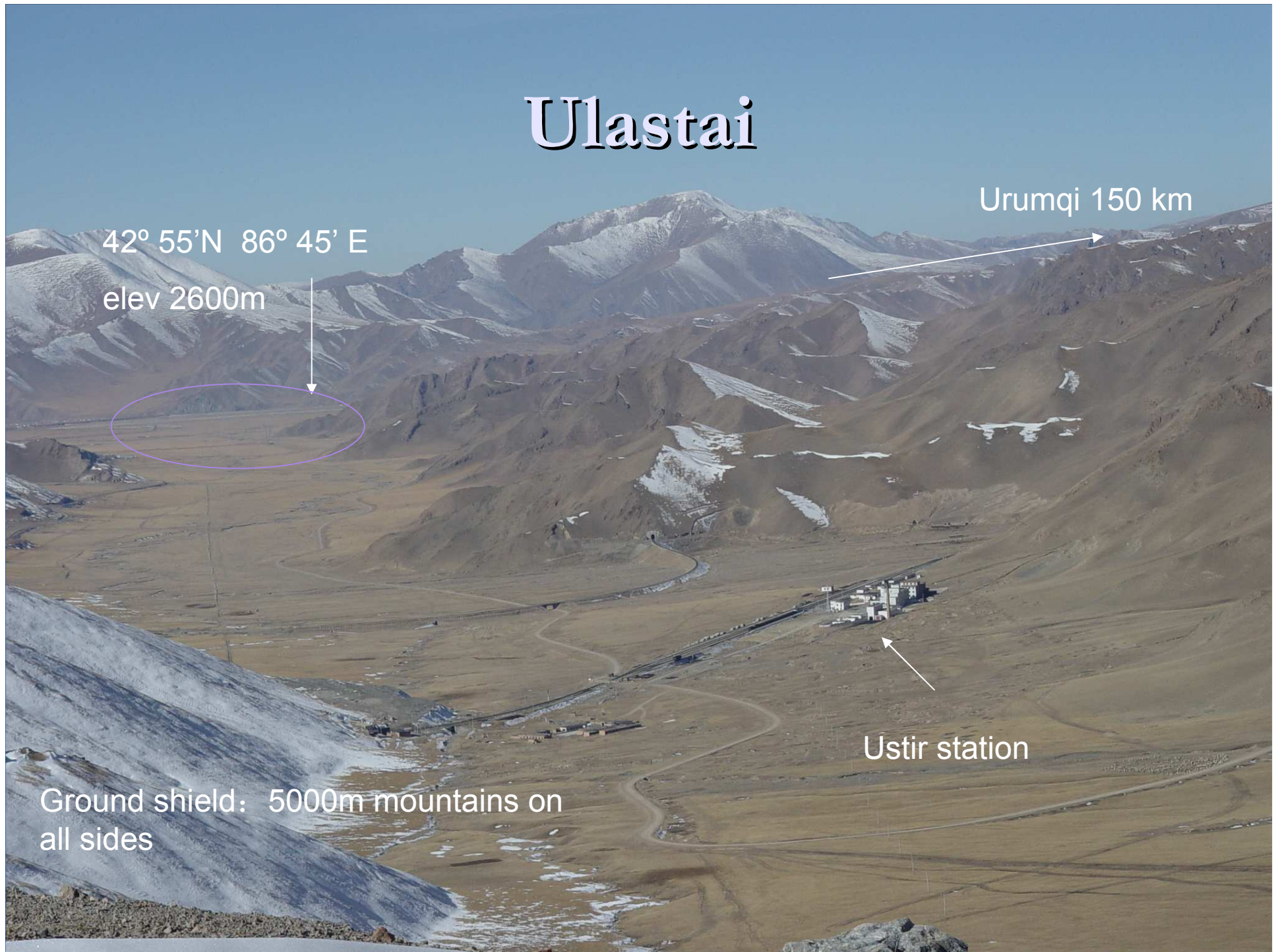
42° 55'N 86° 45' E

elev 2600m

Urumqi 150 km

Ustir station

Ground shield: 5000m mountains on all sides



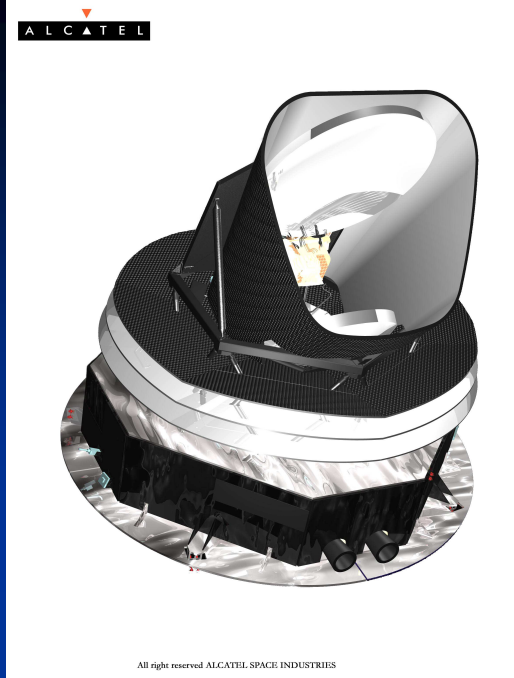


# SKA: Square Kilometer Array

- ALMAの次の巨大プロジェクト
- 周波数はALMAより下
- 1km<sup>2</sup> collecting area: 100-200 m口径の電波望遠鏡の数百個のステーション群
- 国際協力: Europe, the USA, Australia, Canada, China, India and South Africa
- \$1000M
- 早くて2020年か？



# SpaceでのCMB観測



## ■ PLANCK

- ヨーロッパのプロジェクト ESA
- 予算: 約400億円
- 2008年8月打ち上げ予定
- WMAPよりすぐれた角度分解能
  - $l < 800 \rightarrow l < 2000$
- WMAPよりすぐれたpolarization測定
- WMAPより多くのチャンネル: 特に高い周波数領域
  - Foreground(dustやsynclotronなどの影響)の除去
  - ALMAとの相補的關係
- サイエンス
  - 宇宙論パラメターのさらなる高精度の決定
  - Polarizationにより、宇宙再加熱、重力波成分などに制限
  - SZ効果による銀河団の探査

## ■ Inflation Probe

- Polarizationを中心としたCMB観測
- 2020年？
- 重力波成分：インフレーションに対する制限
- NASA/Beyond Einstein計画の一つ

# その他の波長での観測計画

## ■ X線

### ■ NeXT(日本)

- 2011年打ち上げ
- 1MeVまでをカバー、粒子加速などを調べる

### ■ Constellations X

- 4台のX線望遠鏡の編隊飛行
- 2011年頃打ち上げ
- High resolution X-ray spectroscopy

### ■ XEUS(国際協力)

- 2015年为目标
- 検出器衛星とミラー衛星の編隊飛行

## ■ $\gamma$ 線

### ■ GLAST

### ■ 5 at 5?

# 電磁波以外

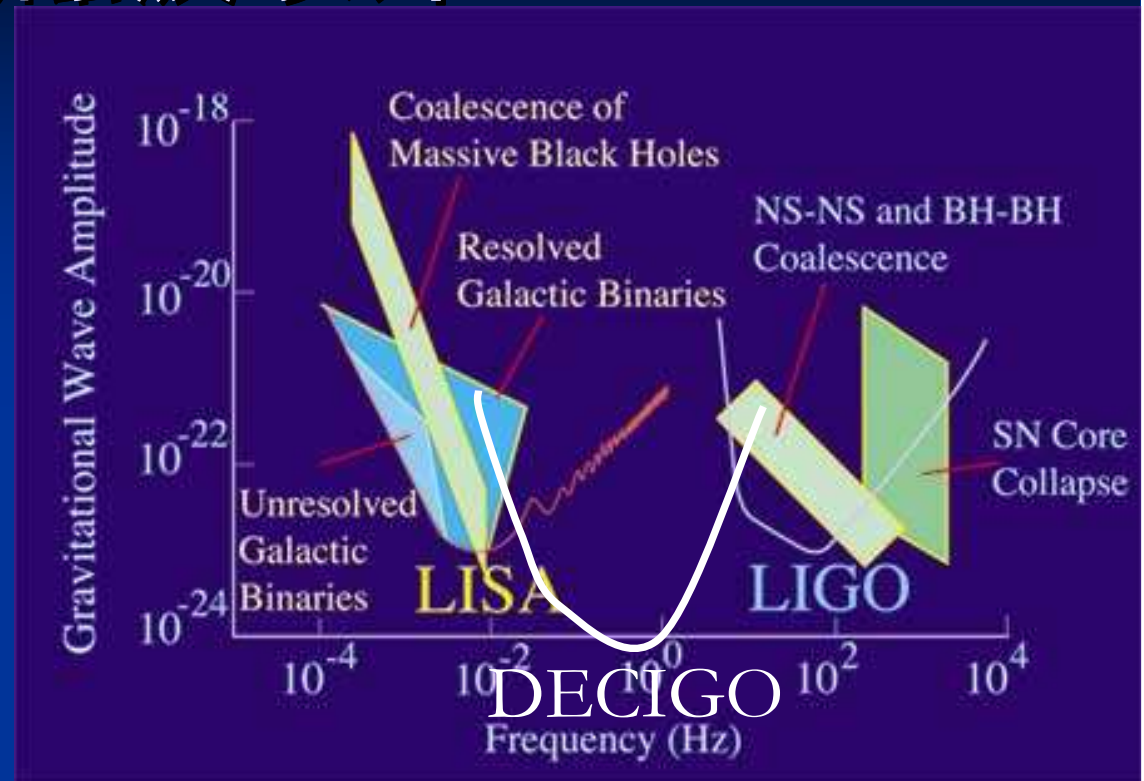
## ■ 重力波

### ■ 地上

- Advanced LIGO
- LCGT (日本)

### ■ スペース

- LISA (米欧)
- DECIGO/Big Bang Observer



# Beyond Einstein

# NASAのroad map

MAP

INFLATION  
PROBE

世界最強の合衆国  
は、最初に火星に  
人を送るのだ！



White House photo by Eric Draper

2007年まで

GREAT  
OBSERVATORIES

PROBES

VISIONS



# 日本の光赤外大型計画のD-125

~~理念無き~~  
聖域無き  
構造改革

地上



すばる

2000

2005

将来計画検討報告書「2



International Workshop on  
Energy Budget in the High Energy Universe  
Kashiwa, Japan, February 22-24, 2006

Key Dates

October, 2005	<u>First circular</u> distributed.
November 3, 2005	Online registration to be started.
January <b>31</b> 2006	Deadline for submission of the abstract for contributed papers
January 31, 2006	Deadline for online registration
February, 2006	Final circular to be distributed.

# 招待講演者：確定

- R. Blandford
- G. Sigl
- H. Kang
- F. Halzen
- P. Meszaros
- P. Coppi
- Neil Gehrels
- M. Fukushima
- M. Mori
- N. Kawai
- A. Yamamoto
- T. Terasawa/ M. Hoshino
- T. Takahashi
- M. Nakahata
- M. Sasaki