

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)

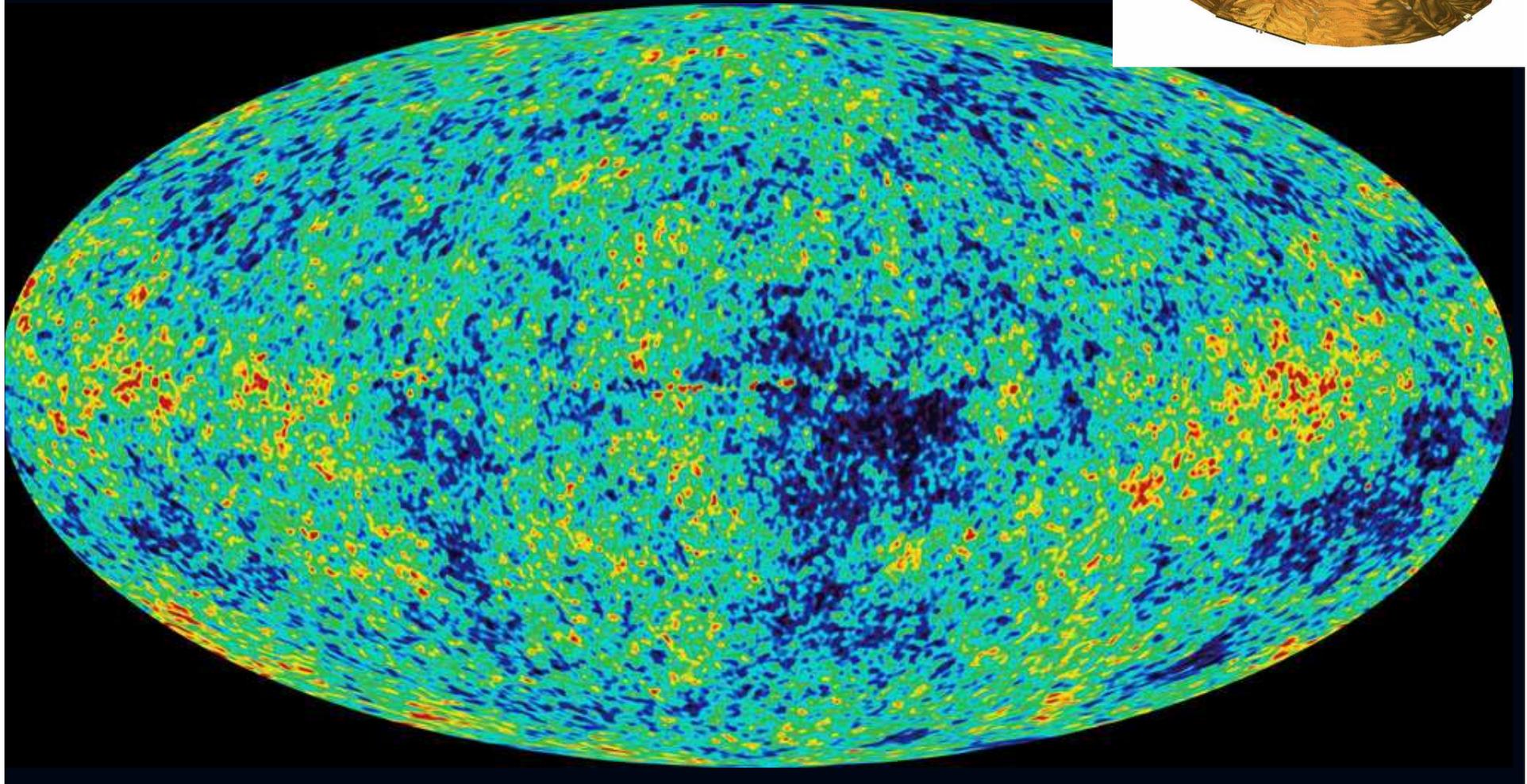
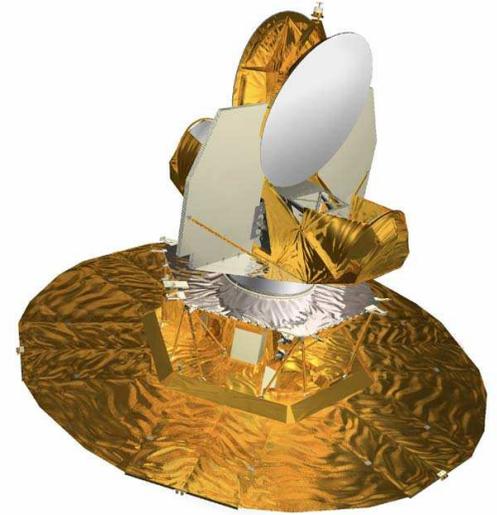
■ 最遠方天体探査

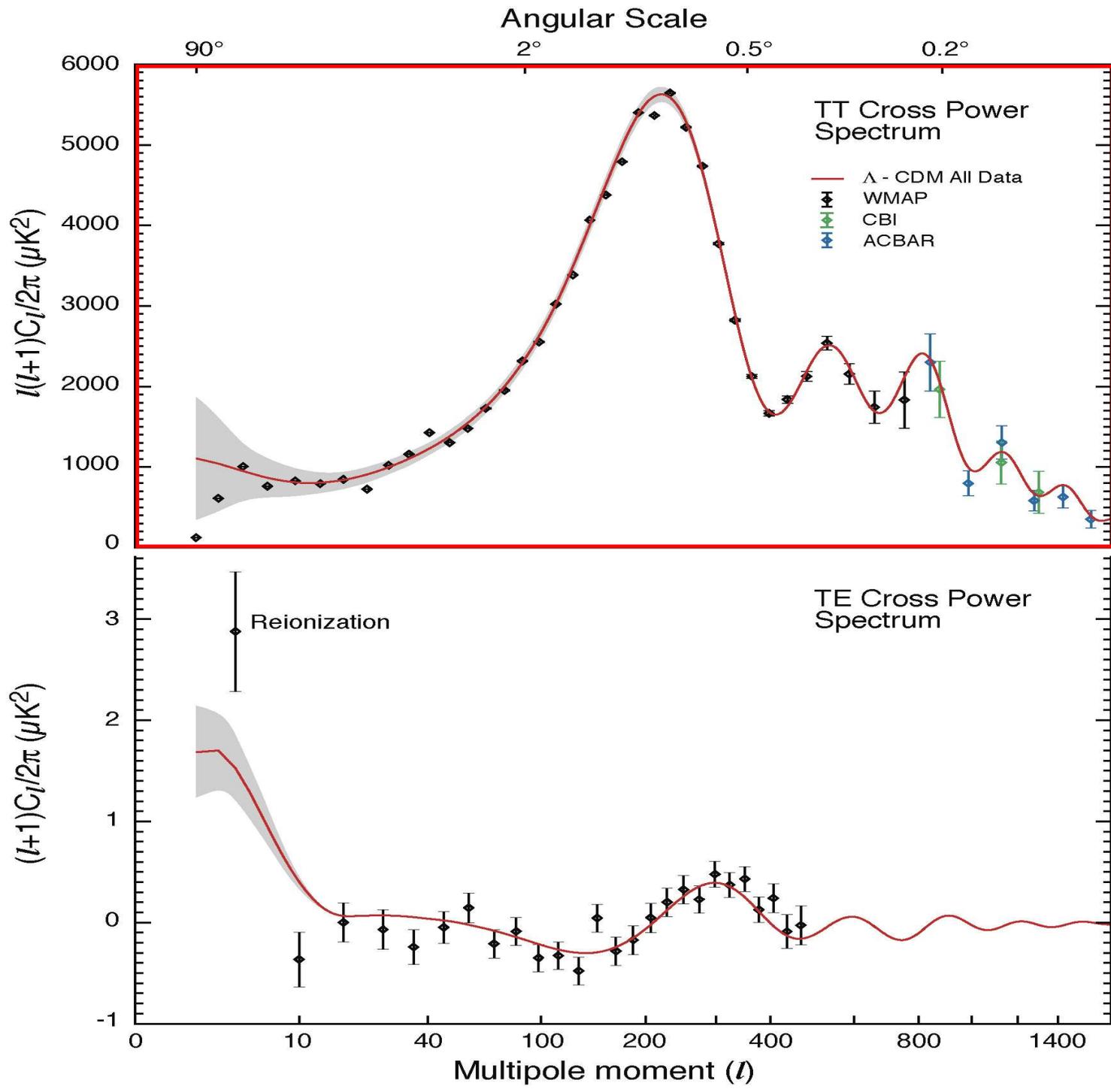
- WMAPは $z \sim 20$ での再加熱を示唆
- 銀河: 巨大望遠鏡によるLy-alpha emitter探査
- QSO: SDSSによる探査

■ 構造形成の時間進化

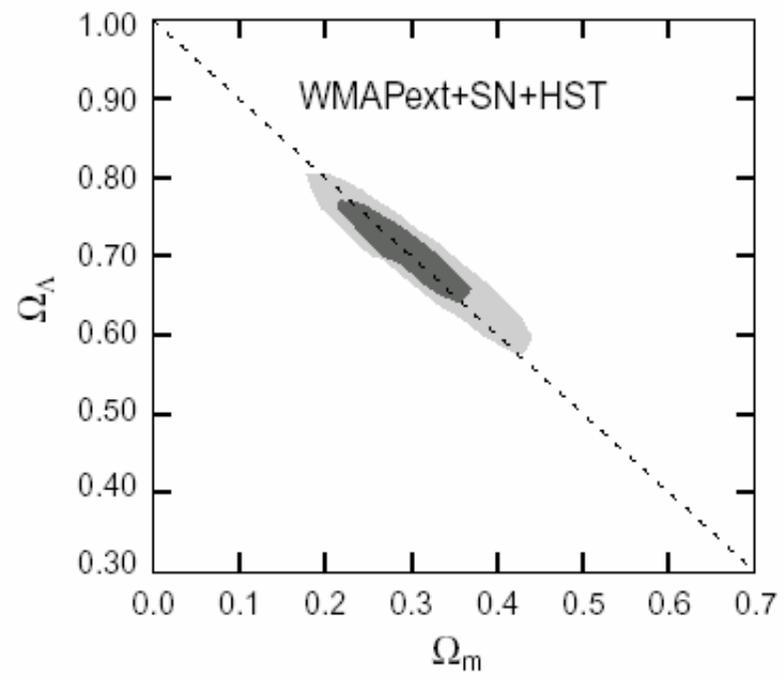
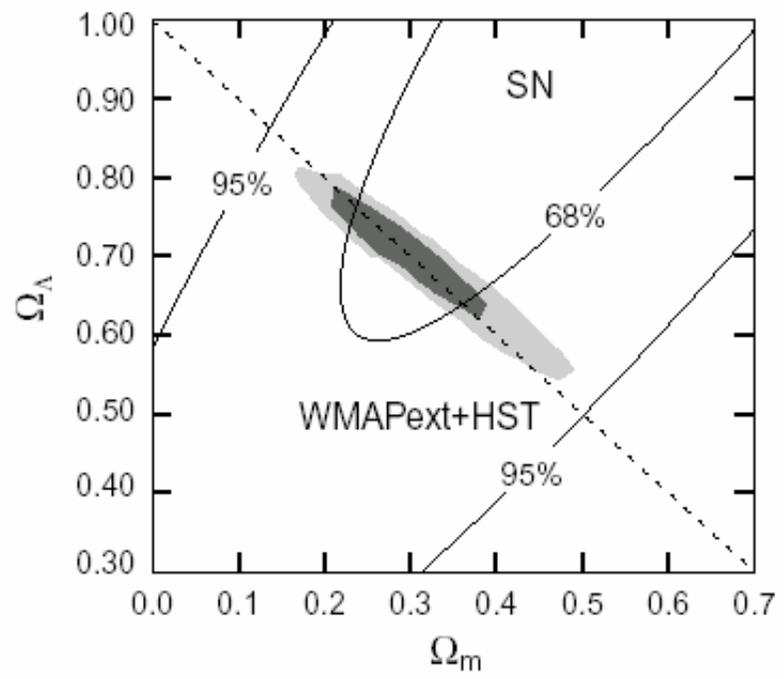
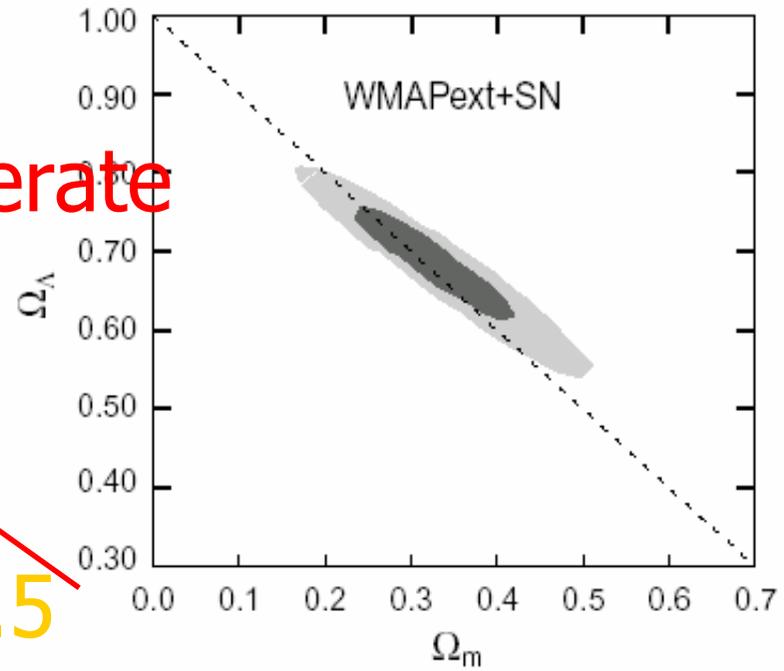
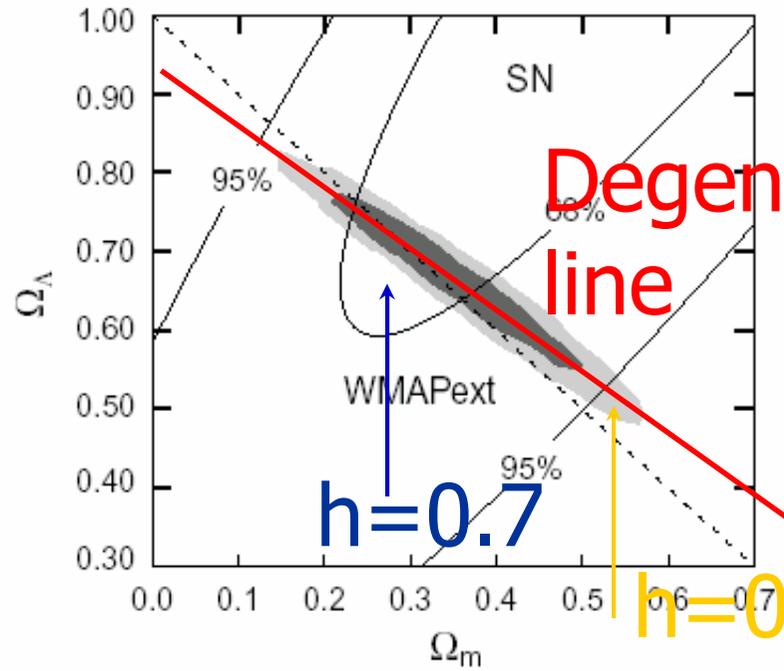
- 赤方偏移 $z \sim 5$ での大規模構造(銀河団の種)の発見
- $z=6.4$ のGRBの発見

WMAP

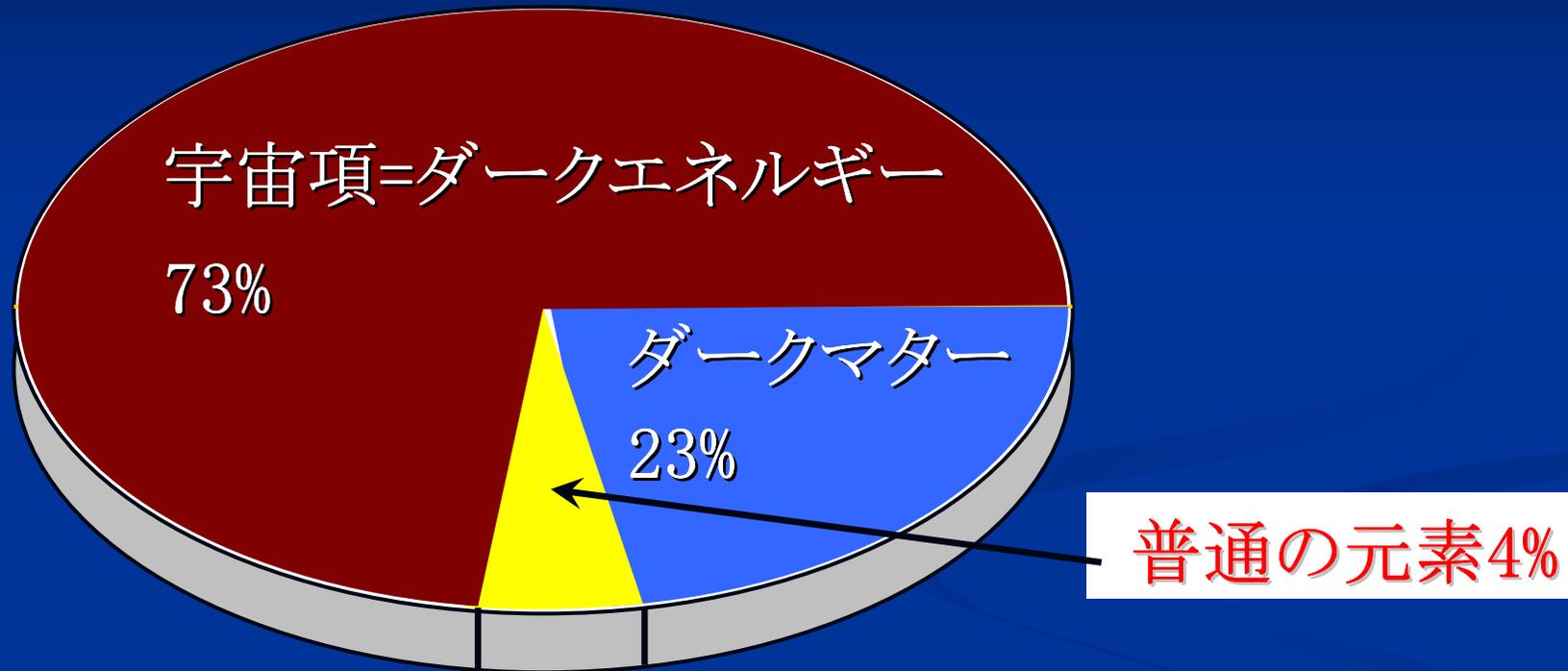




**Obs. of
WMAP**



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銀河探査チーム提供
2dF Galaxy Redshift Survey

16 August 2001

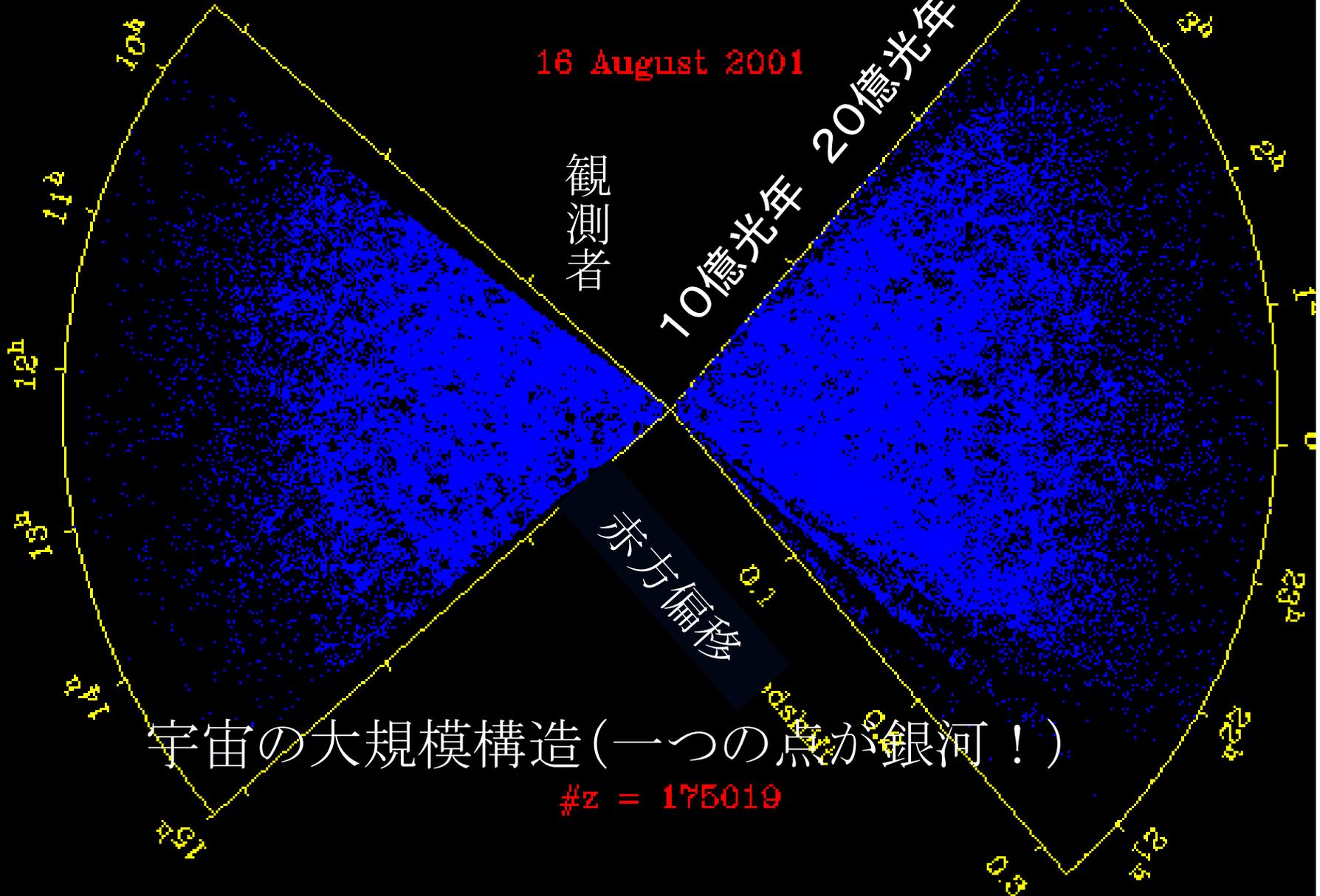
観測者

10億光年 20億光年 30億光年

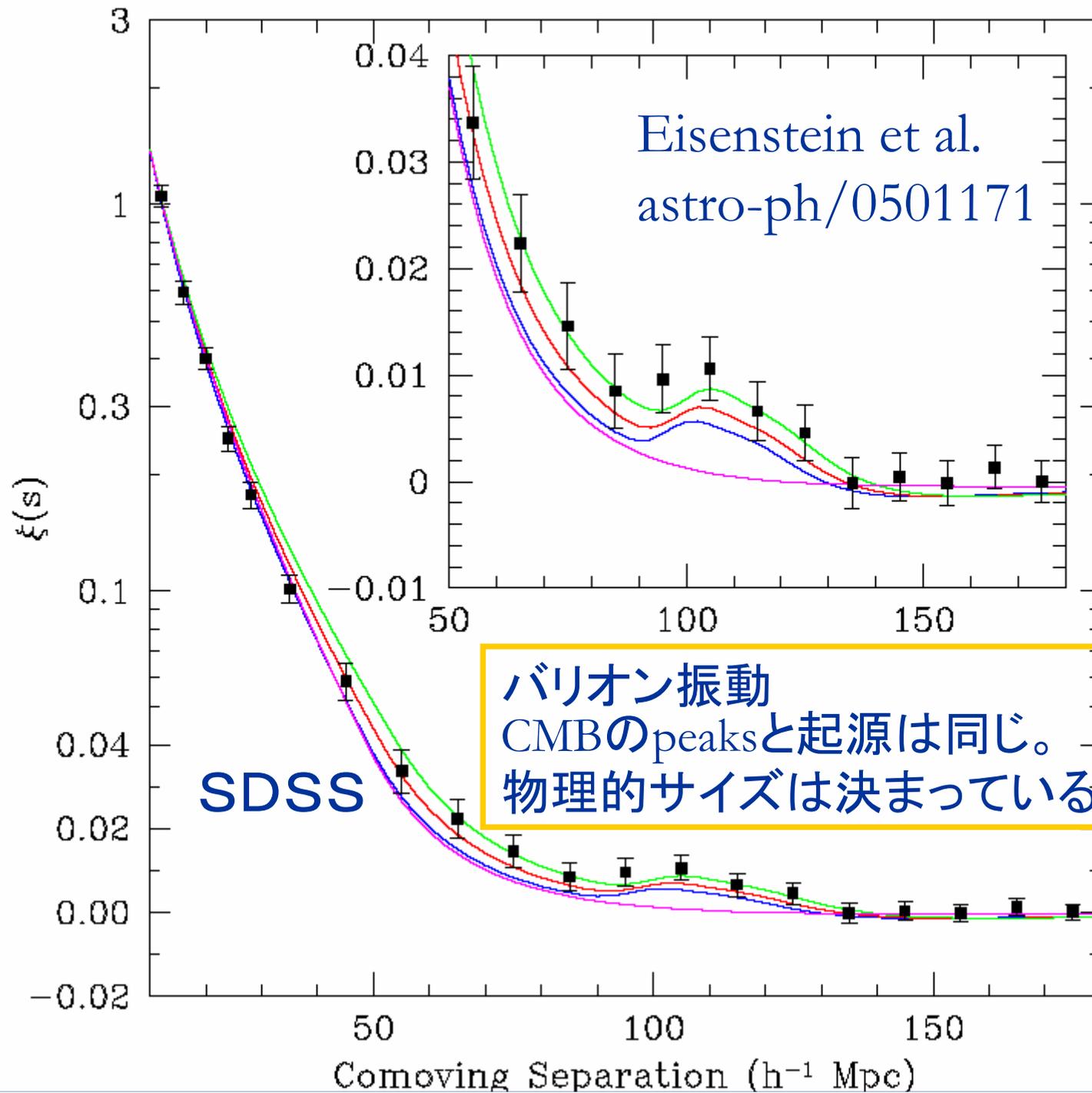
赤方偏移

宇宙の大規模構造(一つの点が銀河！)

#z = 175019





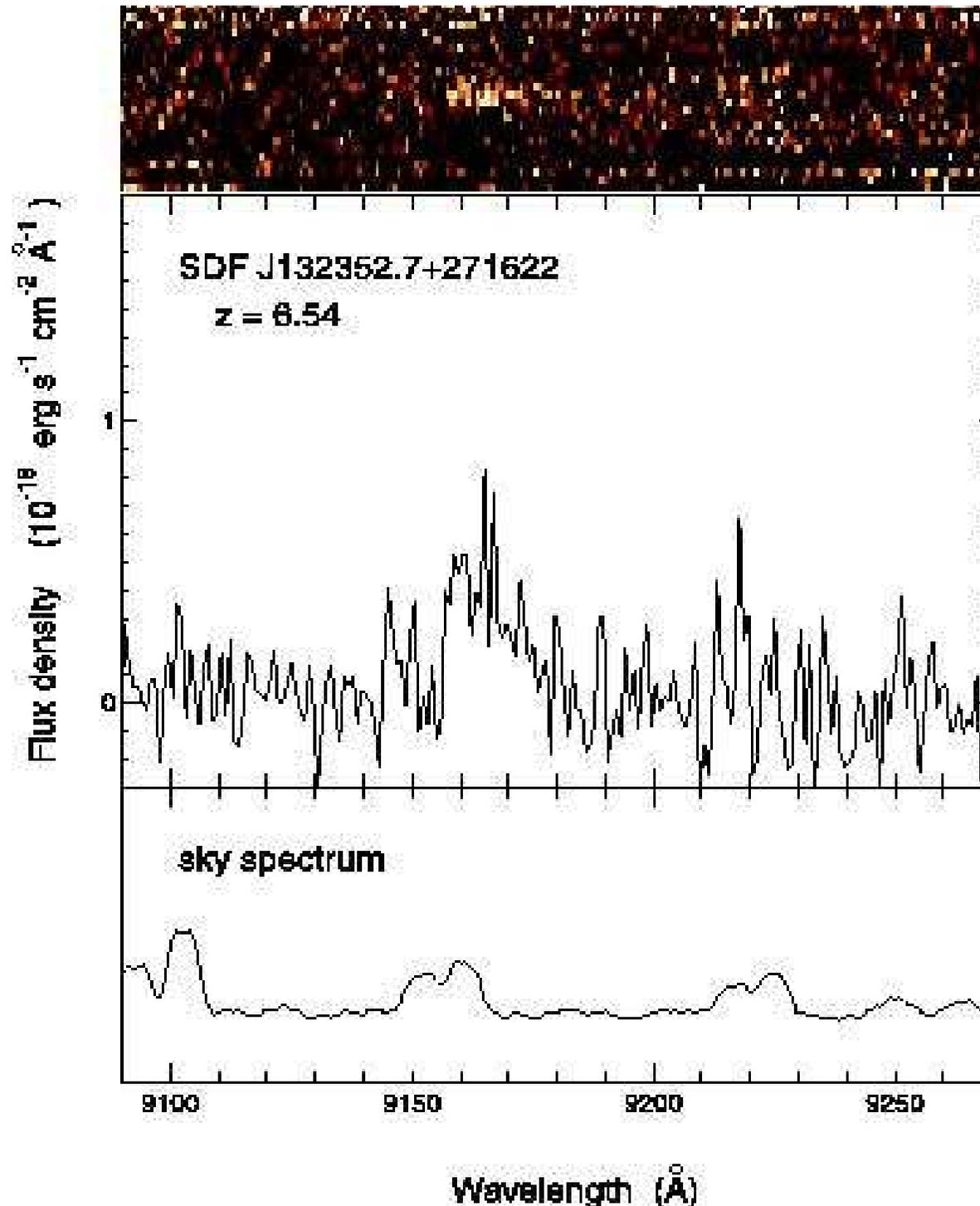


もはるの発見した最遠方の銀河



Subaru Deep Field: The Most Distant Galaxy Known

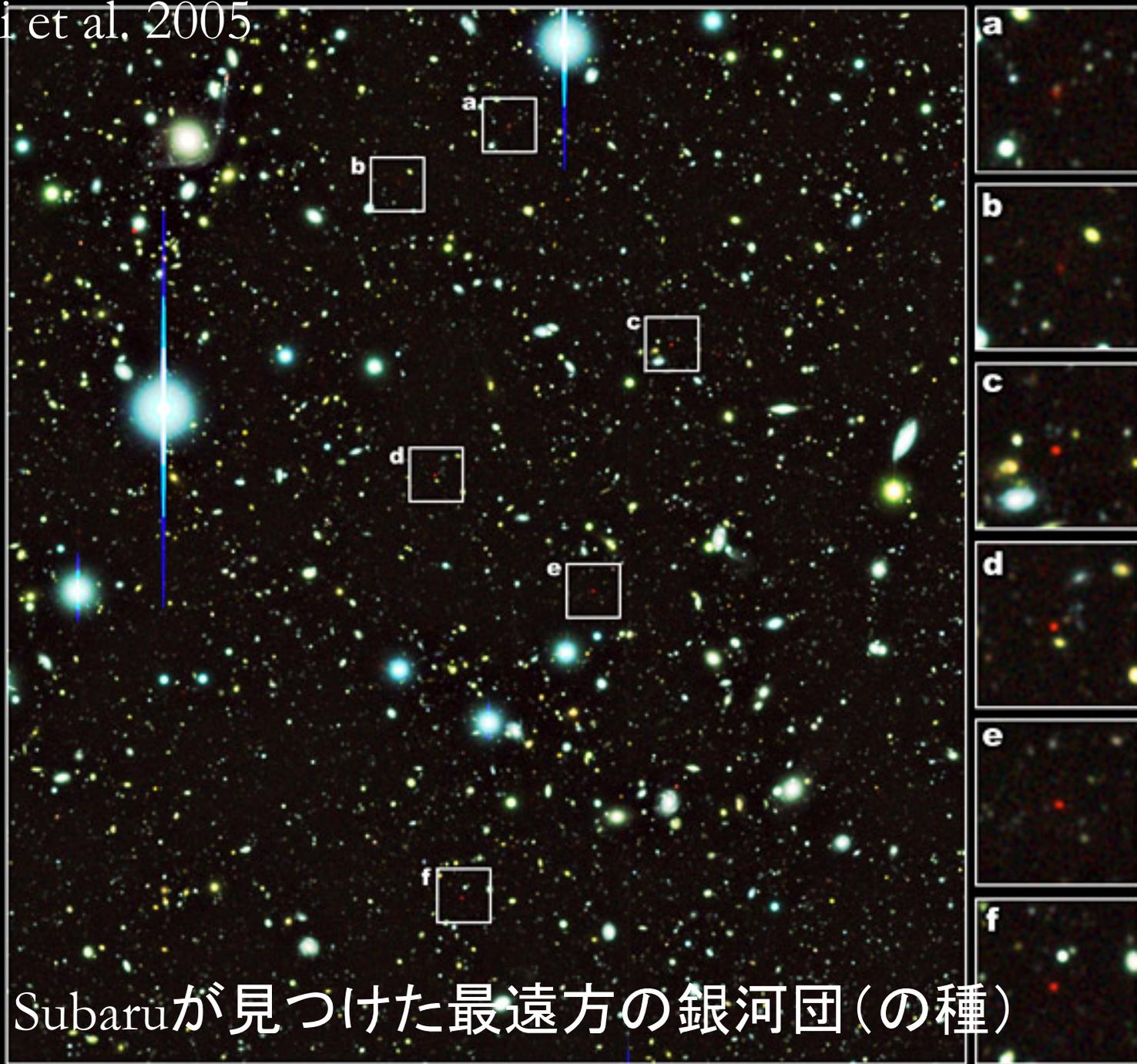




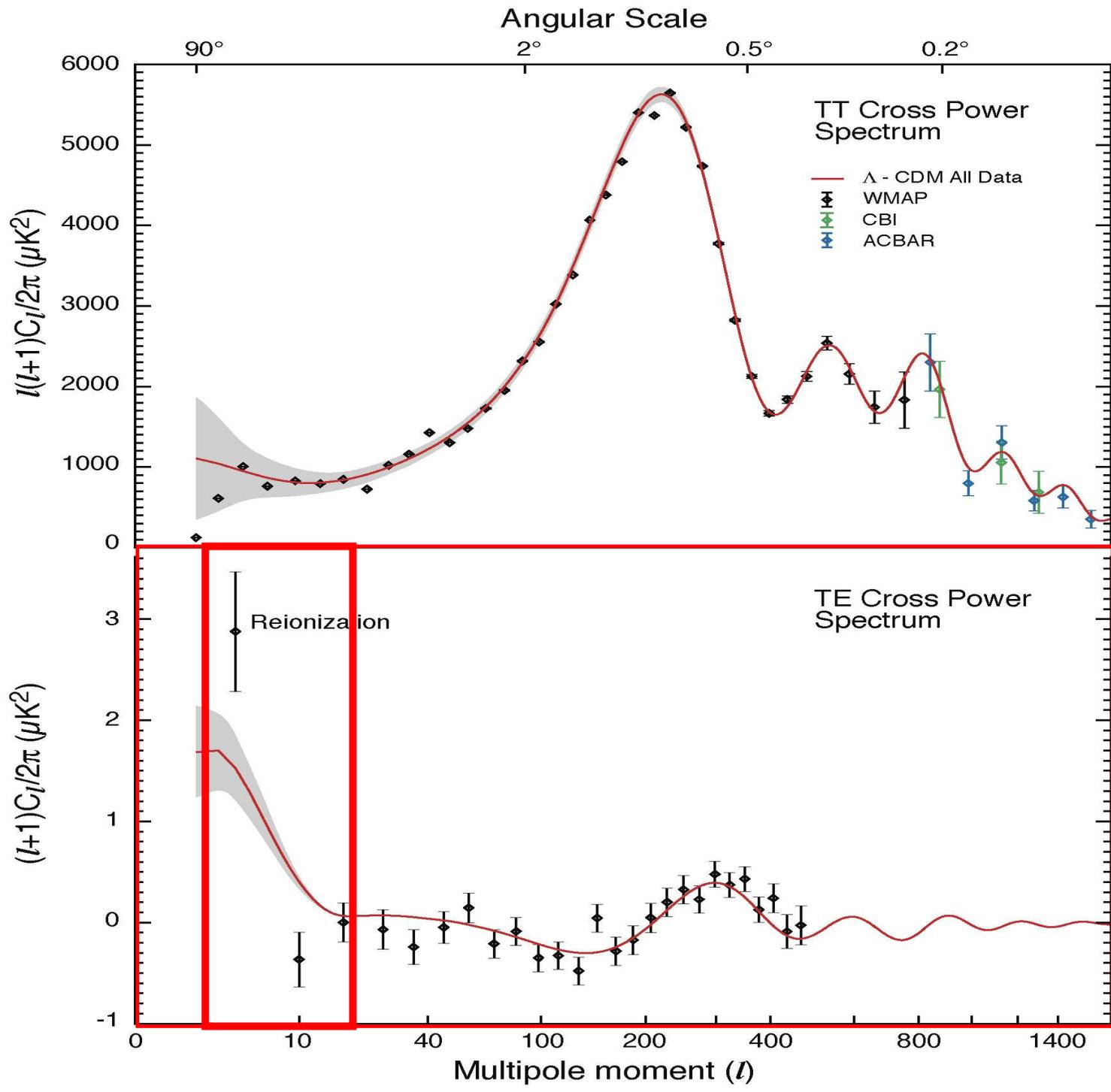
すばるで見つけた
 $z \sim 6.6$ でのLy-
alpha emitter 9
個のうちの一つ

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

Ouchi et al. 2005

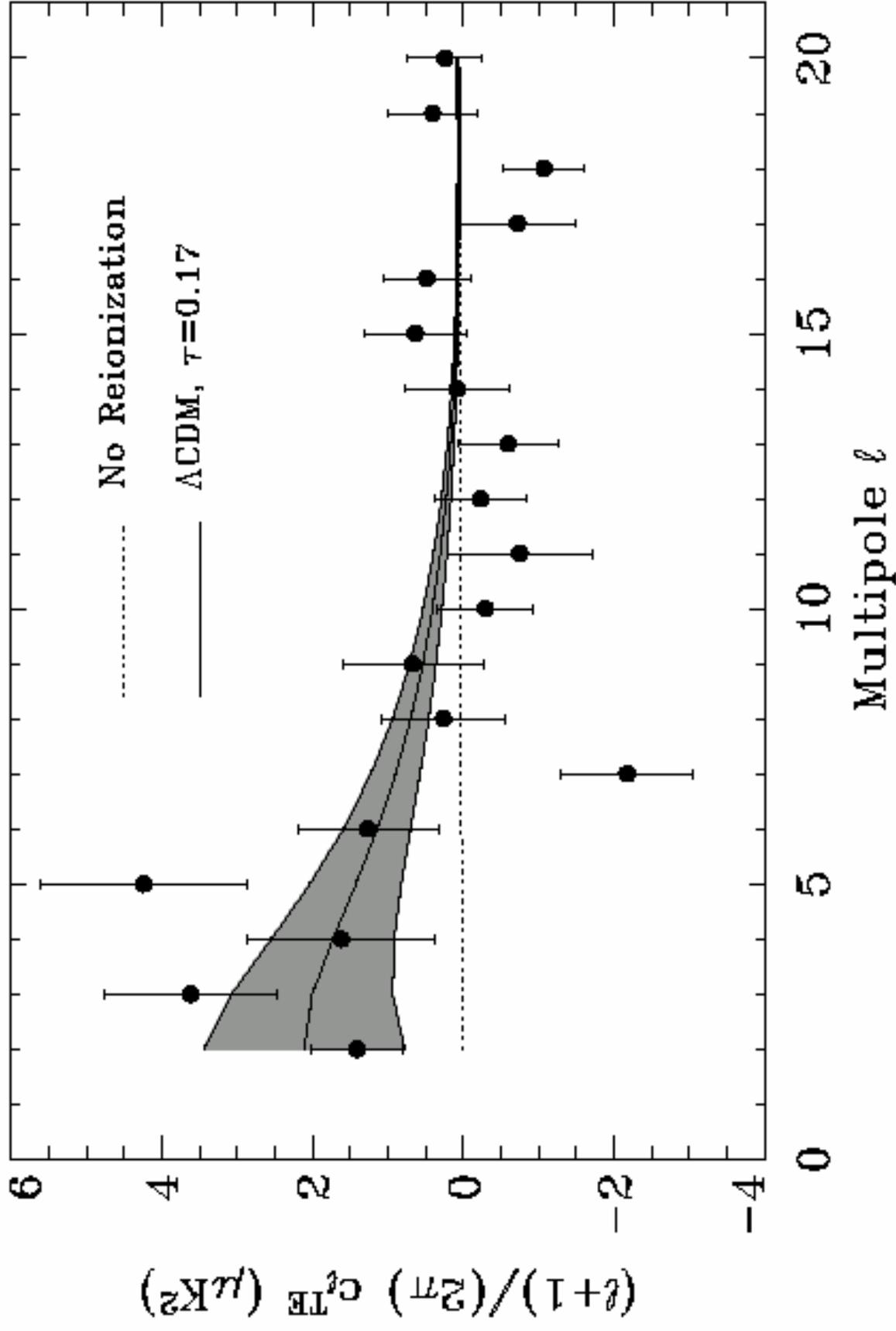


Subaruが見つけた最遠方の銀河団(の種)



Obs. of WMAP

Temp-Pol



First Star Formation Epoch was $z=20$

Detect Reionization from polarization

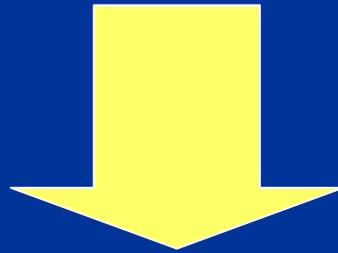
$$\tau = 0.166_{-0.071}^{+0.076} (\text{WMAP}) \quad \text{Optical Depth from present epoch}$$
$$= 0.17 \pm 0.04 (\text{all})$$

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

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

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: 最初の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、 ρ 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



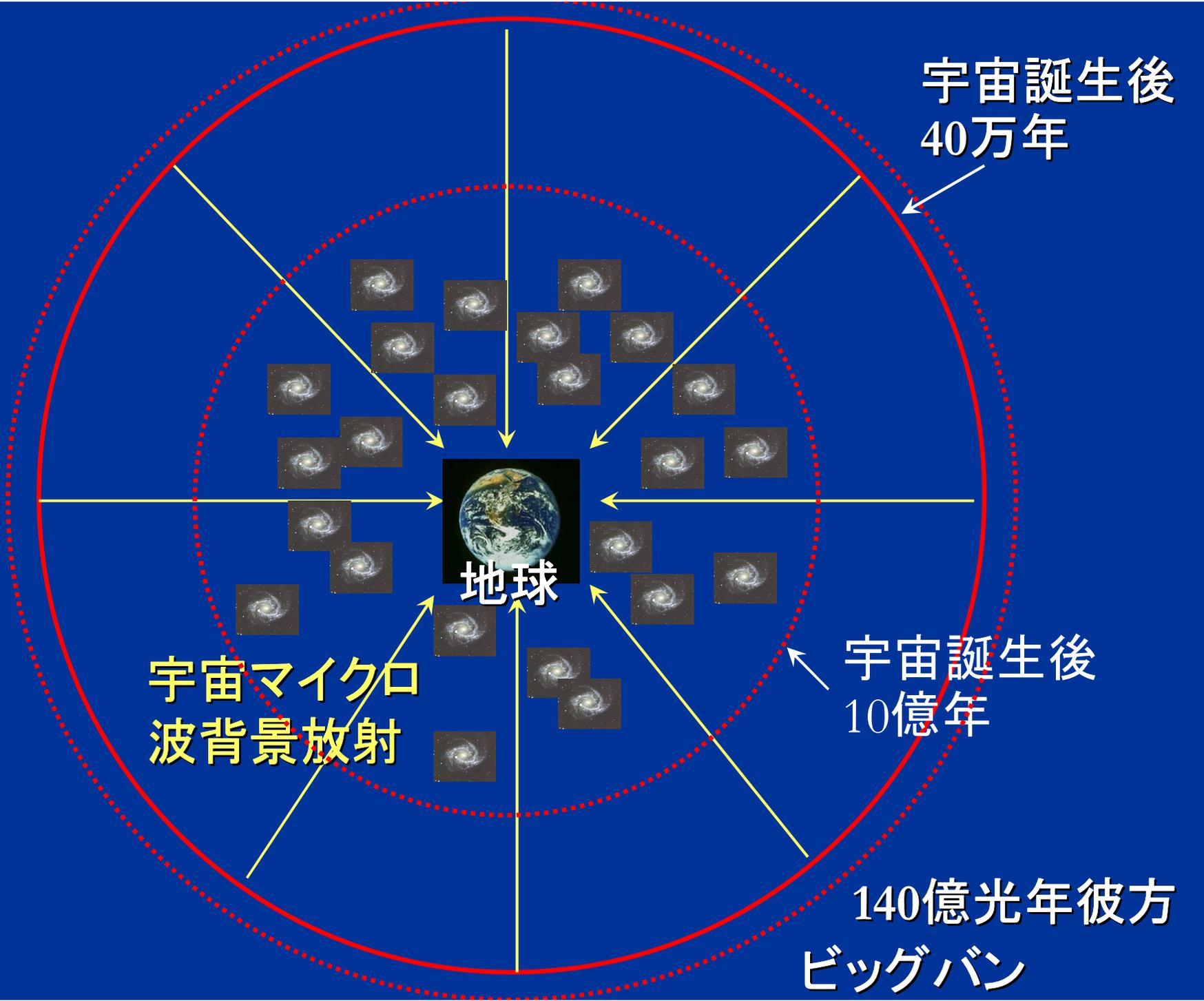
宇宙誕生後
40万年

宇宙誕生後
10億年

140億光年彼方
ビッグバン

宇宙マイクロ
波背景放射

地球



■ 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

■ 21 cm線によるbrightness Temp.の揺らぎ

■ CMBの衛星

■ 21 cm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

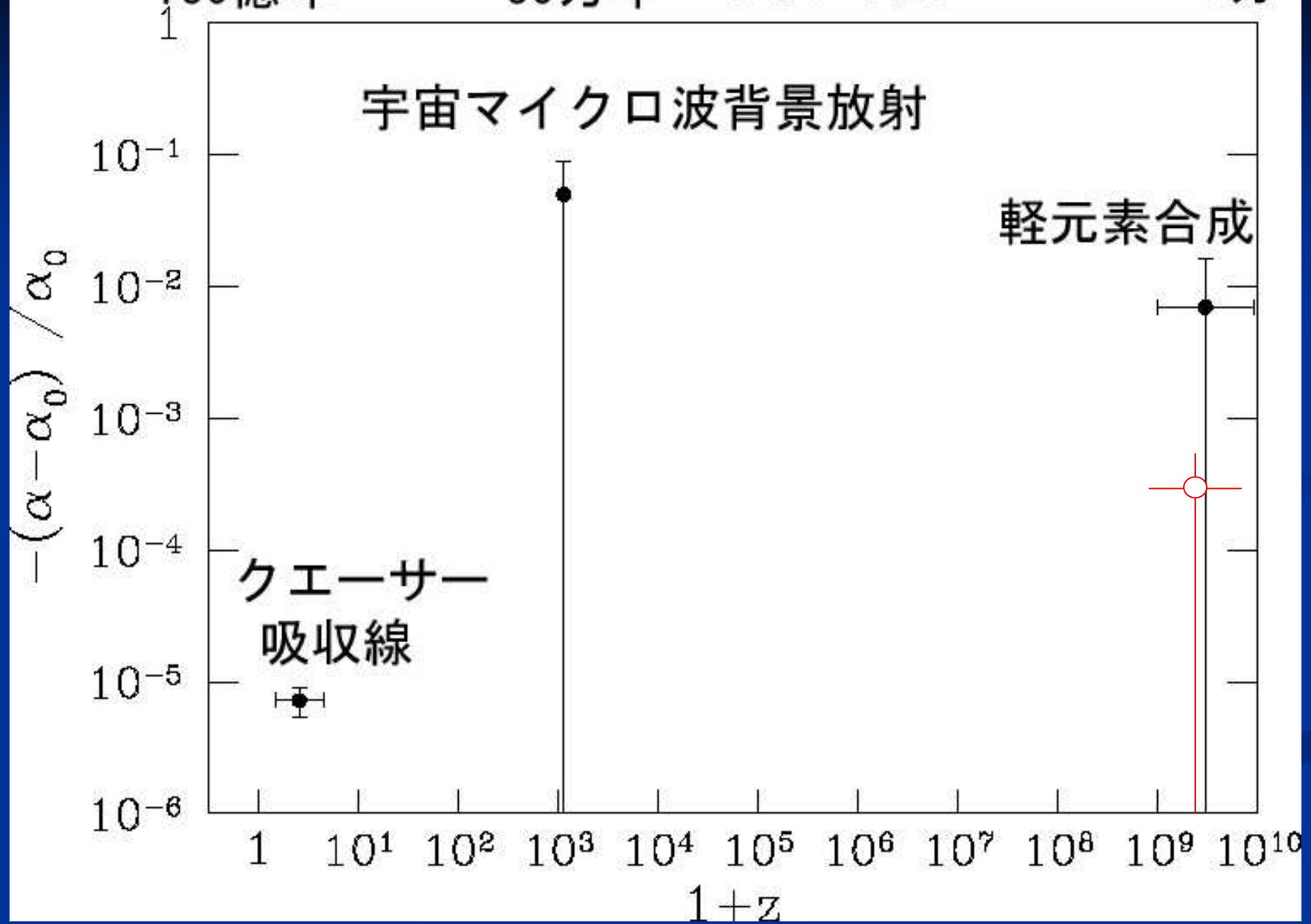
■ 20-30mクラスの次世代巨大望遠鏡: 次世代Keck望遠鏡

■ 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

世界の大型望遠鏡(口径6.5m以上)



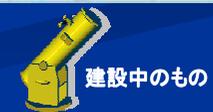
Large Binocular Telescope(LBT)
8.4m x 2 Mt.Grahamに建設中



13台完成+3台建設中

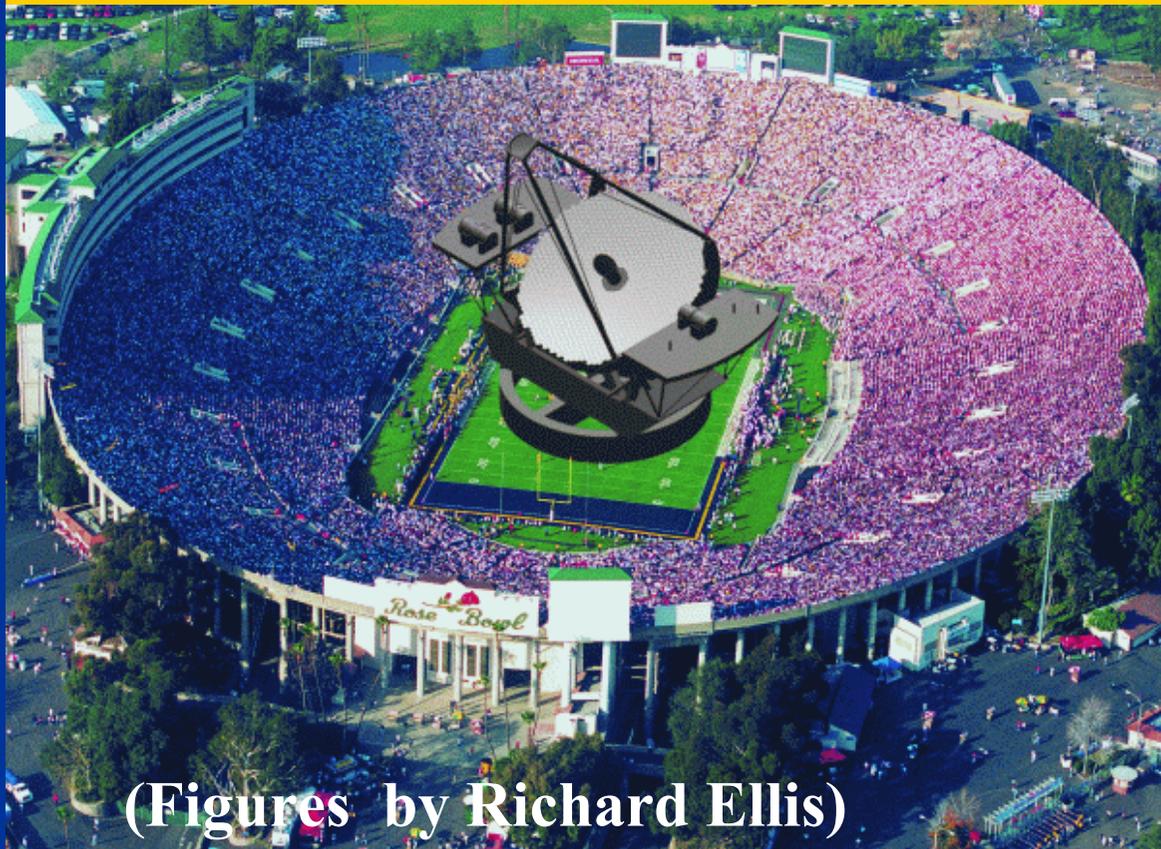
さらに18台の3m-6m望遠鏡(理科年表による)、より多くの小型望遠鏡

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)



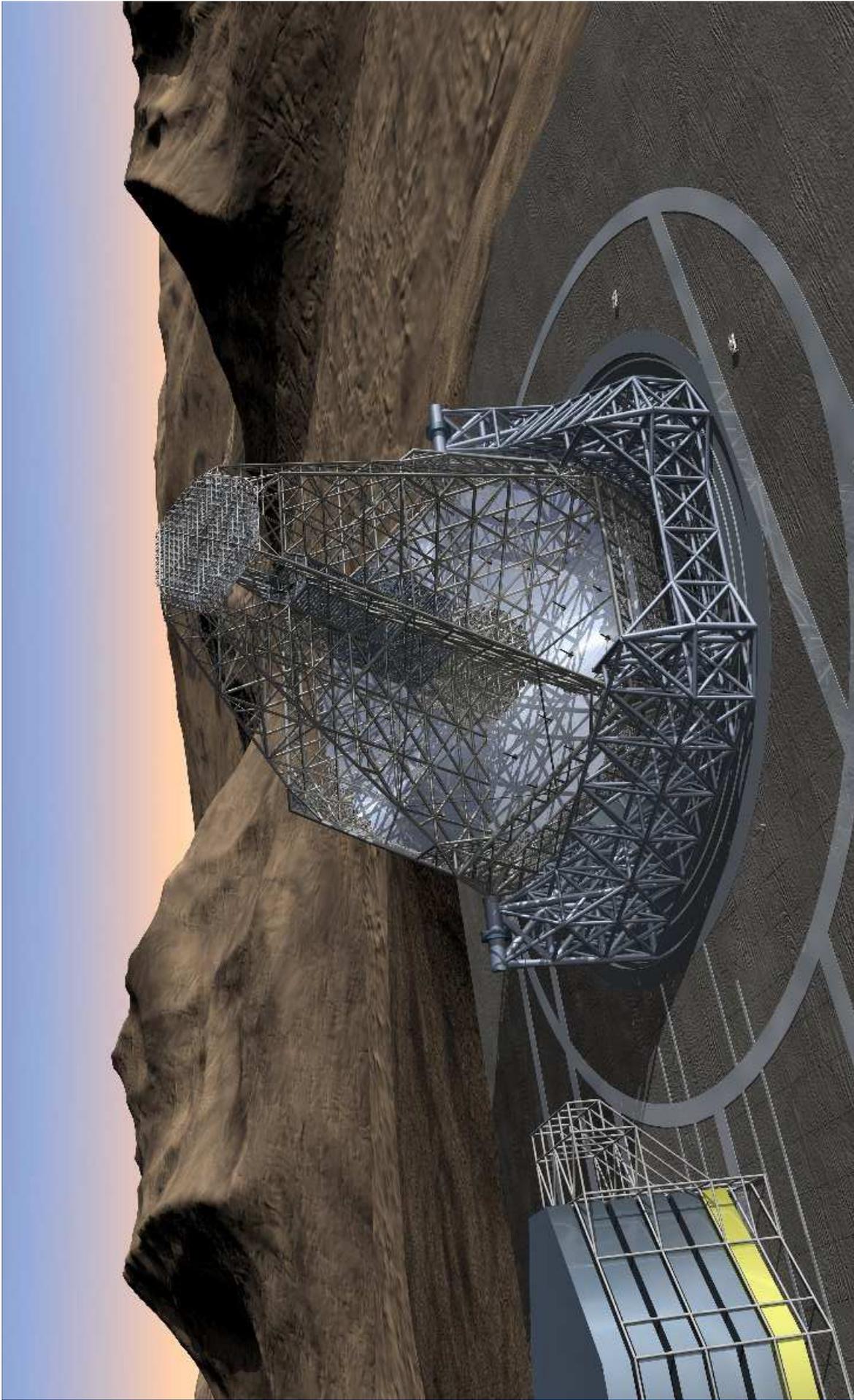
HST



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

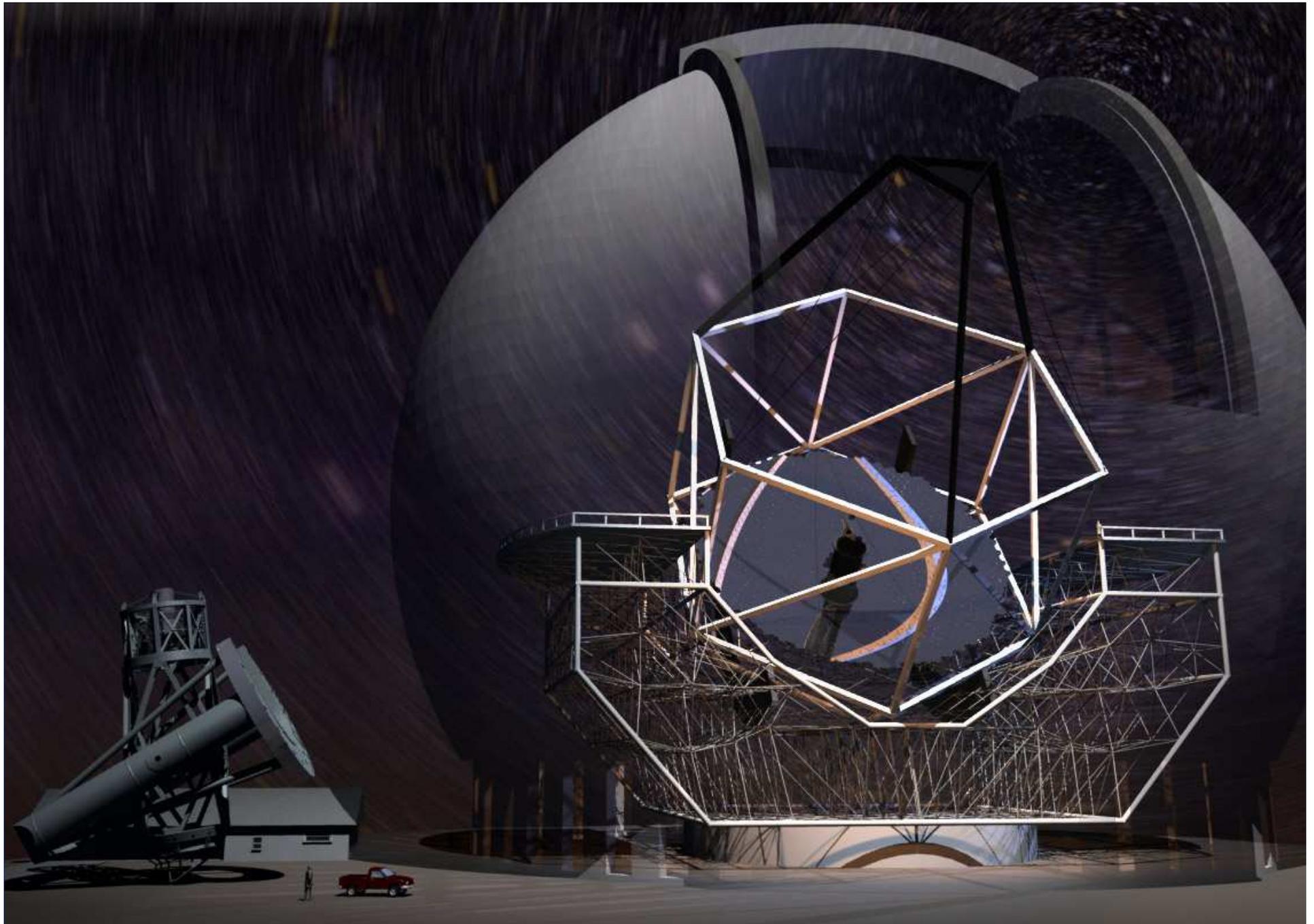
■ 予算

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)

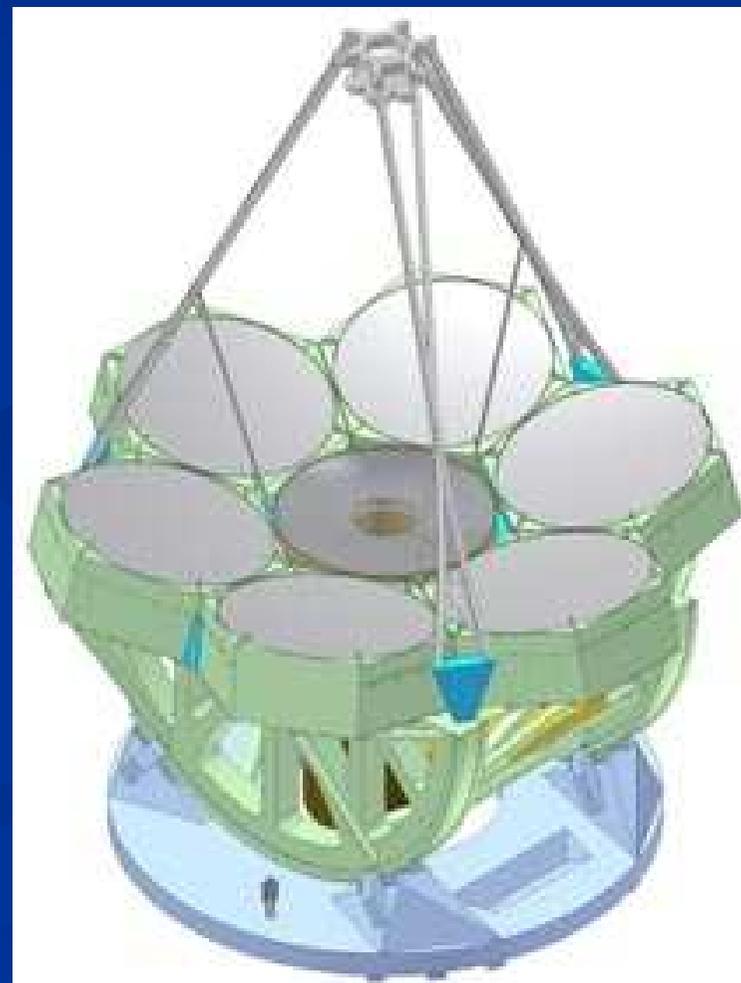
日本の参画検討中



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!)

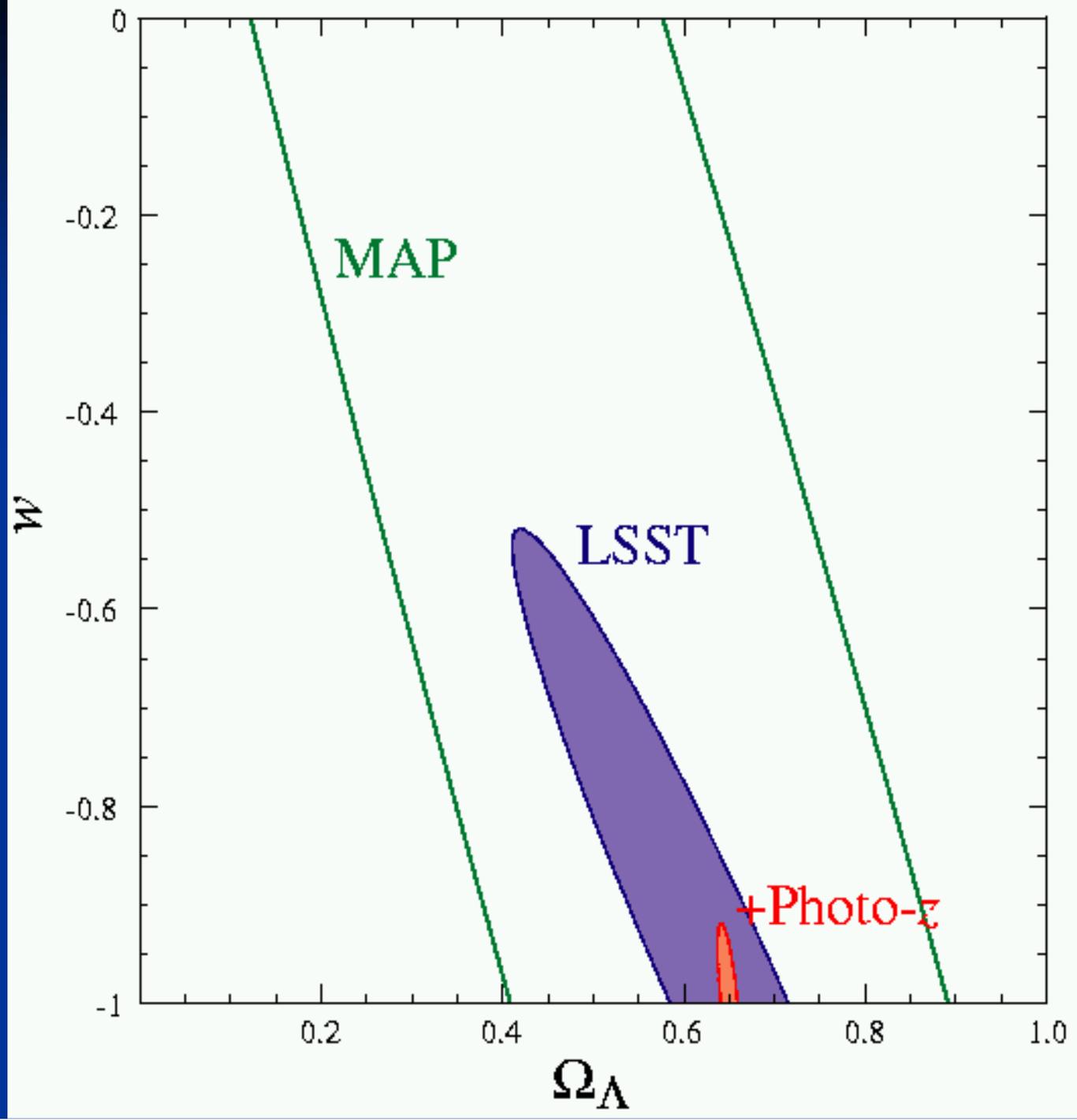
■ Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

- 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日間で見ること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	$A\Omega$	First Light
	D [m]	A [m ²]	F		Format	N_{CCD}	Ω [deg ²]		
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 ^a
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	0.256	13.17	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 ^b	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 deg² 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

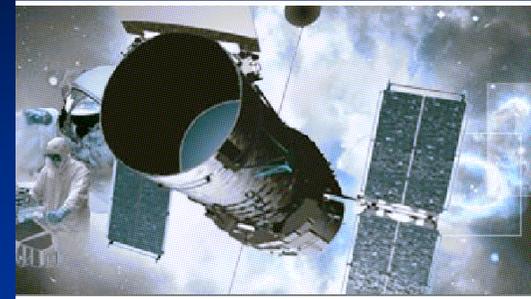
WF MOSのサイエンスと利点

- 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
(0.115μ)～ 2.5μ



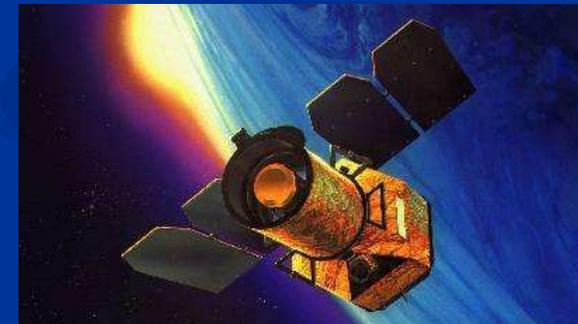
Spitzer Space Telescope

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



GALEX 紫外

口径50cm
 $0.135\sim 0.280\mu\text{m}$



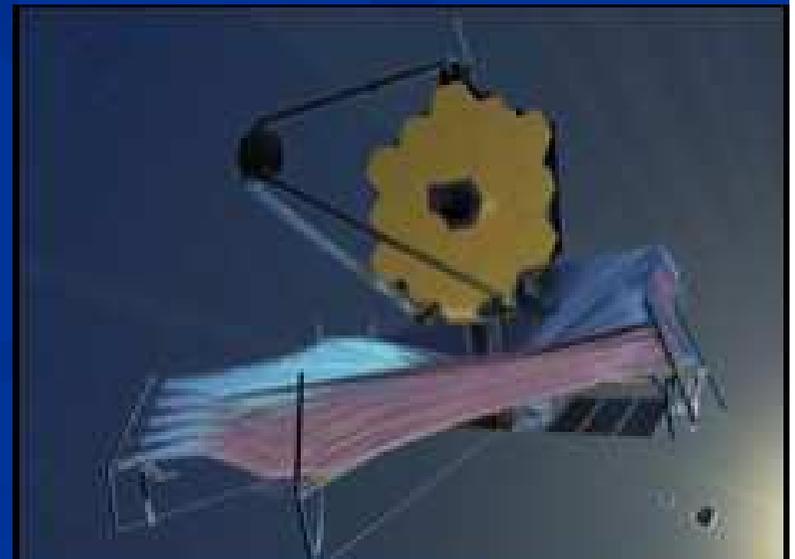
Astro-F (来年1月) 近赤外～遠赤外

口径67cm
 $2\sim 200\mu\text{m}$



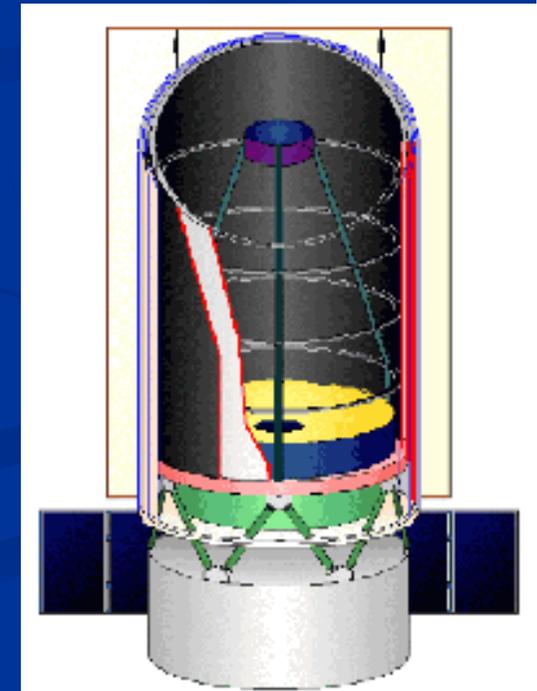
光・赤外Space望遠鏡将来計画

- 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 μ m)のカメラNIRCam、近赤外のmulti-object spectrograph (NIRSpec、中間赤外(2.4-5 μ 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 μm

- 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.

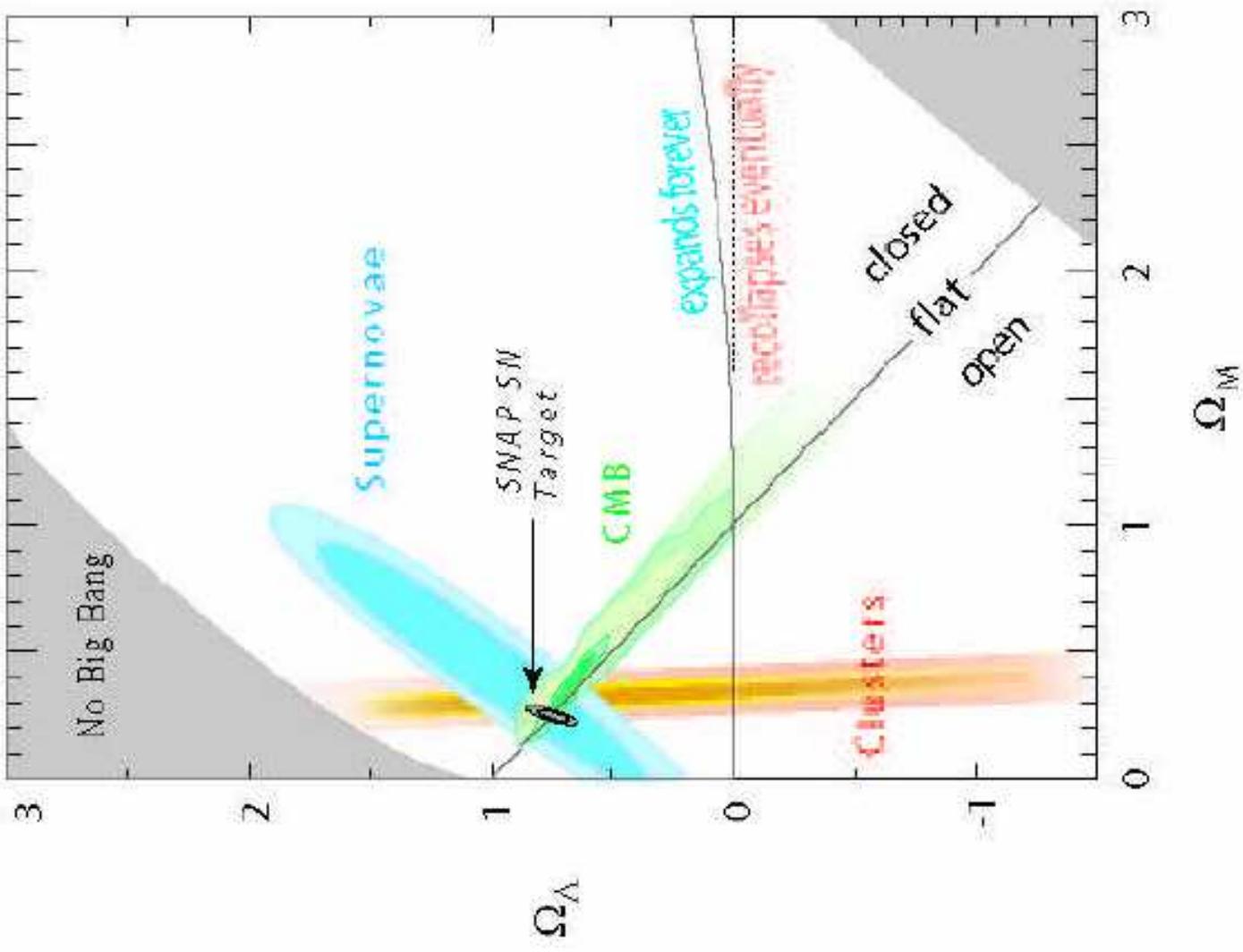
- Astrochemistry (the formation of chemicals in space)

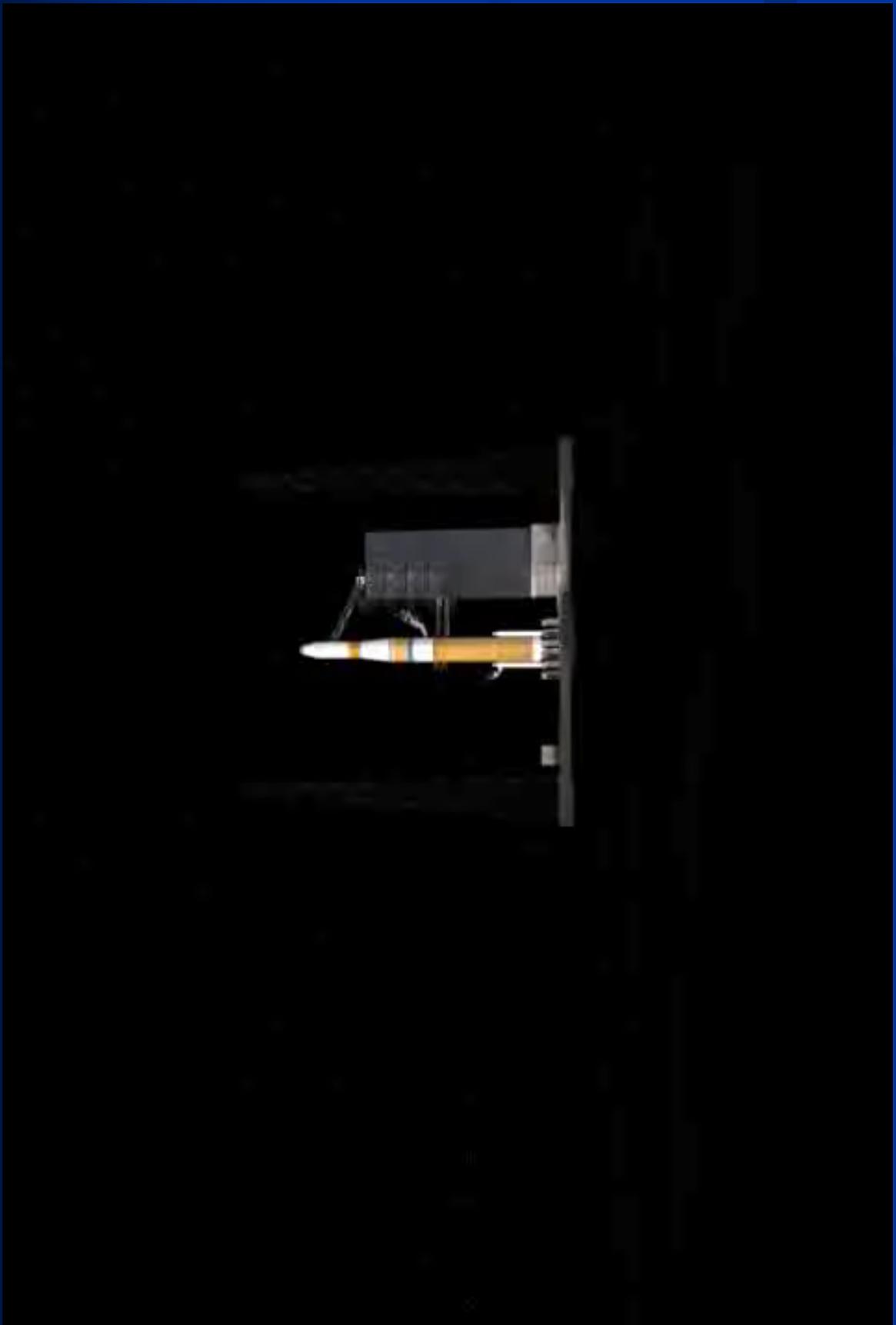


■ SNAP: Supernova/Acceleration Probe

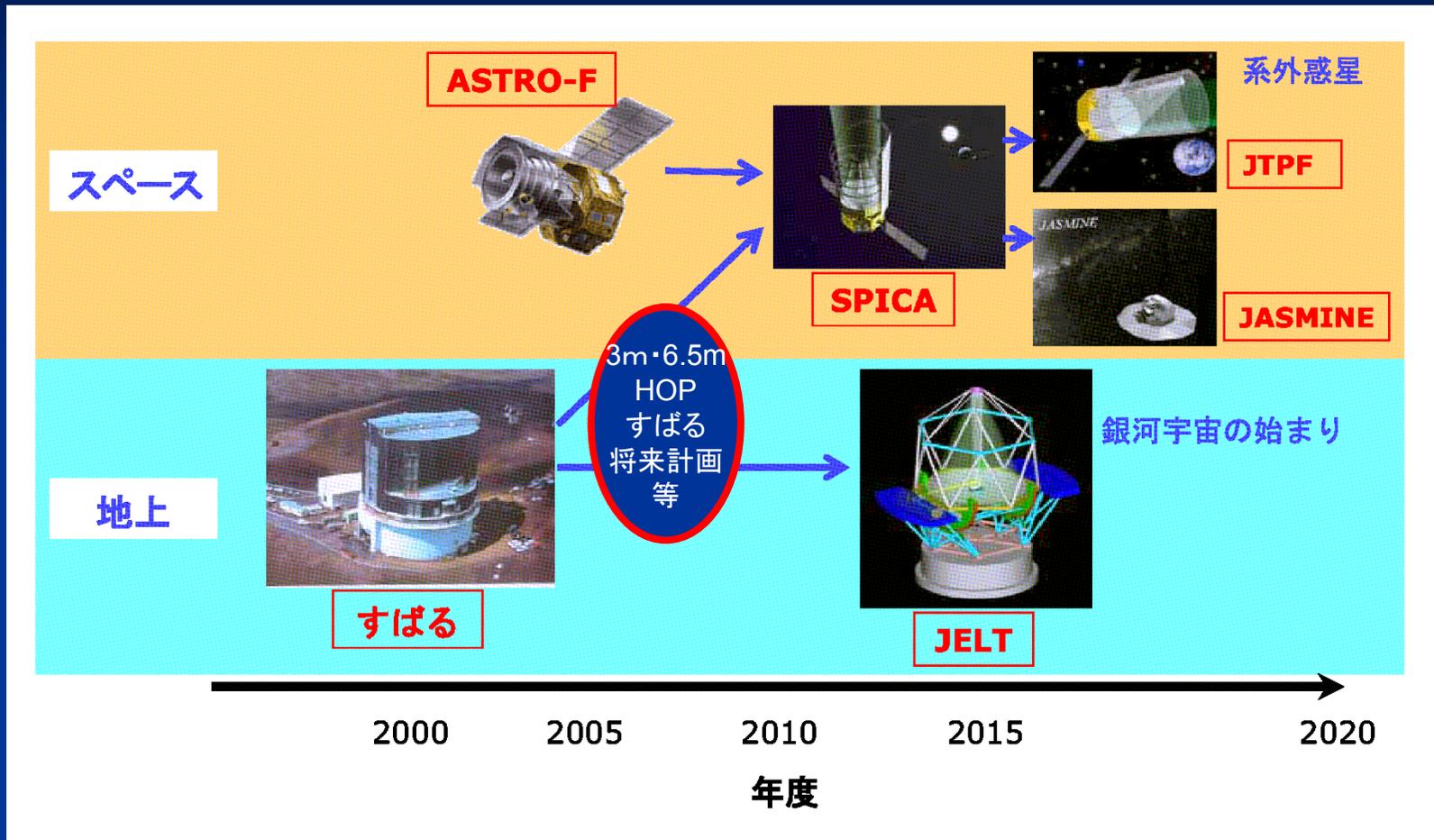
またはJDEM: Joint Dark Energy Mission

- 口径2m
- 視野0.34square degree、411Mpixels
- 波長は0.35-1.7 μm (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~1000square 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



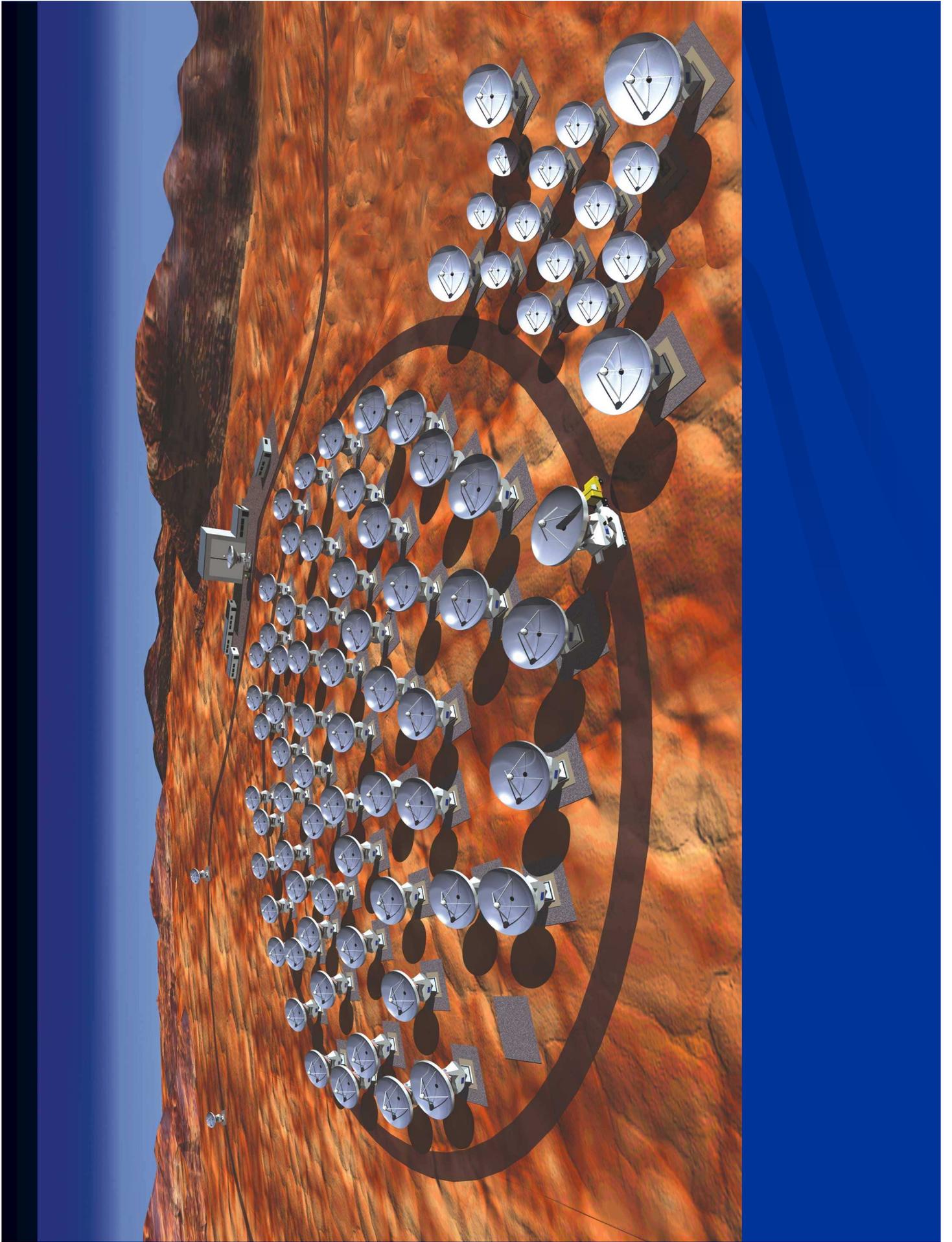
将来計画検討報告書「2010年代の光赤外線天文学」より

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

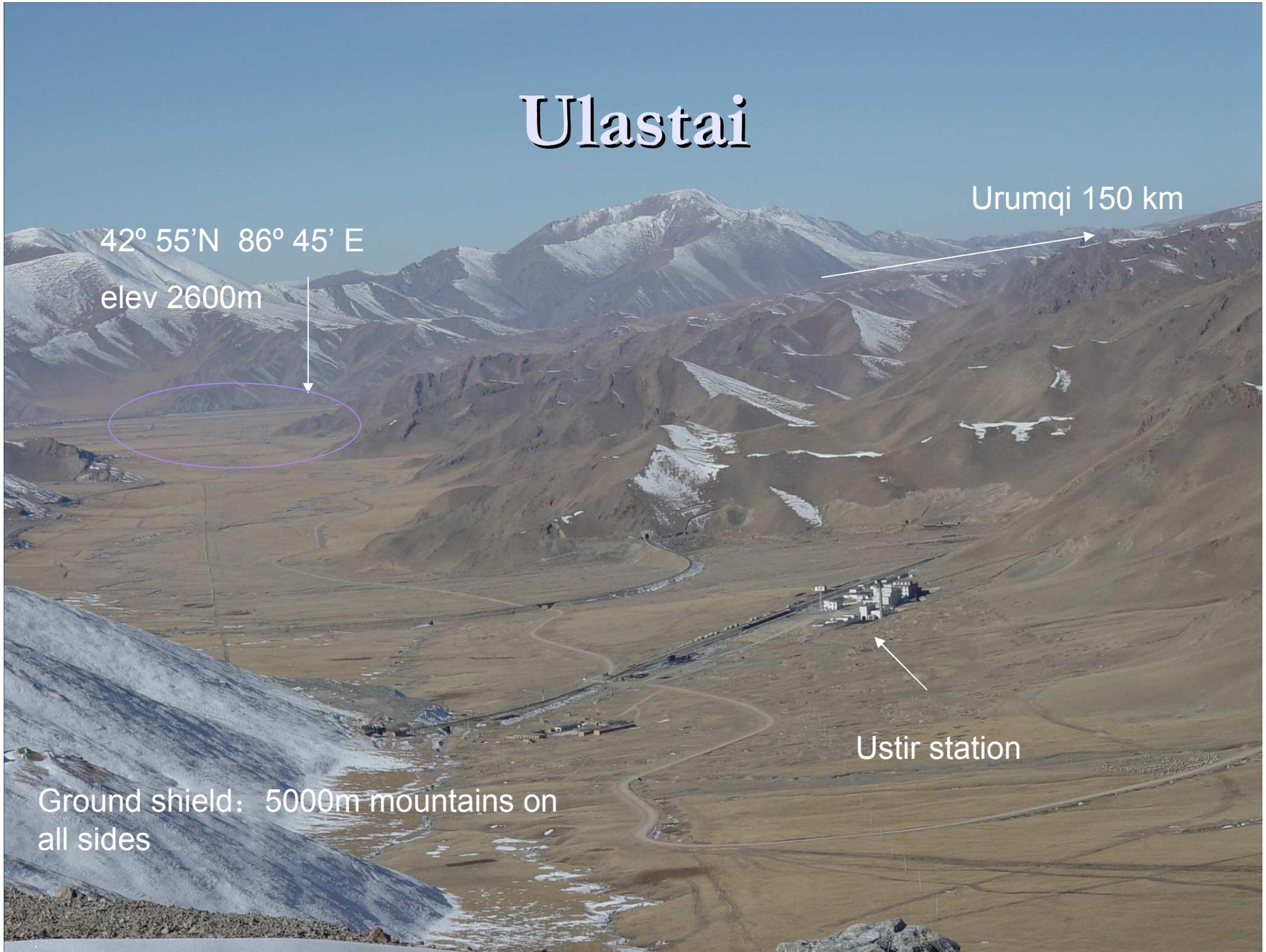
Ulastai

42° 55' N 86° 45' E
elev 2600m

Urumqi 150 km

Ustir station

Ground shield: 5000m mountains on all sides

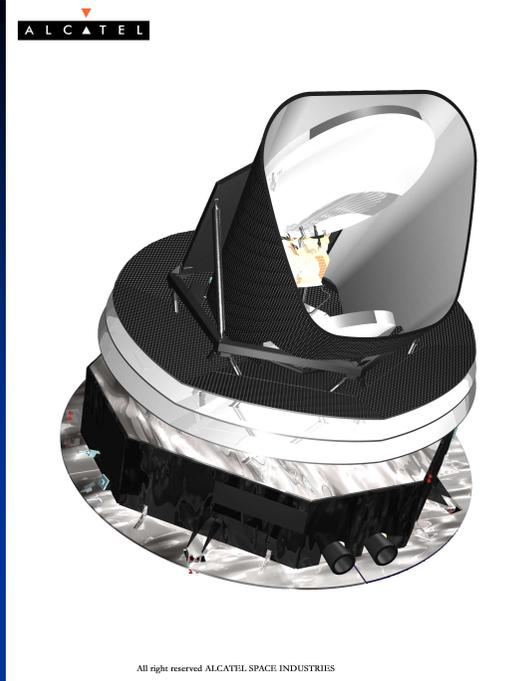


SKA: Square Kilometer Array

- ALMAの次の巨大プロジェクト
- 周波数はALMAより下
- 1km² 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

■ γ 線

■ GLAST

■ 5 at 5?

電磁波以外

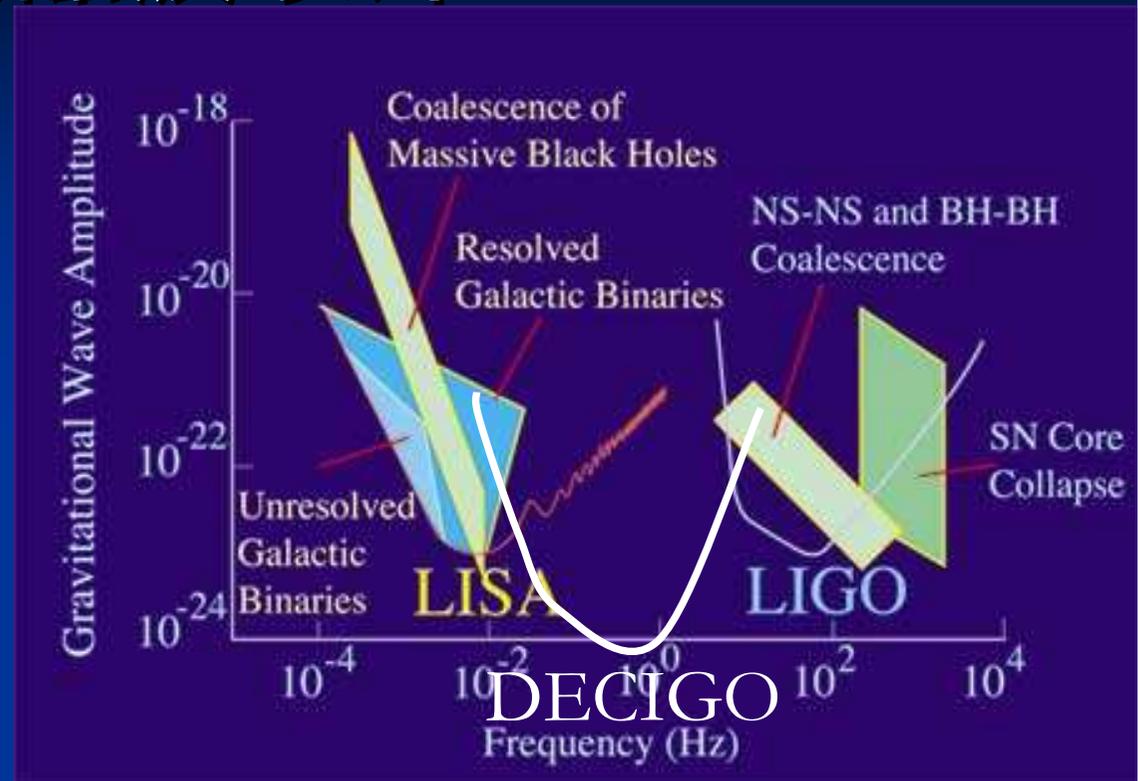
■ 重力波

■ 地上

- Advanced LIGO
- LCGT (日本)

■ スペース

- LISA (米欧)
- DECIGO/Big Bang Observer



Beyond Einstein

INFLATION
PROBE

NASAのroad map

MAP

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-117

~~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 31 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