



電波天文分野 の将来計画

国立天文台

阪本成一、井上 允



電波天文大型計画

■ ALMA

- 建設を開始したが、コミュニティーに今後大きなインパクトを持つ計画

■ VSOP-2

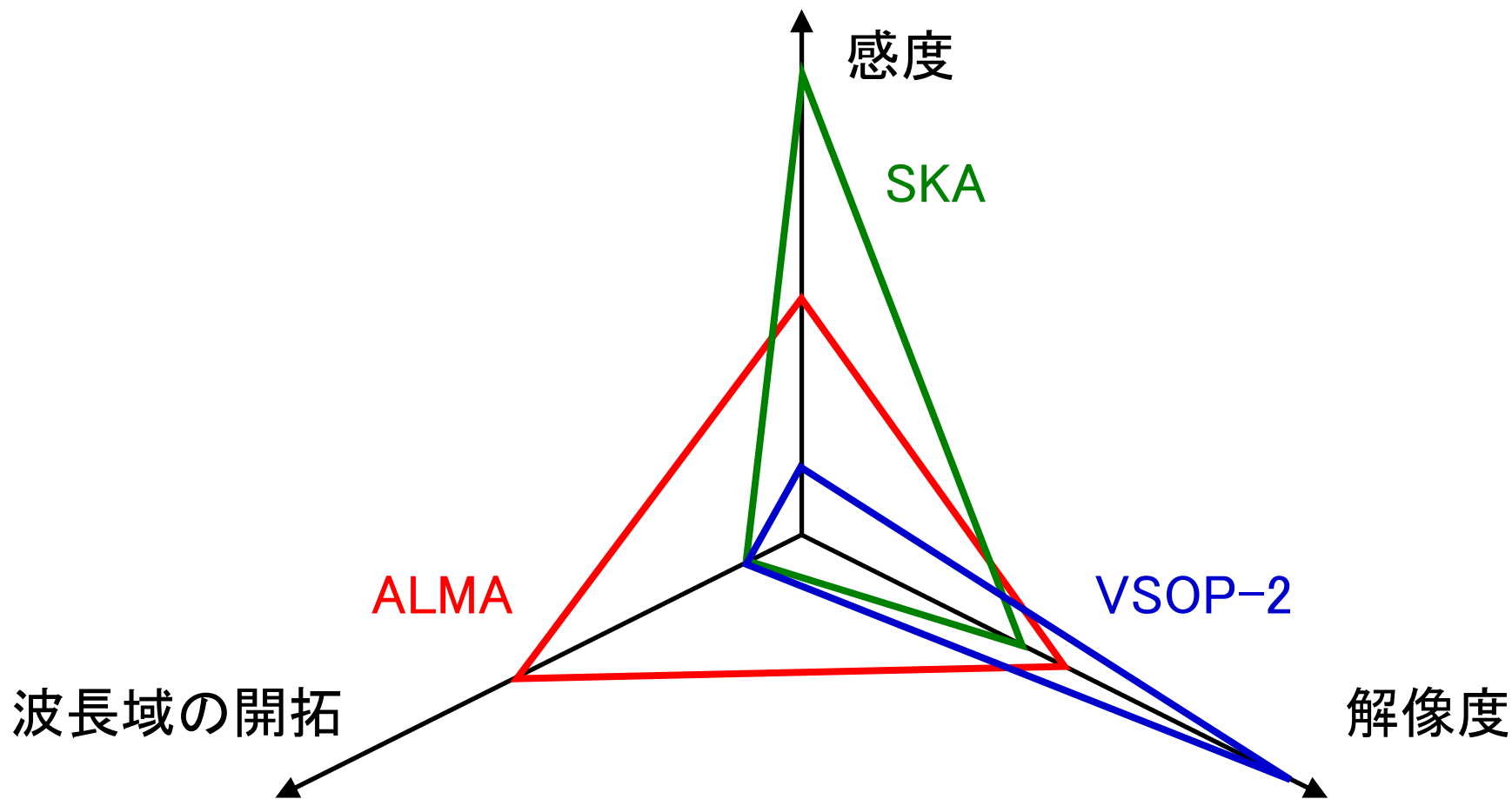
- 予算要求のための提案準備

■ SKA

- ALMAに次ぐ大型国際計画。日本のコミット？



装置の特徴



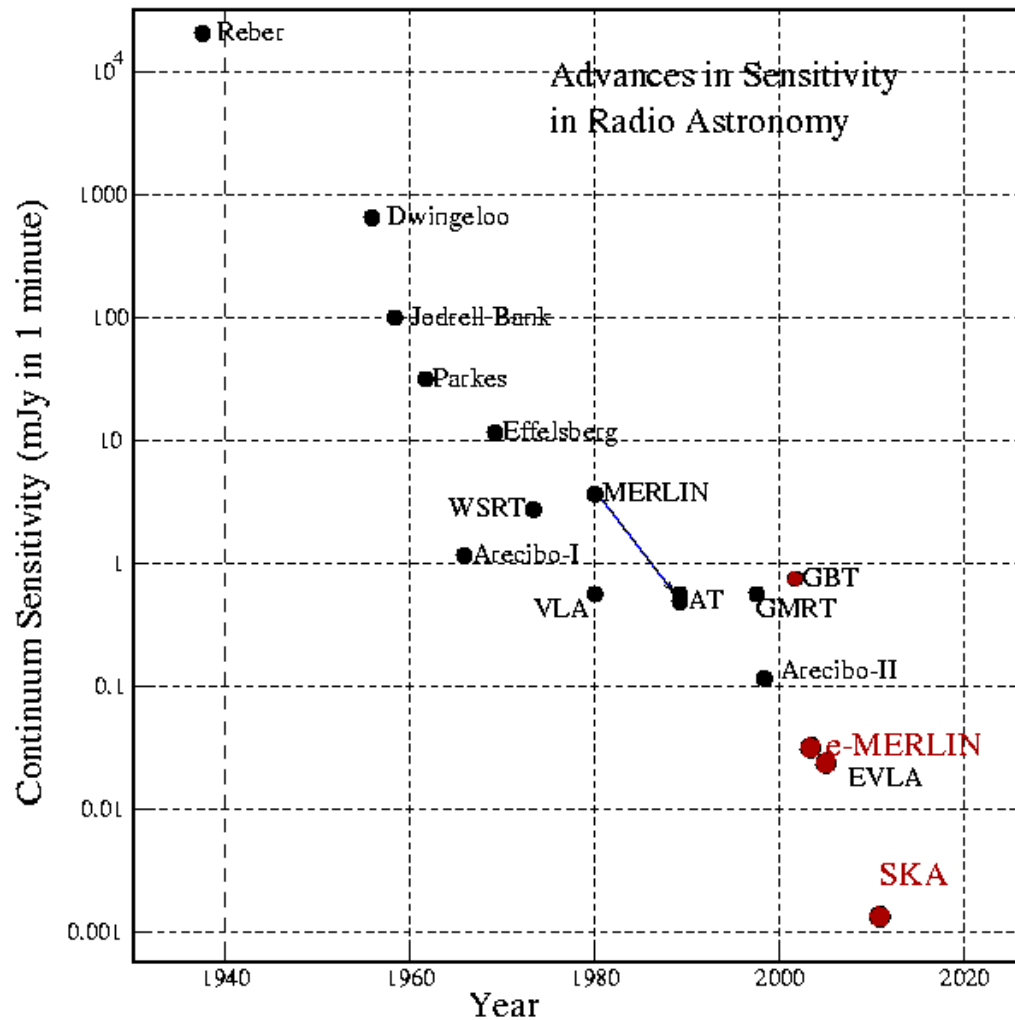


電波天文における発明・発見

- 宇宙電波 (1931年)
- 開口合成法 (1946年)
- 水素原子21cm線 (1951年)
- 銀河シンクロトン放射 (1953年)
- メーザー (1953年)
- 電波銀河 (1960年)
- QSO (1963年)
- マイクロ波背景放射 (1965年)
- パルサー (1967年)
- 多数の星間分子 (1968年)
- 連星系パルサーと重力波 (1974年)
- メガメーザーと巨大質量BH (1995年)
- WMAPの宇宙論 (2003年)
- ほとんどの偉大な発見は、偶然幸運に得られた。
- 幸運な発見へと導いた装置は、その兆候を逃さないだけの十分な性能を持っていた。

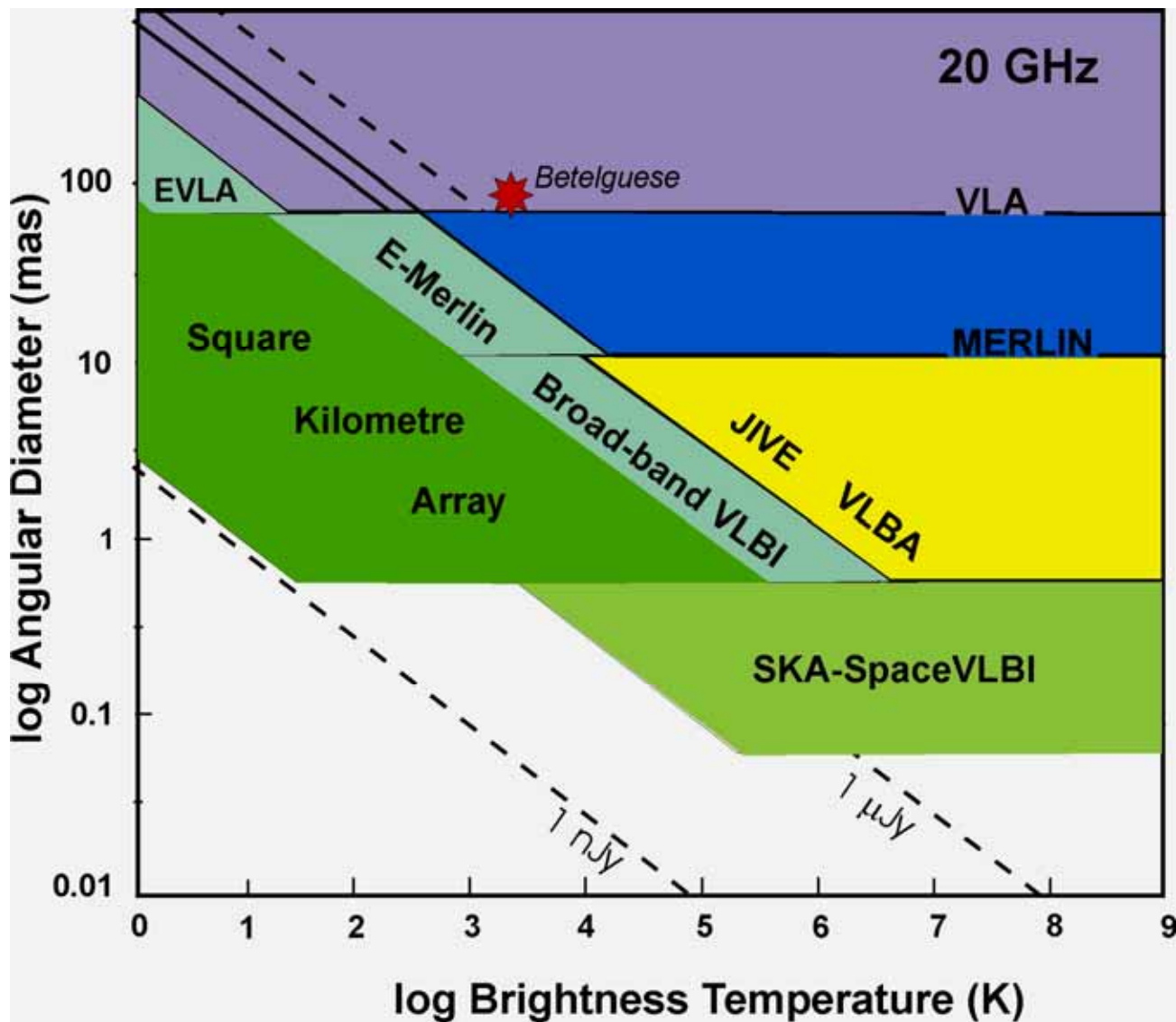


観測感度の向上



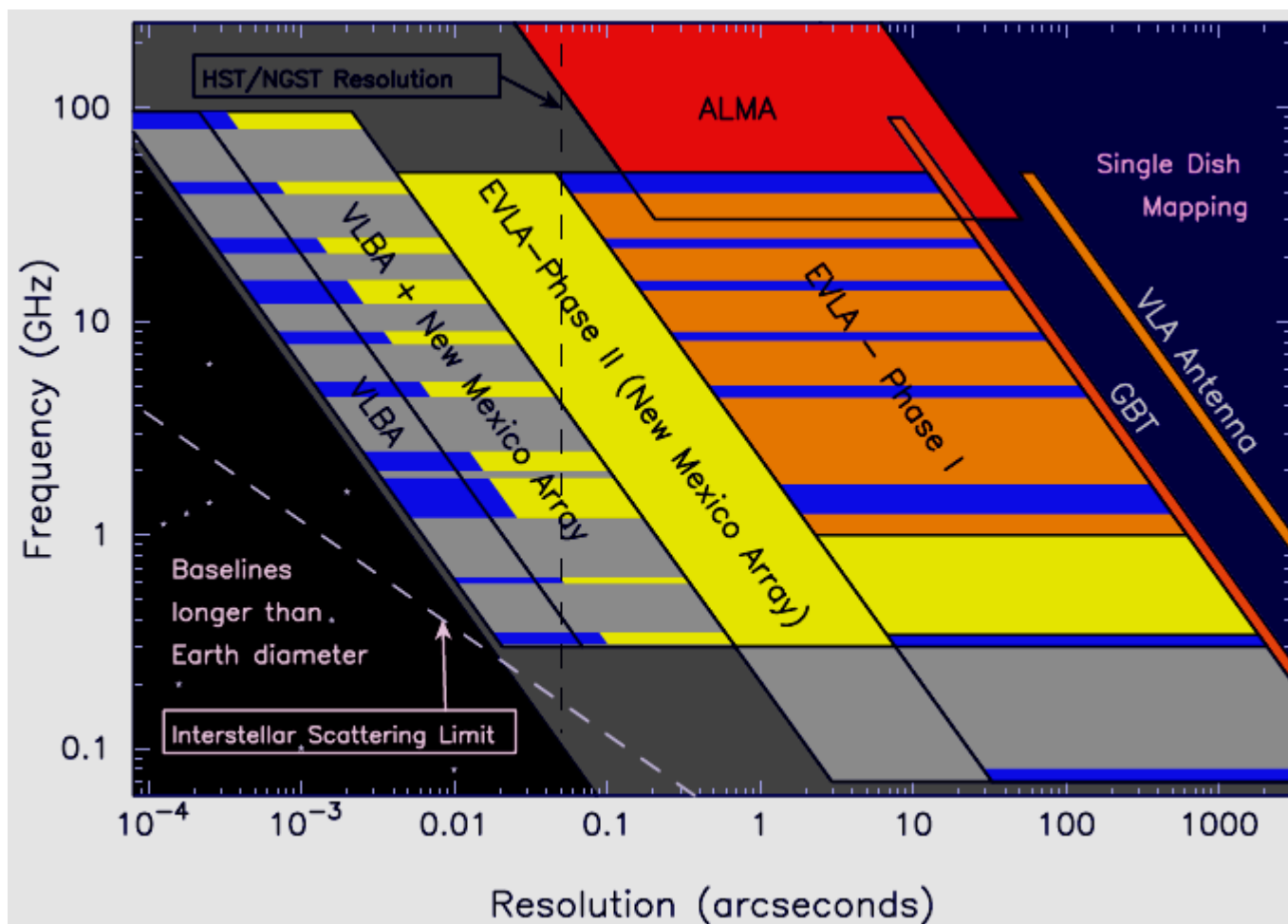


分解能と輝度温度

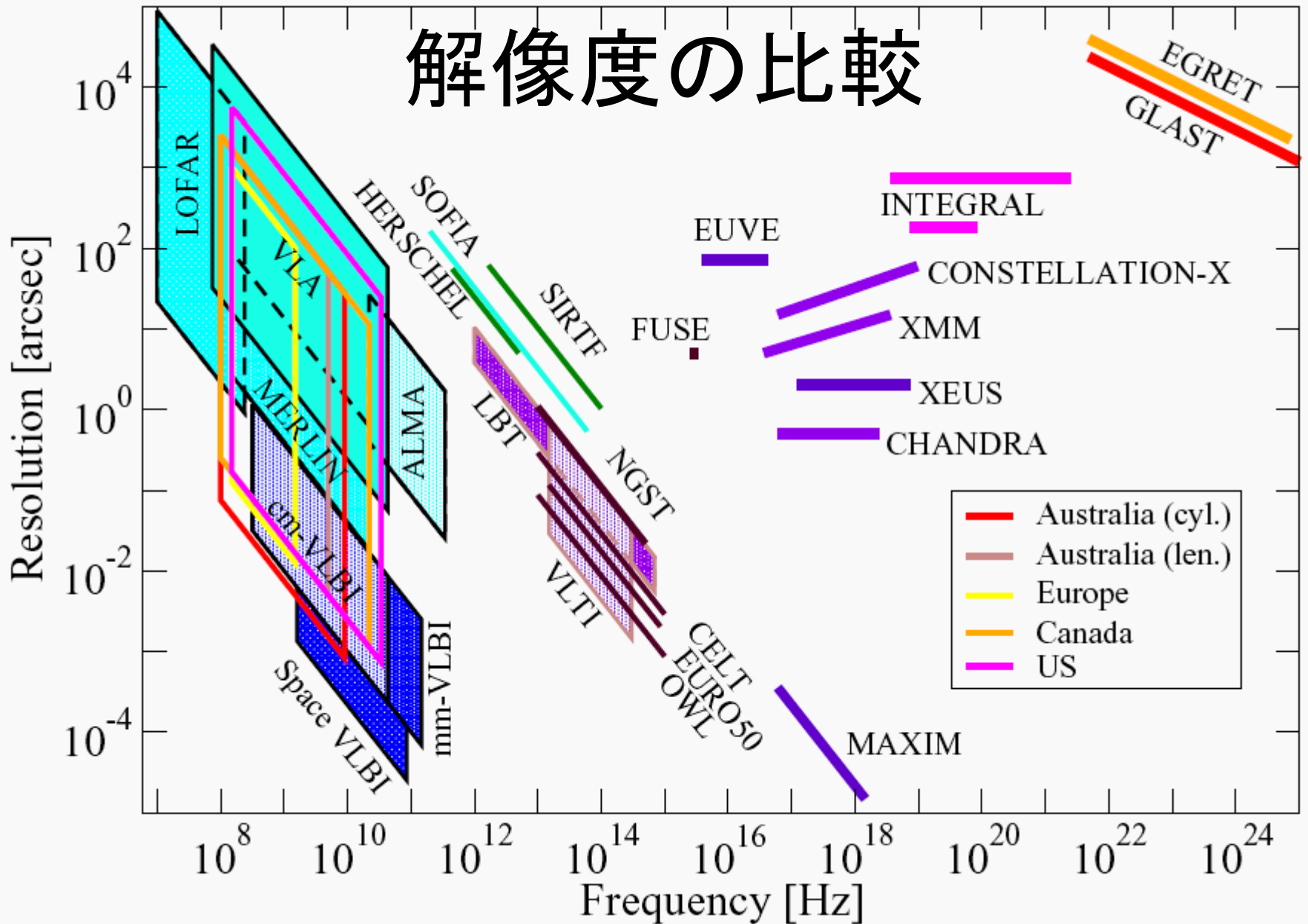




分解能と周波数範囲



解像度の比較





電波の放射メカニズム

超微細構造線¹² L_{bol} galaxy at z=0.1, 0.5, 1, 3, 5 and 10
 (原子ガス・線)

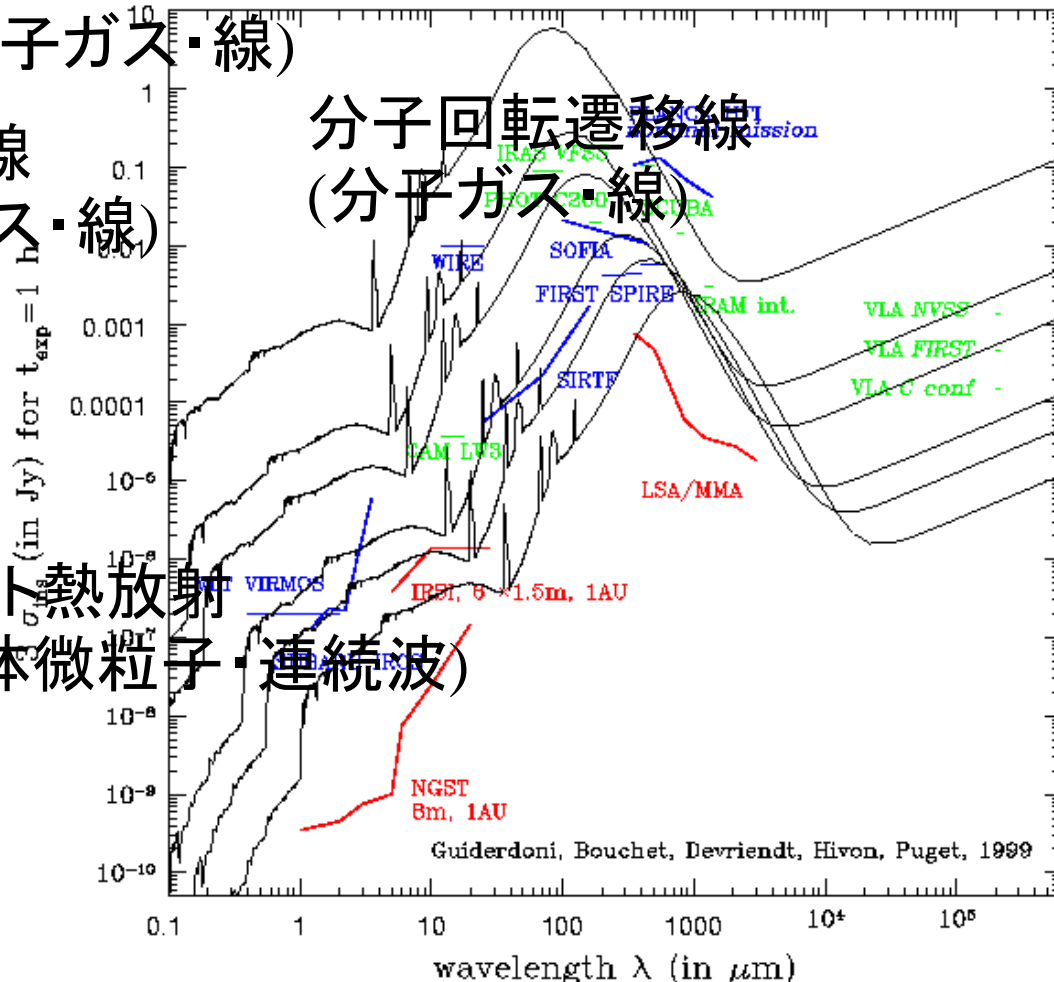
再結合線
 (電離ガス・線)

分子回転遷移線
 (分子ガス・線)

シンクロトン放射
 (電離ガス × 磁場・連続波)

ダスト熱放射
 (固体微粒子・連続波)

自由-自由放射
 (電離ガス・連続波)



Guiderdoni, Bouchet, Devriendt, Hivon, Puget, 1999

日本における電波の利用状況





ALMA

- 直径12m & 7mのアンテナ
合計80台からなるミリ波サブミリ波干渉計。
- 80-950GHzの大気の窓をカバー。
- 0.01秒角の解像度。
- 日米欧3極の国際協力。
- 2002年建設開始、2012年本格運用開始予定。
- 総建設費～1000億円。

Atacama

Large

Millimeter/submillimeter

Array



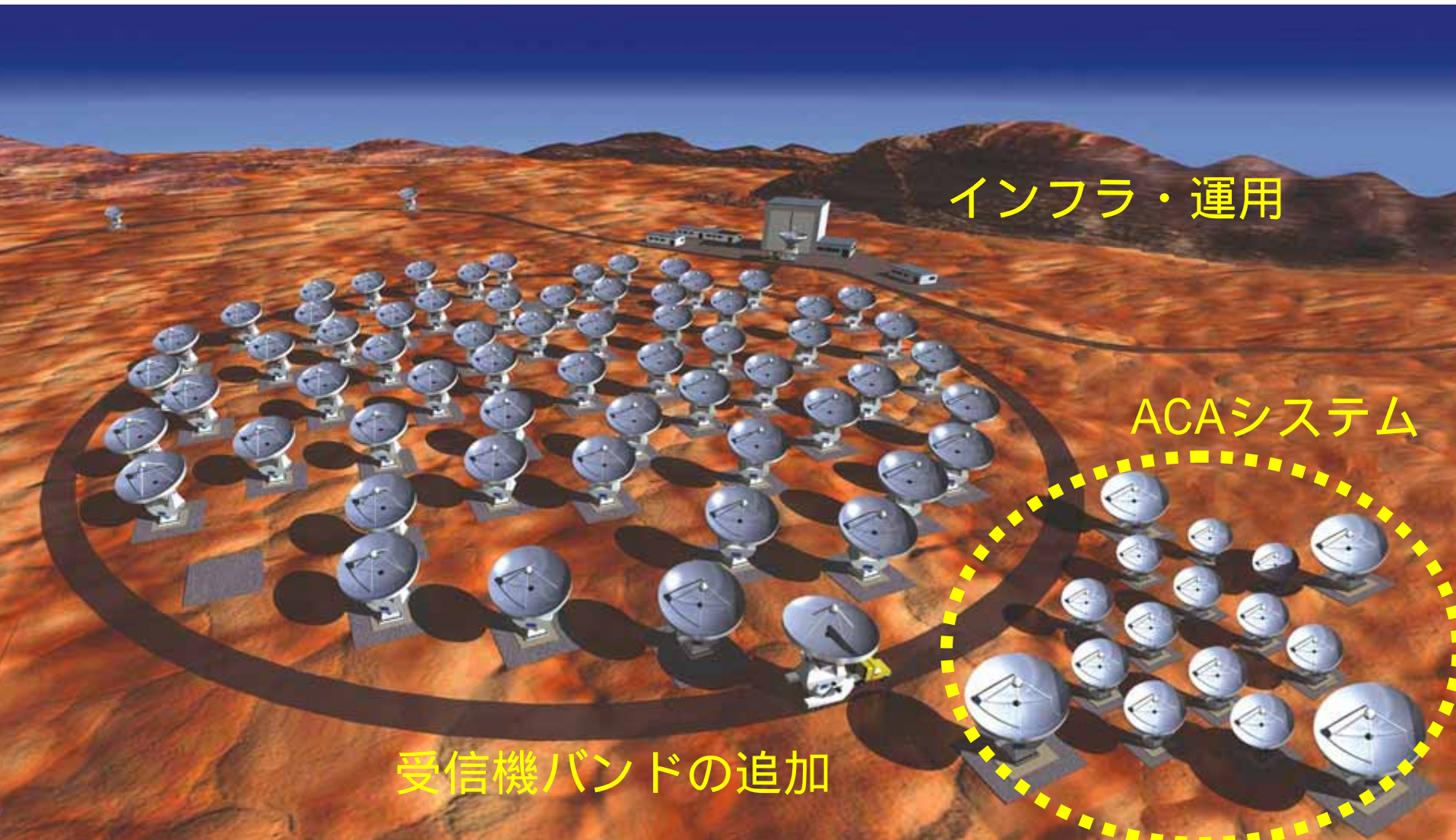


ALMA計画の全般的な状況

- 米欧では建設予算が承認され、日本に先行して建設に着手（2003年2月に2者協定書に署名完了）
- 米欧の予算総額は752M\$（FY2000US\$にインフレを考慮。米欧各459億円相当）
- 日本は平成14-15年度で研究開発、平成16年度から建設予算を獲得（平成16年度は約10億円で、8年計画で総額約256億円を予定）
- 2004年9月14日に3者協定書への署名を完了
⇒日本の参加が正式に認められた



日本参加後のALMA



インフラ・運用

ACAシステム

受信機バンドの追加



ALMA計画の年次計画

日本分担分	米欧分担分
2004 Q2 日本分担分の建設開始	2003 Q4 チリでの第1期工事着工 2005 Q1 BEを山頂施設に納品 Q2 チリでの第1期工事完了 最初のアンテナ搭載BEを 山麓基地に納品 Q4 最初の量産アンテナを 山麓基地に納品 最初のFEを山麓施設に納品
2006 Q1 最初の試作FEを山麓施設に納品 Q2 最初のACA 12mアンテナを山麓 施設に納品	
2007 Q1 最初のプレ量産FE (900GHz帯 以外) を山麓施設に納品 Q3 ACA 12mアンテナを単一鏡モード で使用した初期運用開始 Q4 最初のACA 7mアンテナを山麓 施設に納品	2007 Q3 初期運用開始
2009 Q3 ACAシステムの初期運用開始	2011 Q4 建設完了
2012 Q1 ACAシステムの本格運用開始	2012 Q1 本格運用開始



ALMAの装置性能の特徴

- サブミリ波
- 高い感度
 - 大集光面積: 現在のミリ波干渉計の16倍
 - 低雑音受信機群: 量子限界に迫る
 - 高い大気透過率: 高い標高、乾燥した気候
⇒ 総合的に2桁の感度向上
- 高い撮像能力
 - 最高2桁の解像度向上
 - 広視野モザイク可能
 - 高いイメージフィデリティ

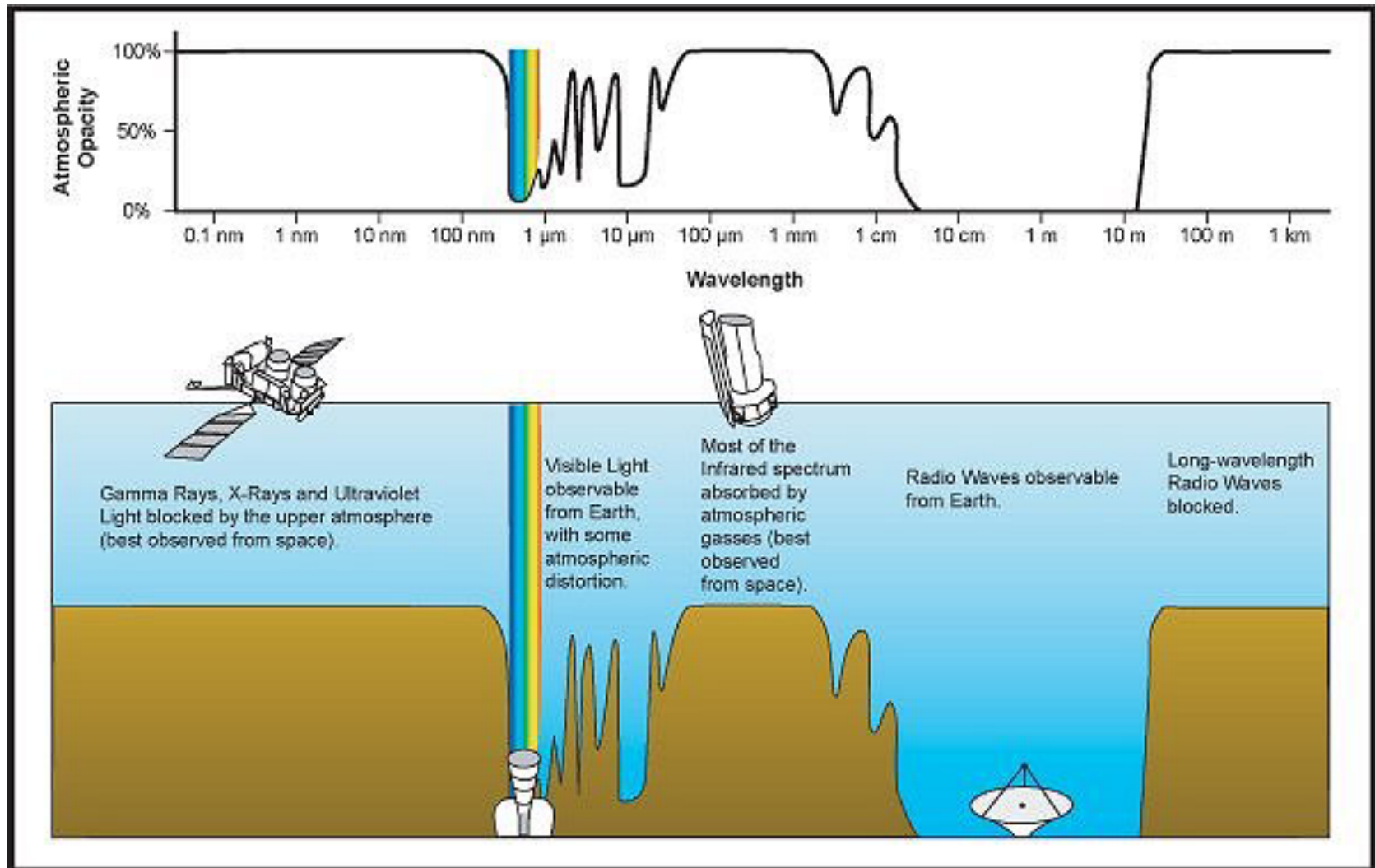


ALMAで狙う研究テーマ

距離	天体	実際の広がり	見かけの広がり	ALMAによるプロジェクトの例
z~5以上	原始銀河	10 kpc	3"	原初天体の無バイアスサーベイ、銀河誕生の姿を初めて描き出す
z~0.5 - 3	銀河団	1 Mpc	200"	スニヤエフ・ゼルドビッチ効果、宇宙論パラメータの決定
z~0.1 - 3	赤外超過銀河	10 kpc	6"	大きな赤外光度の原因、銀河合体、AGN形成
z~0.01	進化途上の銀河	10 kpc	50"	銀河の形態（楕円銀河や円盤銀河）はどのようにして作られたか
10 Mpc	AGNトーラス	1 pc	0.02"	トーラスの構造を初めて描き出す
10 Mpc	AGNを取り囲むスターバースト領域	1 kpc	20"	構造・運動・物理状態、AGNとのつながり
100 kpc	大小マゼラン銀河の分子雲	50 pc	100"	金属欠乏星間物質の物理・化学、星団形成のメカニズム
8 kpc	銀河系の中心	5 pc	100"	ブラックホールを取り巻くガスの構造・運動
5 kpc	大質量星形成コアや超コンパクトHII領域	0.05 pc	2"	大質量星はなぜできるか、ラインサーベイ、偏波観測
1 kpc	超新星残骸	0.05 - 0.5 pc	10 - 100"	衝撃波物理・化学の実験場として、ラインサーベイ
1 kpc	晩期型星	0.02 pc	4"	質量放出の歴史、双極性の起源、ラインサーベイ
0.1-1 kpc	星団形成中の分子雲コア	0.01 - 0.1 pc	2 - 100"	星団形成のメカニズム、偏波観測
0.1-1 kpc	双極分子流	0.01 - 0.5 pc	2 - 500"	発生メカニズム、衝撃波、周囲へのインパクト
0.1 kpc	原始星	5000 AU	50"	質量降着、星の質量はなにが定めるか
0.1 kpc	原始惑星系円盤	400 AU	4"	構造・運動・ギャップ、原始巨大惑星、ラインサーベイ
10 pc	主系列星を取り巻くデブリディスク	400 AU	40"	惑星を示唆する構造やギャップ
	惑星とその衛星		1 - 40"	大気の構造と運動
	彗星		2 - 100"	コマ中の物質分布、ラインサーベイ、ジェット
	太陽		1800"	活動領域、リムブライトニングによる彩層構造解明



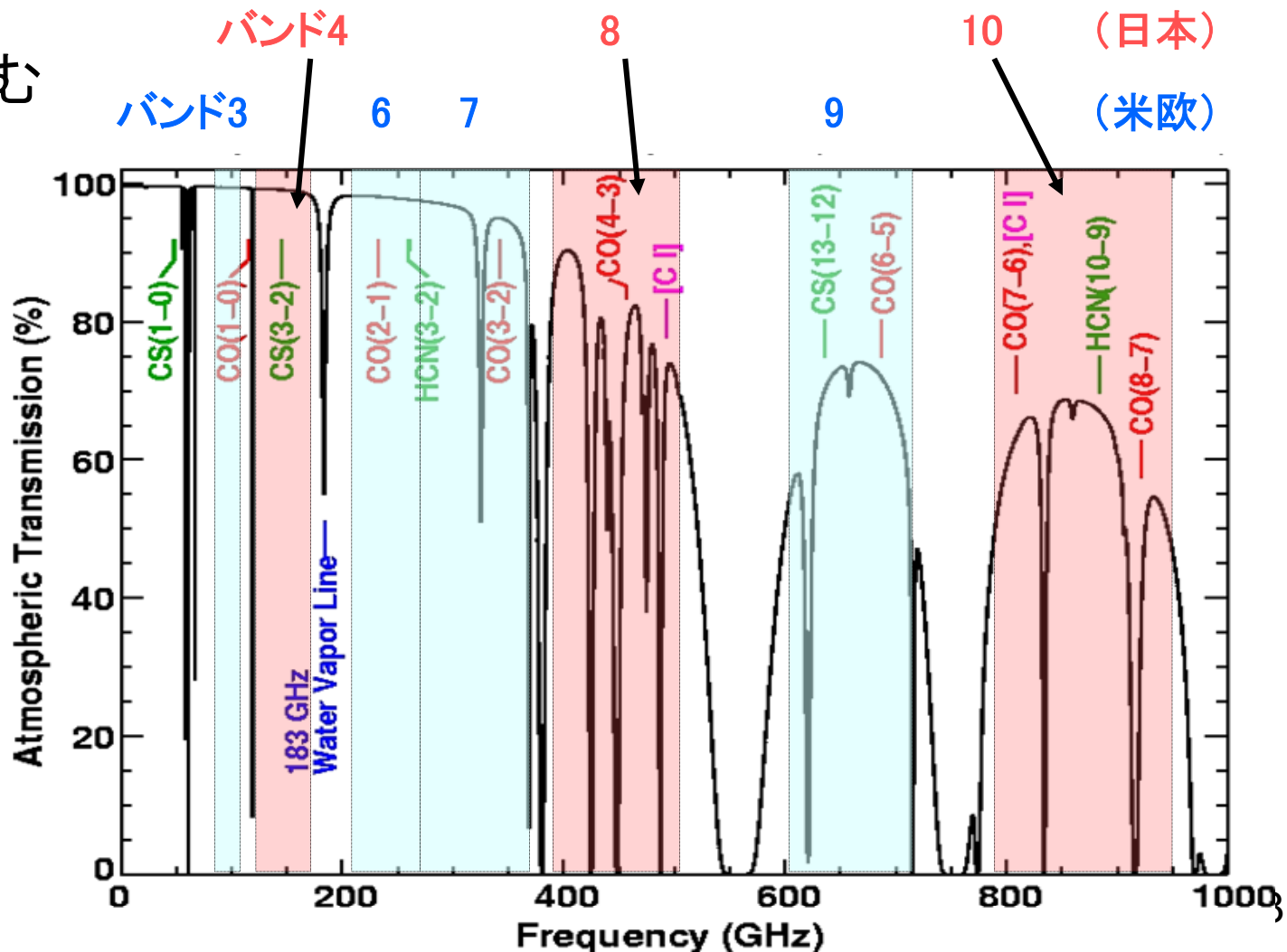
大気の底から





新たな受信機バンドの追加

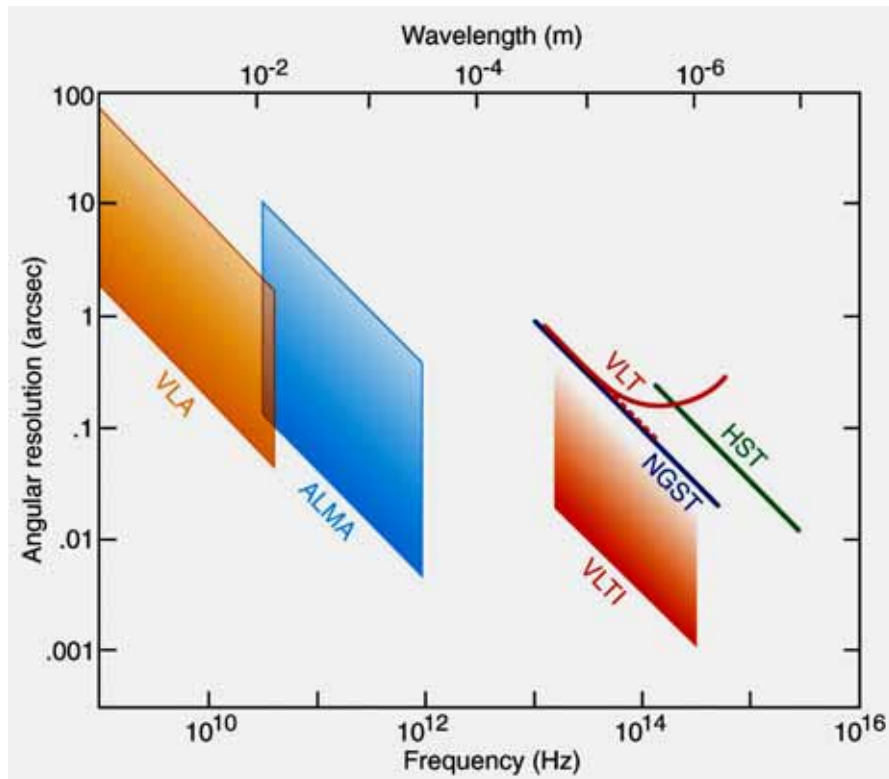
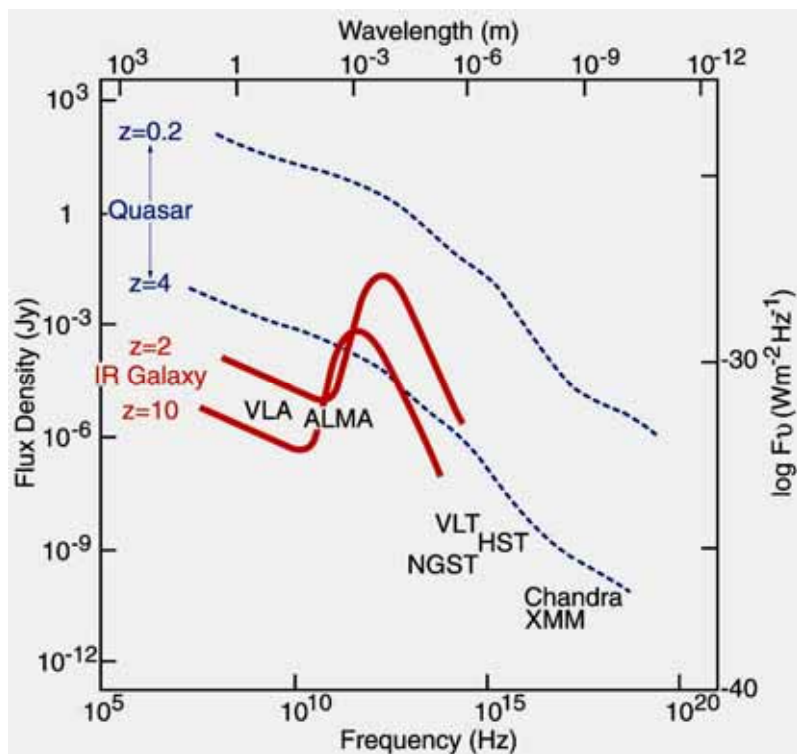
サブミリ波を含む
「大気の窓」を
ほぼカバー



(日本)
(米欧)

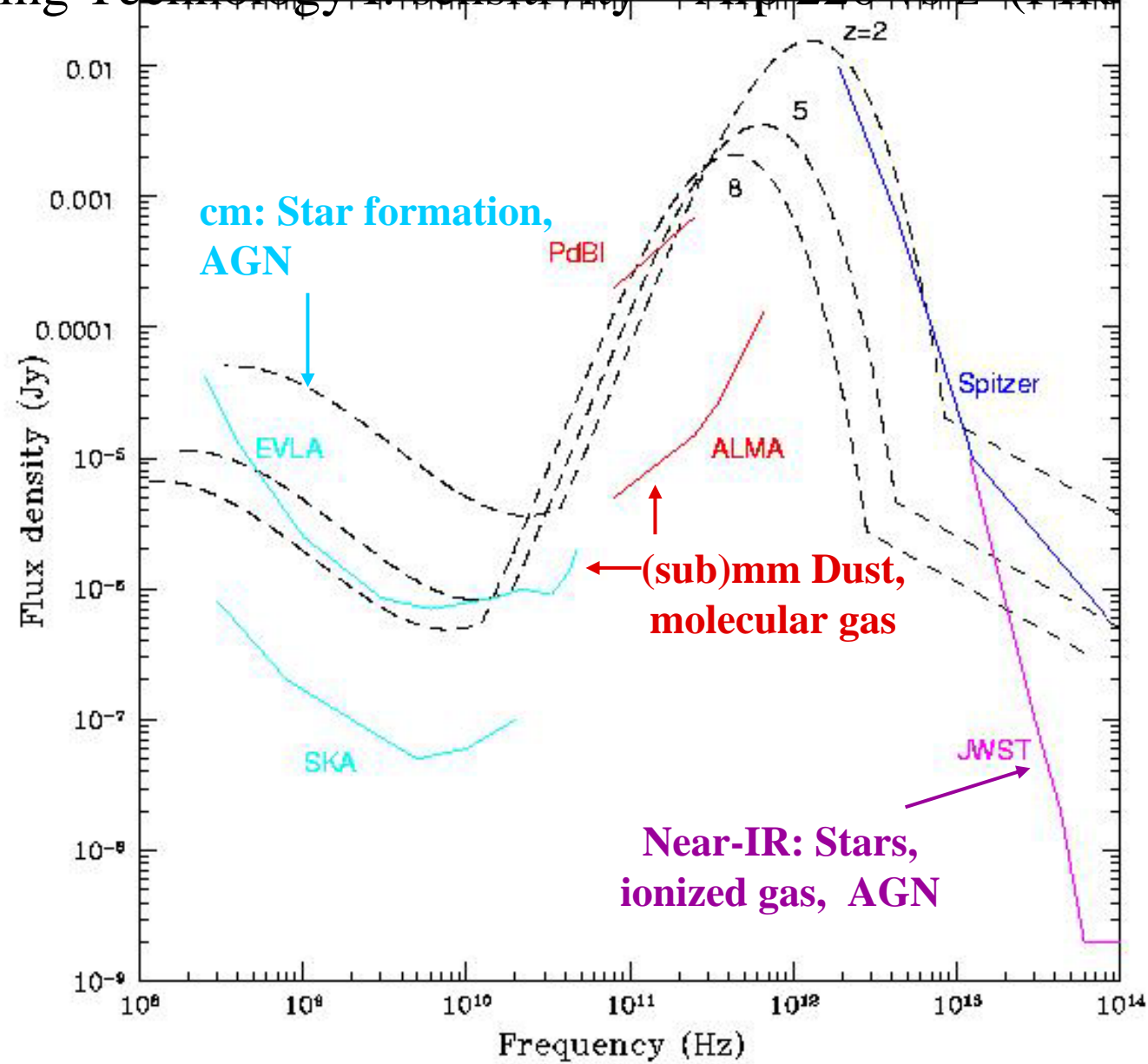


感度と解像度の比較

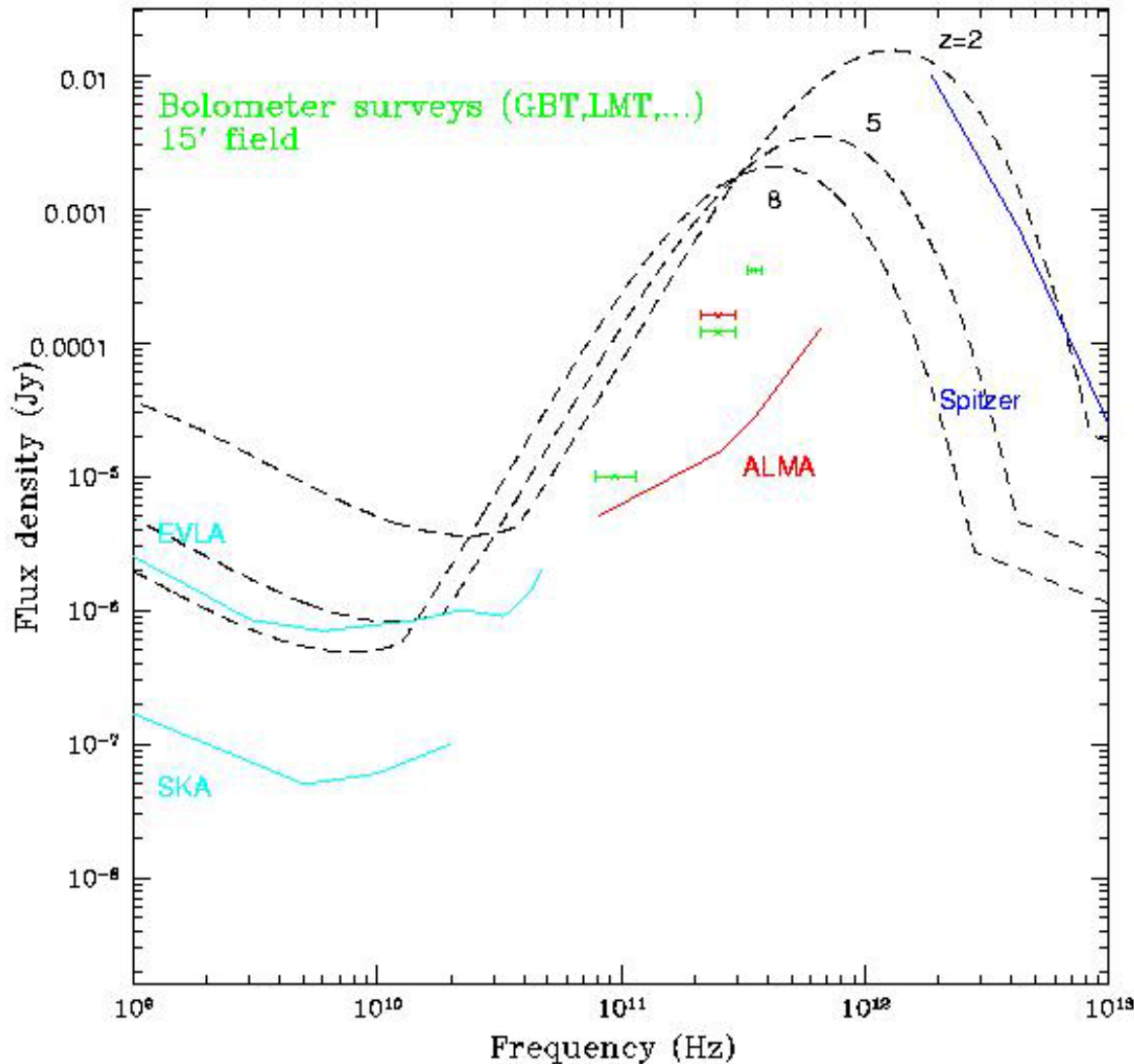




Enabling Technology I: sensitivity – Arp 220 vs z (FIR=1.6e12 Hz)



Very wide field surveys: role of bolometer cameras



- Bolometers (+ EVLA, Spitzer): survey large areas to sub-mJy sensitivity
- ALMA: detailed SED and CO follow-up
- ALMA: μ Jy, narrow field surveys

スナップショットの感度

(0.1秒角、1分積分、 5σ)

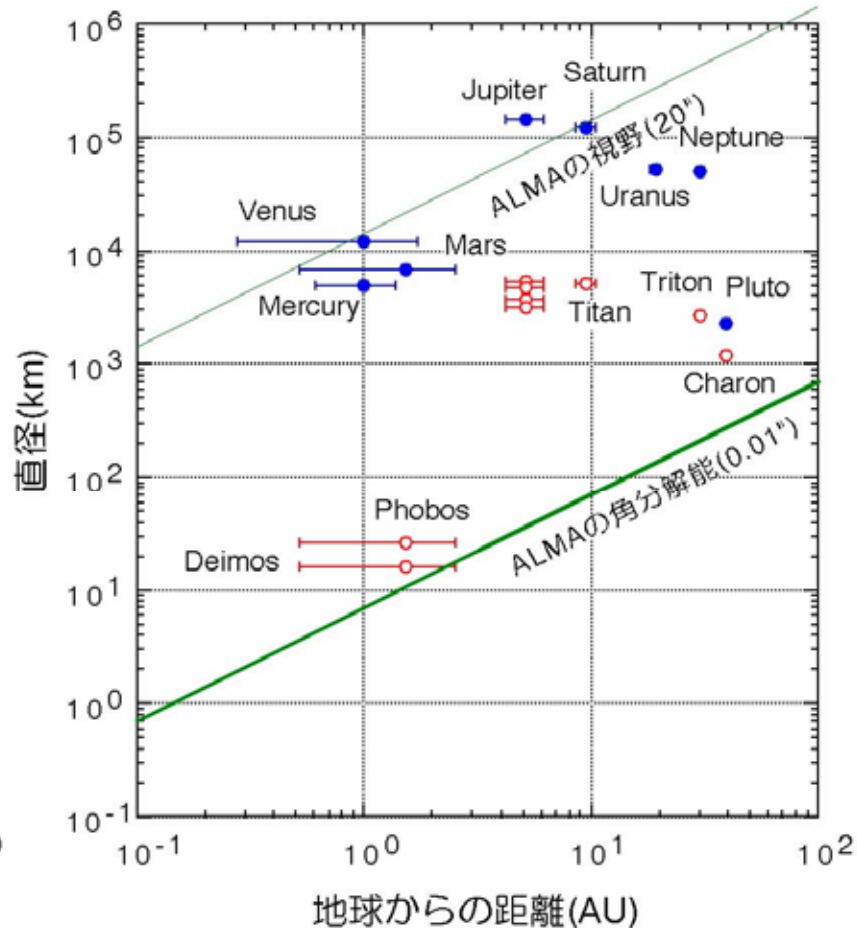
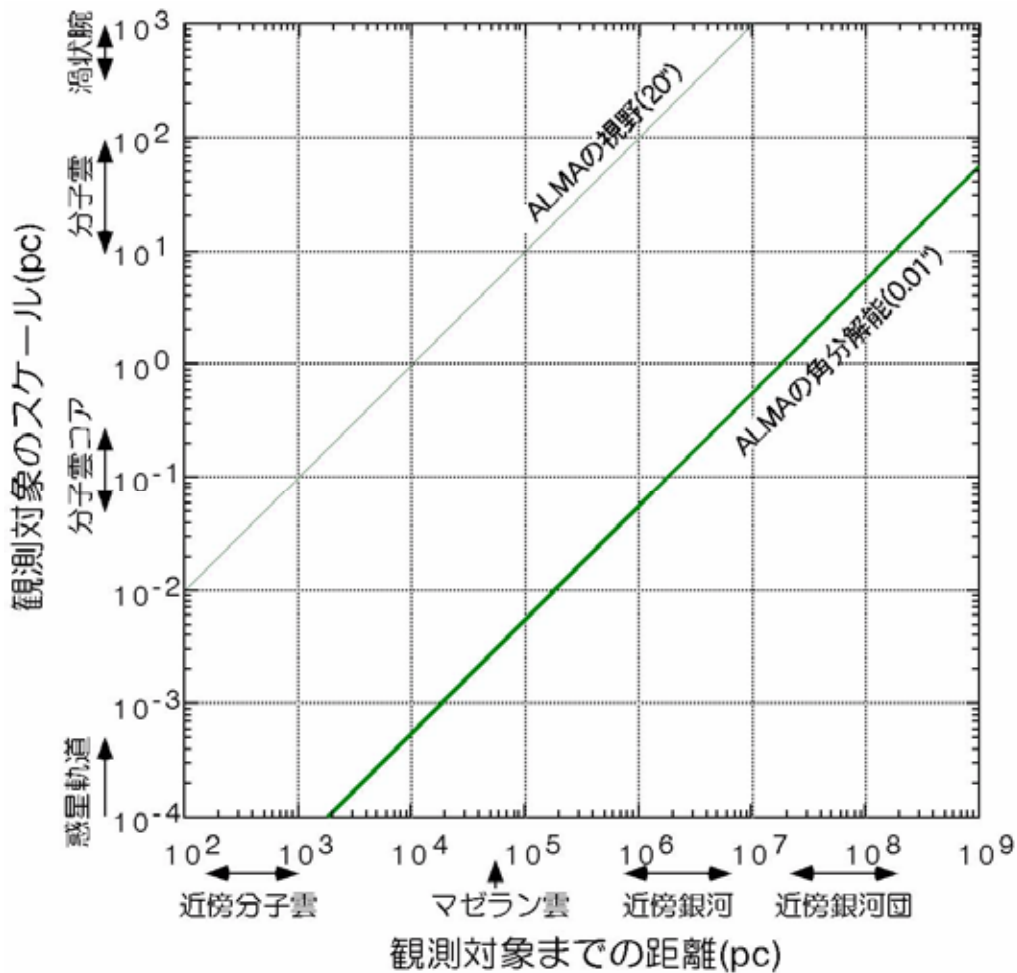
周波数 (GHz)	Tsys (K)	連続波		点源 (mJy)
		点源 (mJy)	輝度 (K)	
100	70	0.21	2.50	31.7
137	84	0.25	1.60	32.5
230	167	0.50	1.16	51.2
350	327	1.03	1.03	85.0
490	1151	3.93	2.00	275
650	1348	5.23	1.52	318
900	1556	7.90	1.20	409

携帯サイト: <http://www.nro.nao.ac.jp/alma/>





視野と解像度





視野の比較

HST

WFPC2



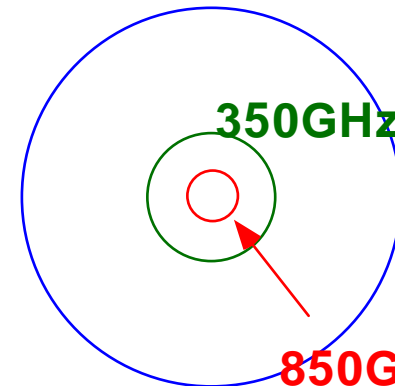
60"

ALMA

100GHz

350GHz

850GHz



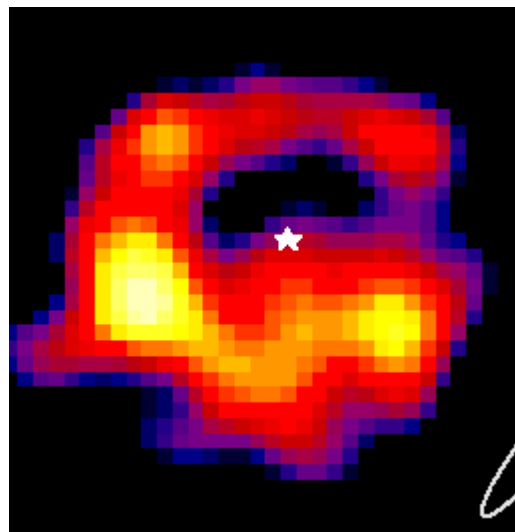
SUBARU

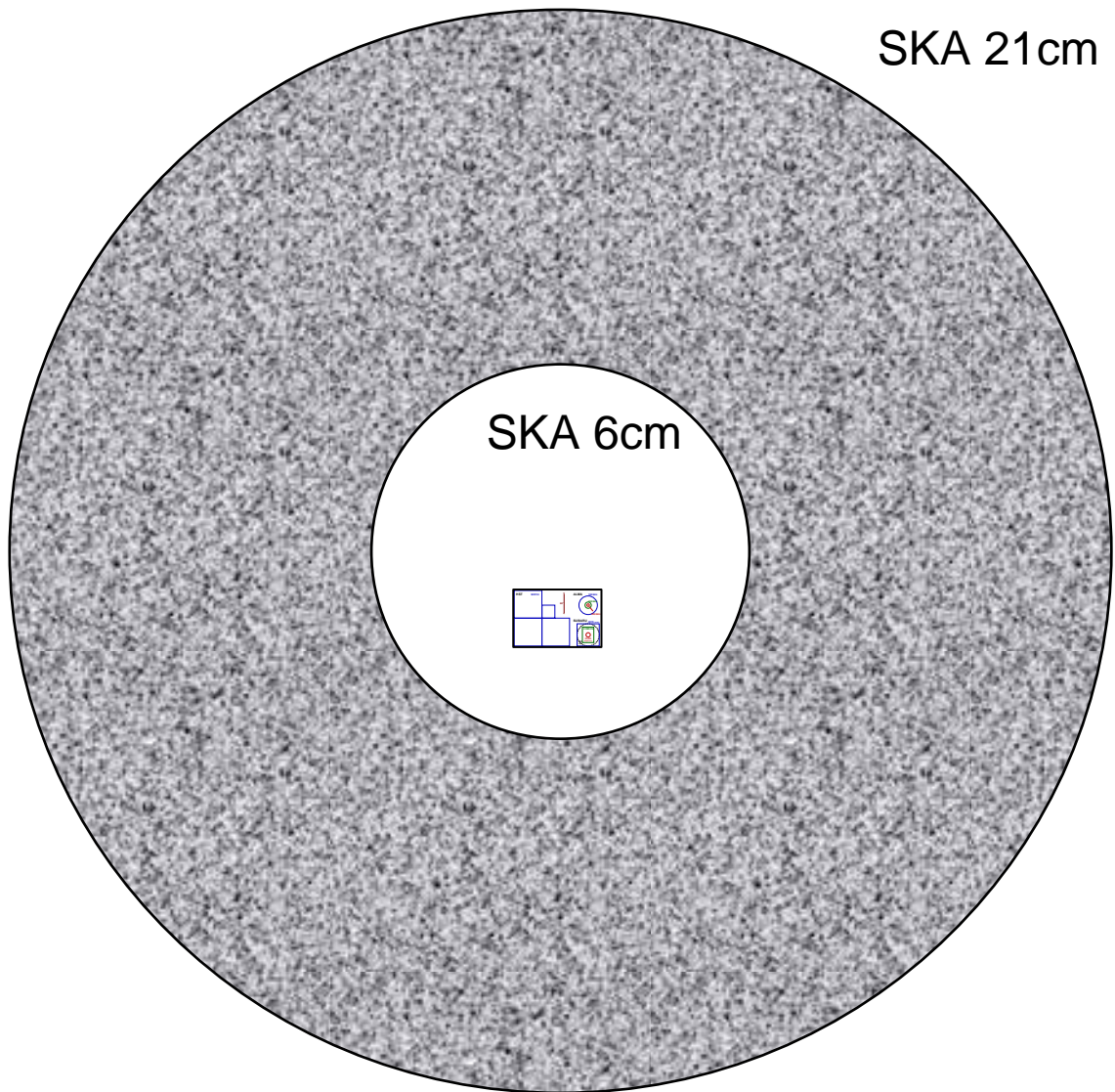
IRCS (wide)

COMICS

CIAO
(high-res.)

AO
(full)







地上サブミリ波観測の特徴

- 惑星やダストからの熱放射の検出（連続波）
- 気相分子・分子イオンの定量（輝線・吸収線）
- 高い分光性能 ($\lambda/\Delta\lambda=10^7$)
- $10-100\text{ms}^{-1}$ 程度のガスの運動の検出
- 定常観測・モニタ・多数の天体の調査
- 日中の観測が可能



VSOP-2

- 世界初のスペースVLBIミッションVSOPの次期計画
- 高周波(8, 22, 43 GHz)、高分解能($\sim 38 \mu\text{as}$)、高感度を目指す
- AGNのSMBH、降着円盤、ジェット生成や、原始星円盤の磁気圏の解明
- 緊密な国際協力

VLBI
Space
Observatory
Programme

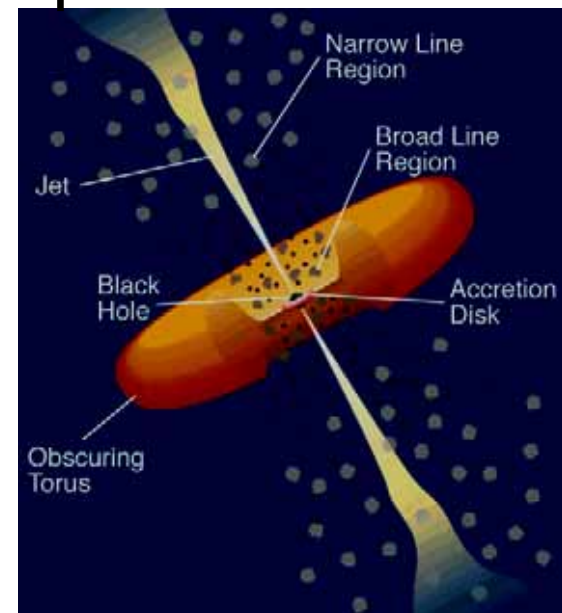
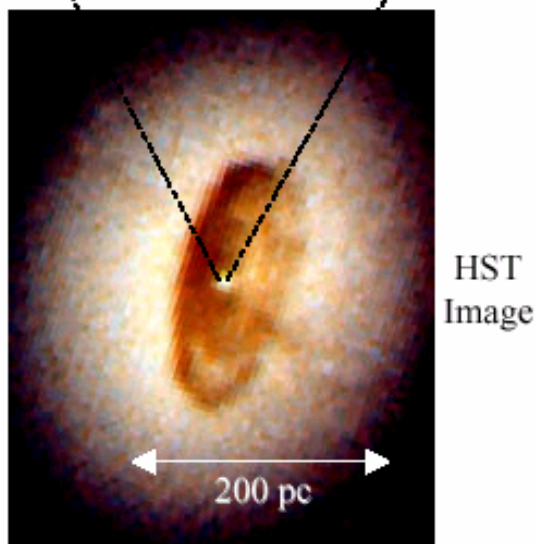
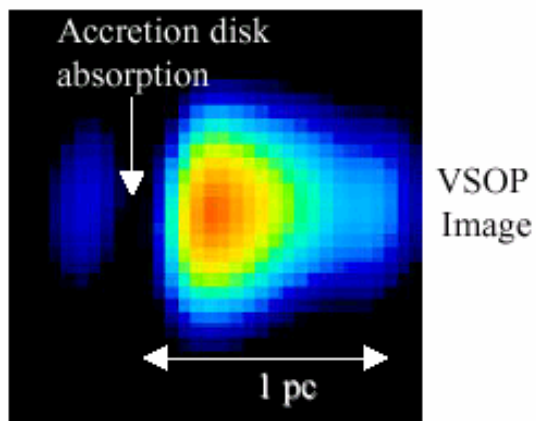




Disk around AGN

pc scale disk seen by free-free absorption

High resolution at lower frequencies is required



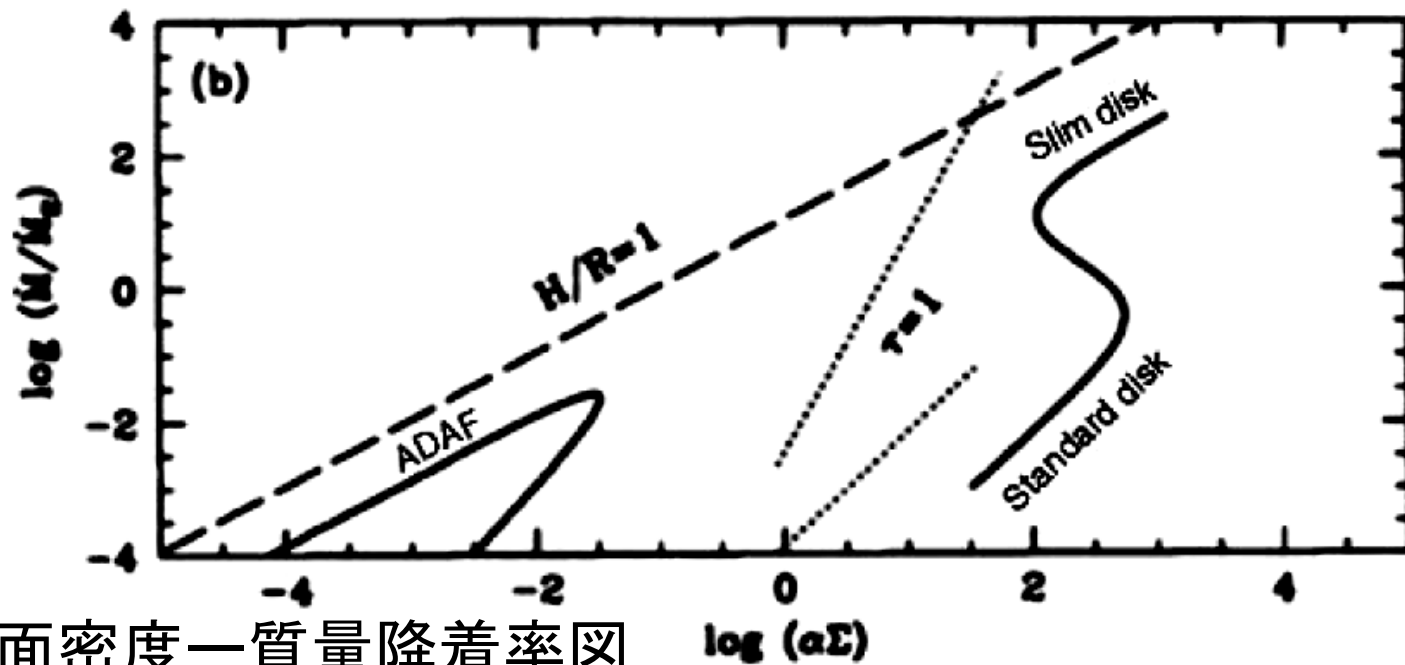
Accretion Disk in NGC 4261



巨大ブラックホールの光と影

光

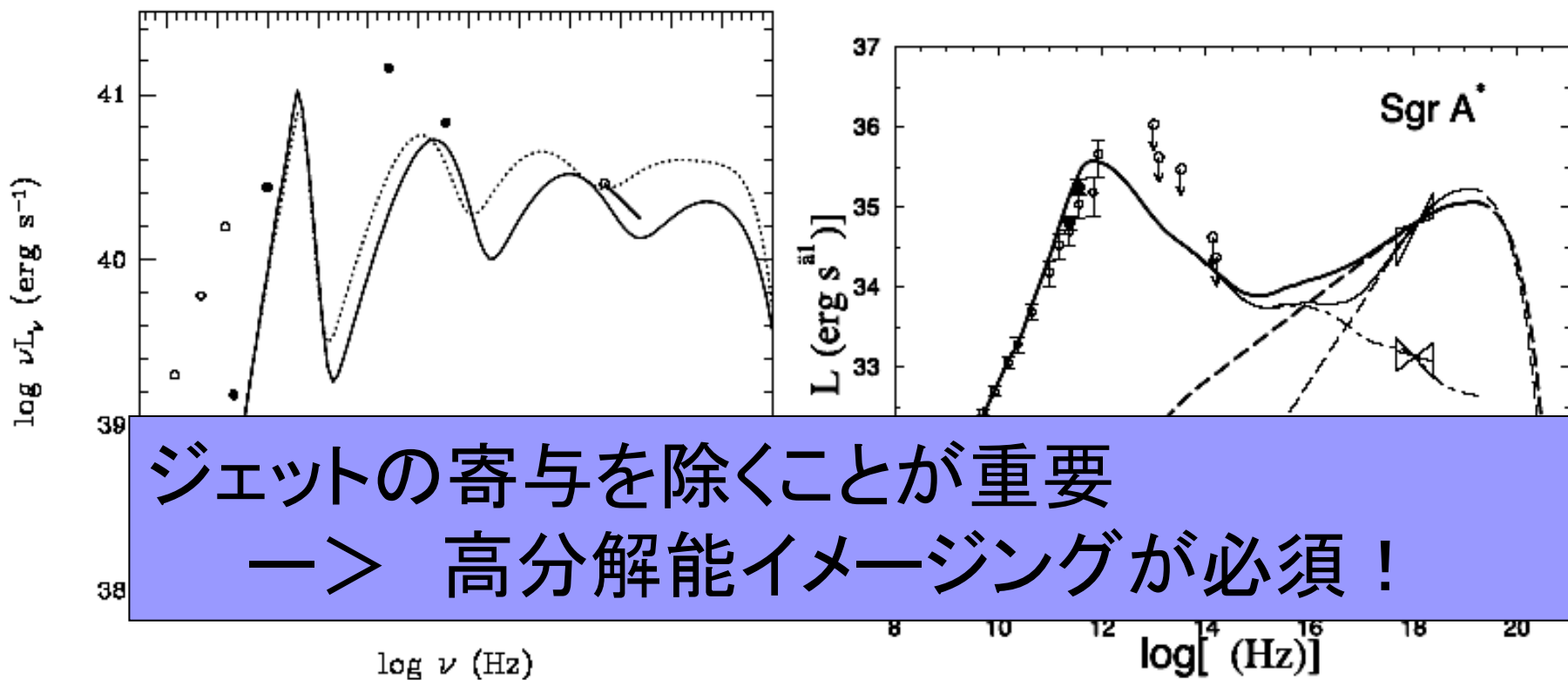
- 降着円盤の物理
標準円盤、ADAFモデル



面密度—質量降着率図



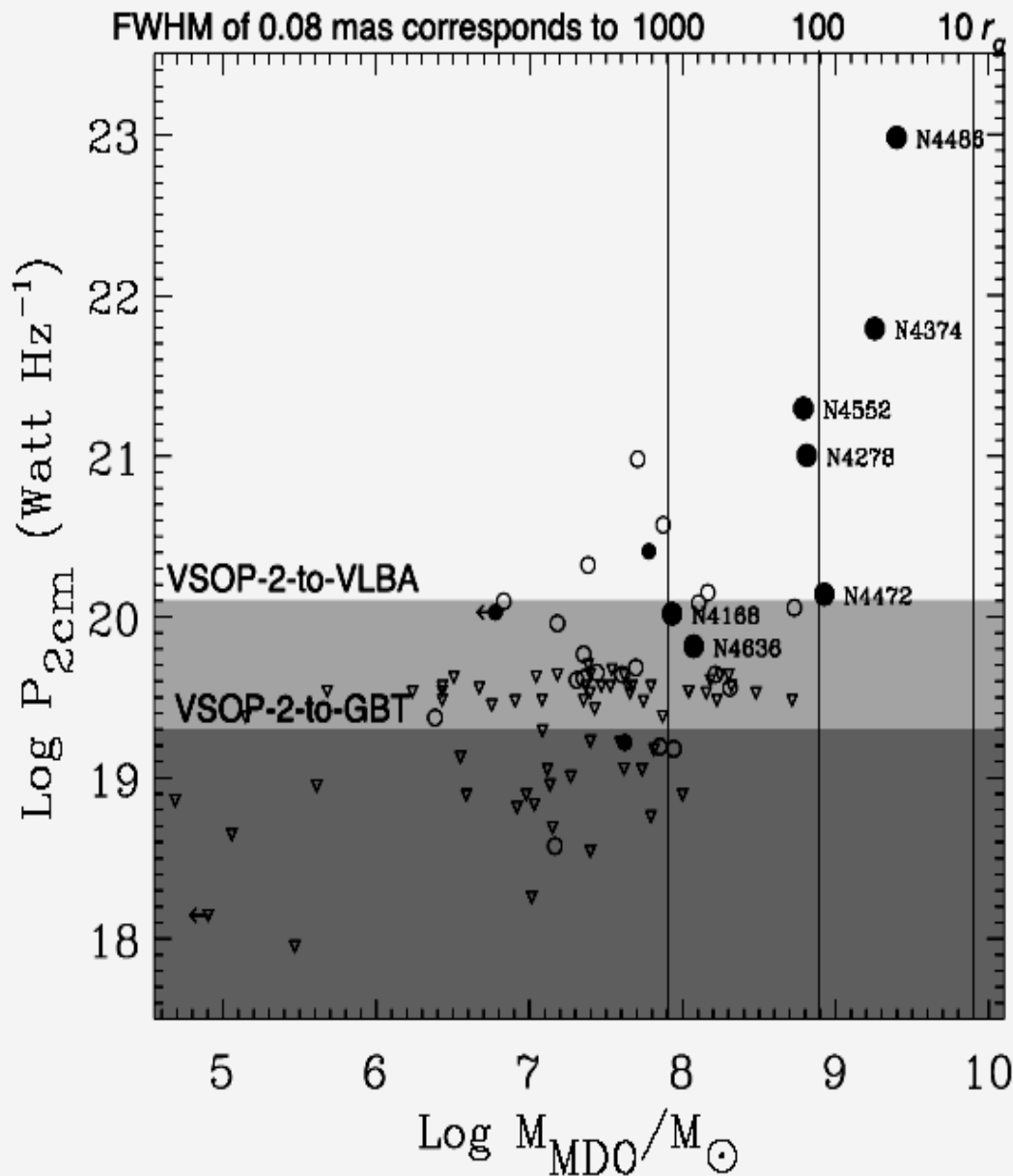
降着円盤モデルとの比較



ジェットの寄与を除くことが重要
→ 高分解能イメージングが必須！

左: M87のADAFモデルとの比較。黒丸はVLBI観測でジェットの寄与を少なくしたもの。右: Sgr A*のRIAFモデルとの比較。(RIAF: Radiatively Inefficient Accr. Flow)

観測可能性



近傍20 Mpc内にある低光度AGNについて、SMBH質量と電波光度を示した。

薄いハッチはVSOP-2とVLBA (25m)との検出限界、濃いハッチはVSOP-2とGBT (100m)との22 GHzの検出限界。

少なくとも10天体が検出でき、その内の半分が $\leq 100 r_g$ で分解可能。



巨大ブラックホールの光と影

影

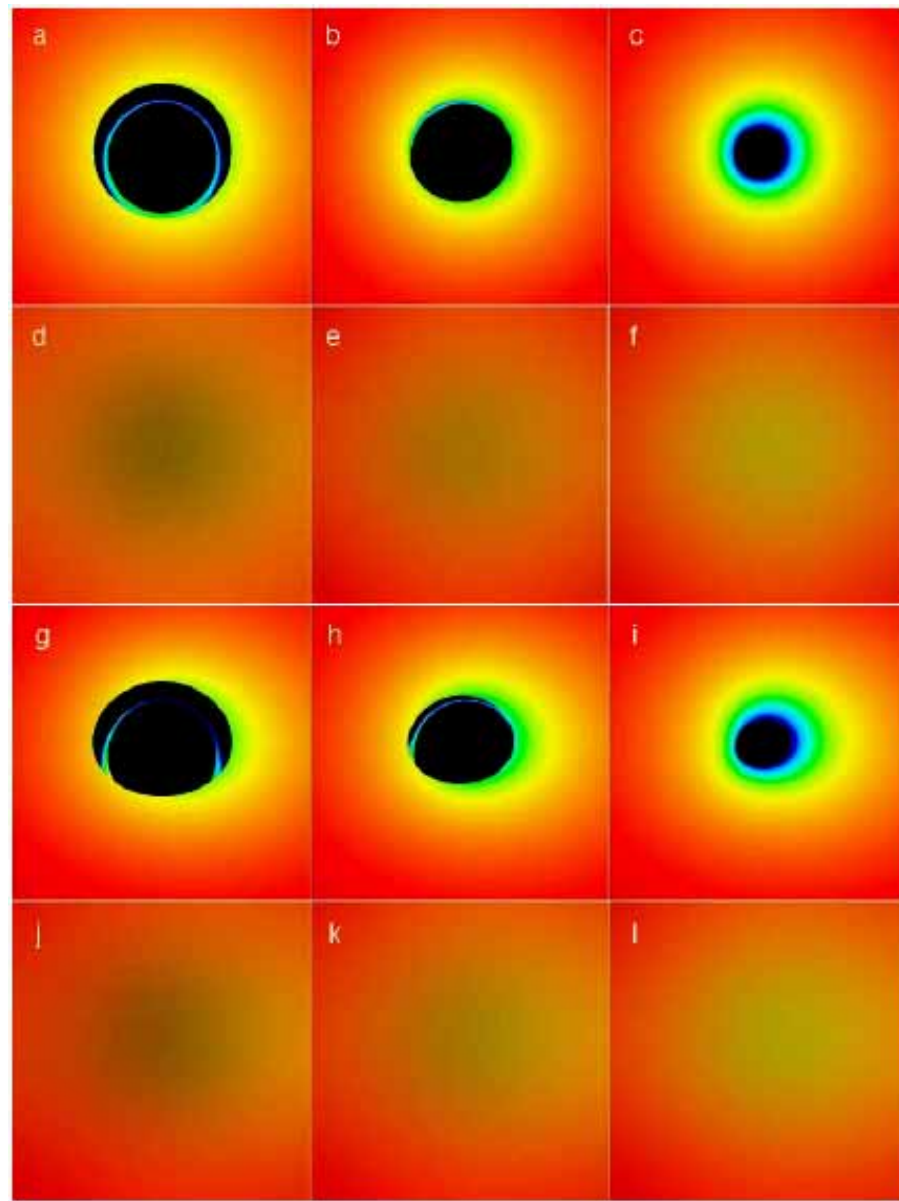
黒い「影」の視認

傾斜角a-c: 20° 、g-l: 45° のモデルで、スピンパラメーターが異なる。

d-f、j-l はそれぞれのモデルをVSOP-2で観測した時のシミュレーション。M87を想定。

SMBHの回転検出は困難だが影の検出は可能。

高橋、嶺重より





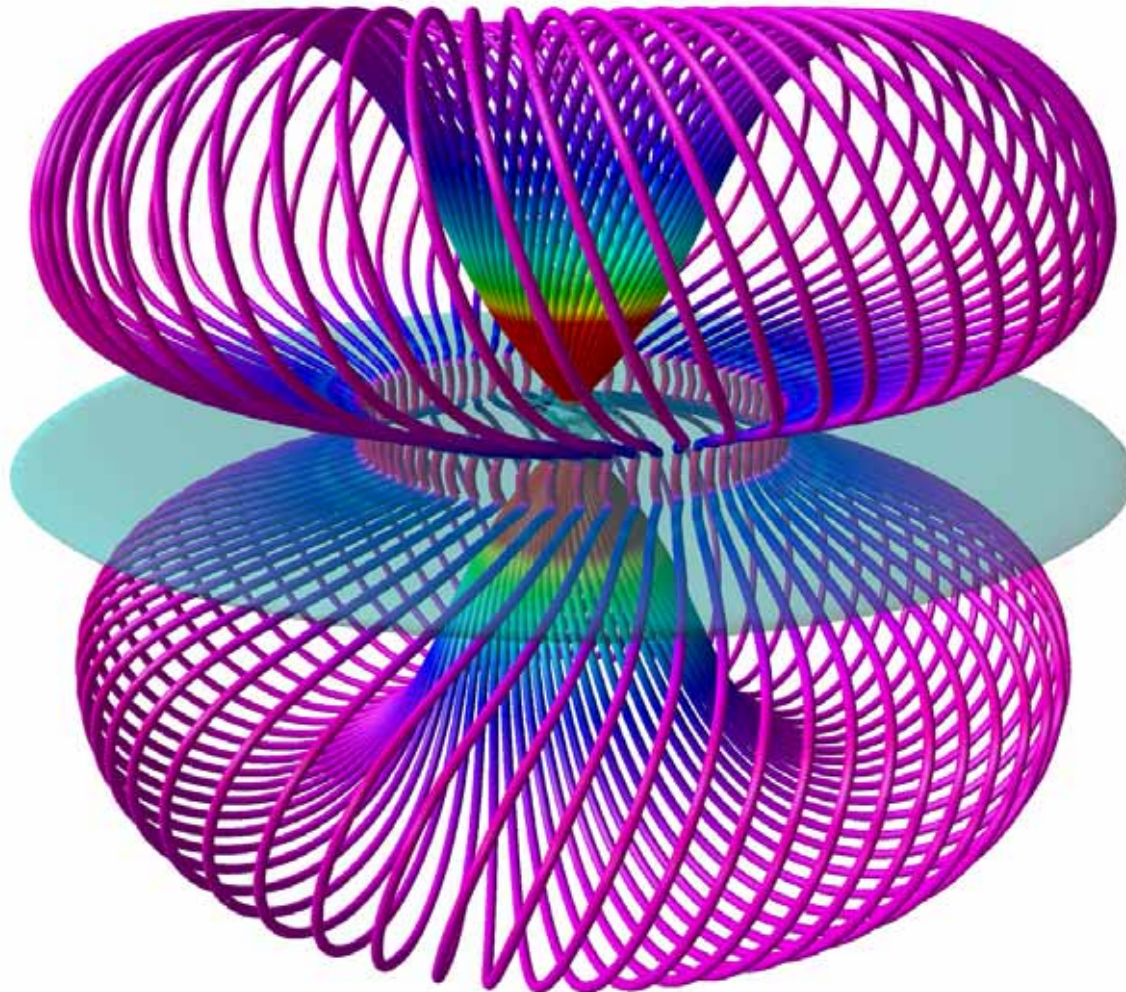
ジェットの加速

磁気遠心力による加速、
およびコリメーション

Radiation pressure?

QuickTime? YUV420 ÉRÅ|ÉfÉb ÉN è LfÉÉvÉçÉOÉáÉÄ Ç™Ç± ÇÃÉsÉNÉ`ÉÉÇ%ã©ÇÈÇžÇ¼Ç...ÇÕIKóvÇ-Ç ÅB

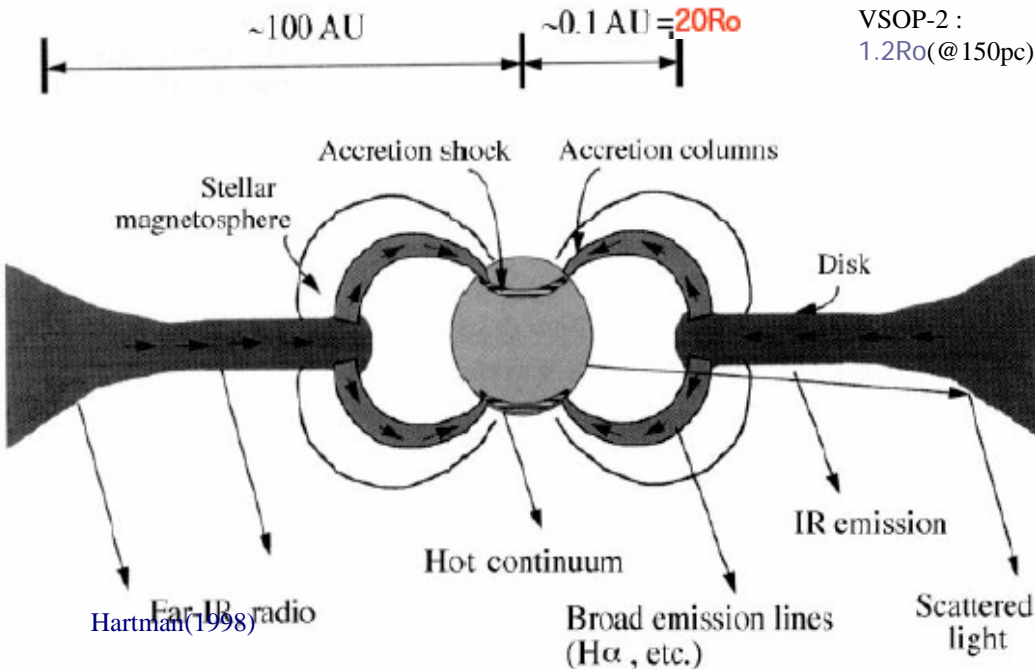
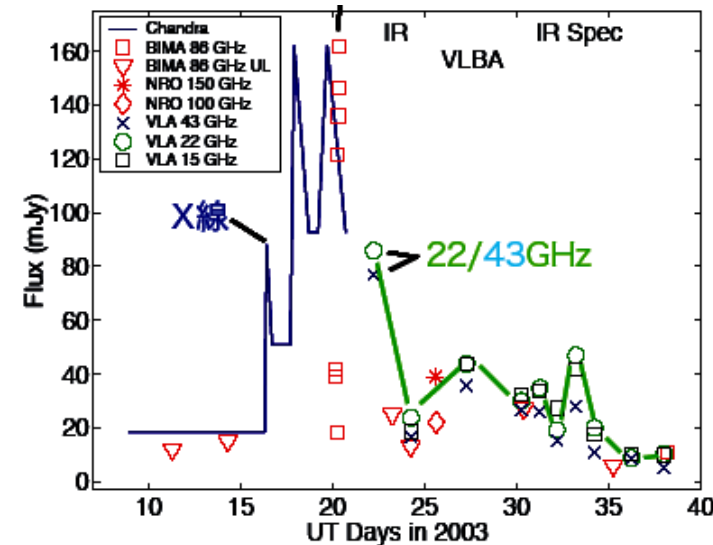
Protostellar Accretion disk and magnetosphere



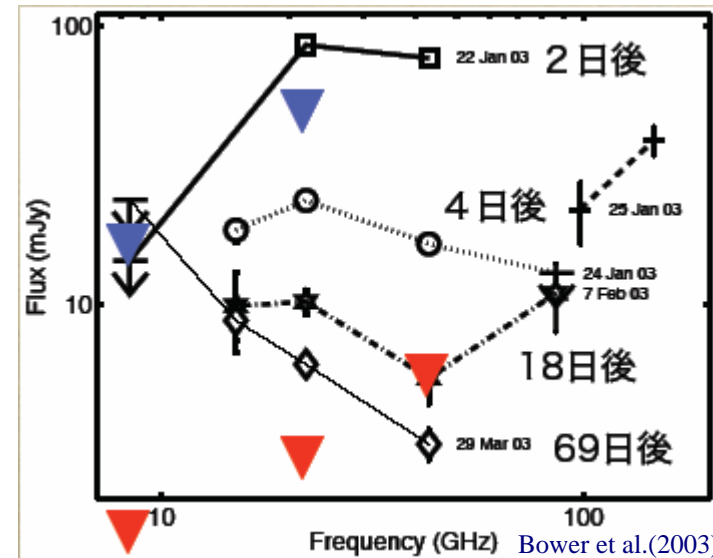
Protostar magnetosphere



- Non-thermal emission from the magnetosphere of YSOs
 - Correlation with X-ray flare
 - Gyro synchrotron emission



VSOP-2 :
1.2Ro (@150pc)



▼ Without phase-ref
▼ With phase-ref

VSOP-2, VSOP, VLBA の比較

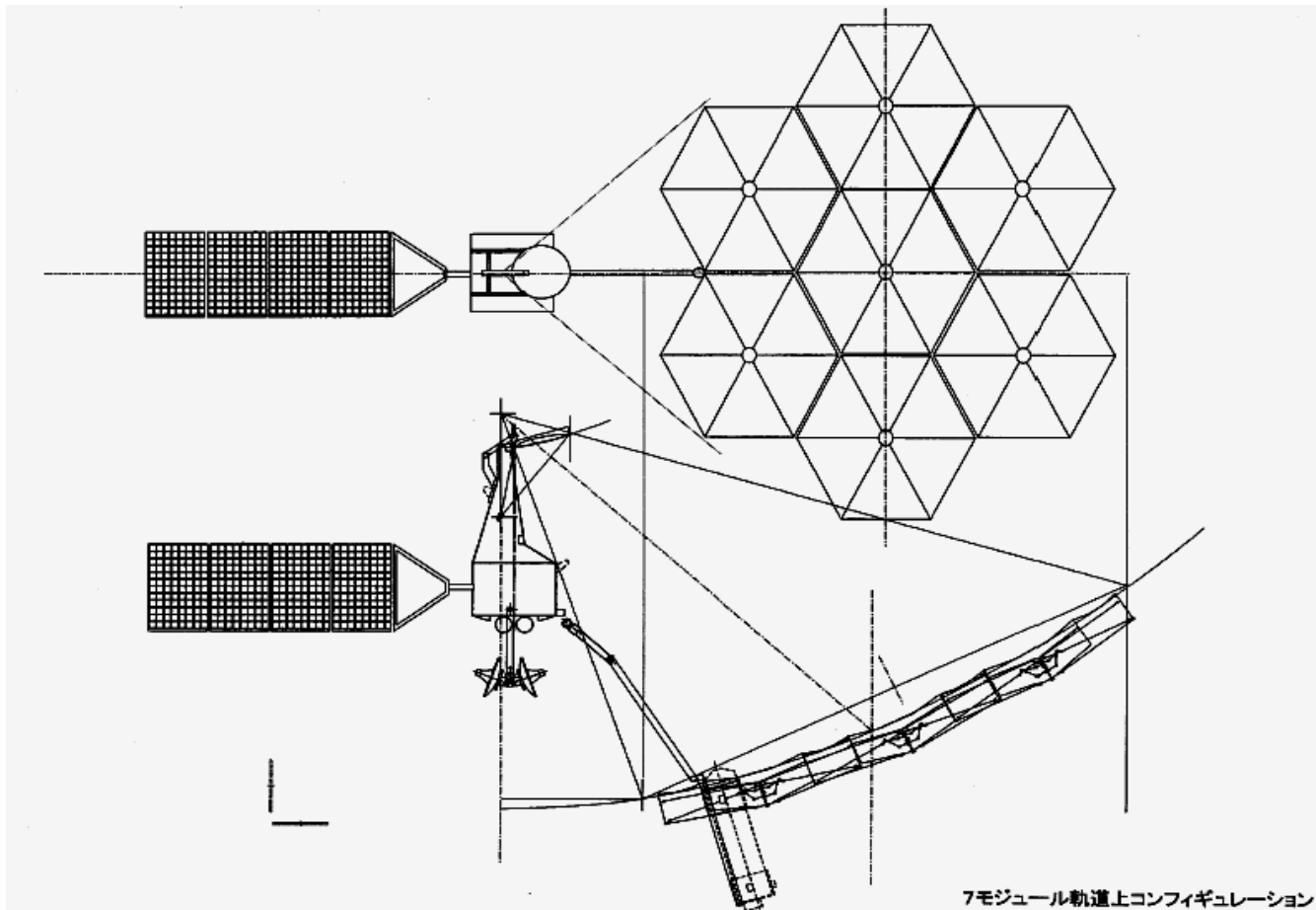
	VSOP-2	VSOP	VLBA
Antenna diameter	9 m	8 m	25 m
Apogee height	25,000 km	21,400 km	--
Orbit period	7.5 hour	6.3 hour	1day
Polarization	LCP/RCP	LCP	LCP/RCP
Data downlink	1 Gbps	128 Mbps	512 Mbps*
Observing Freq. (GHz)	8, 22, 43	1.6, 5, (22)	5, 8, 22, 43, 86
Highest resolution	38 μ as	360 μ as	96 μ as
Sensitivity (5/8 GHz)	22 mJy	158 mJy	7.9 mJy
(22 GHz)	39 mJy	NA	23 mJy
(22 GHz with phase-ref.) (1.5hour integration)	9.1 mJy	--	5.3 mJy
Launch	FY2010 (target)	Feb.1997	

Assuming that the space VLBI baseline is created between the satellite and VLBA 25m.

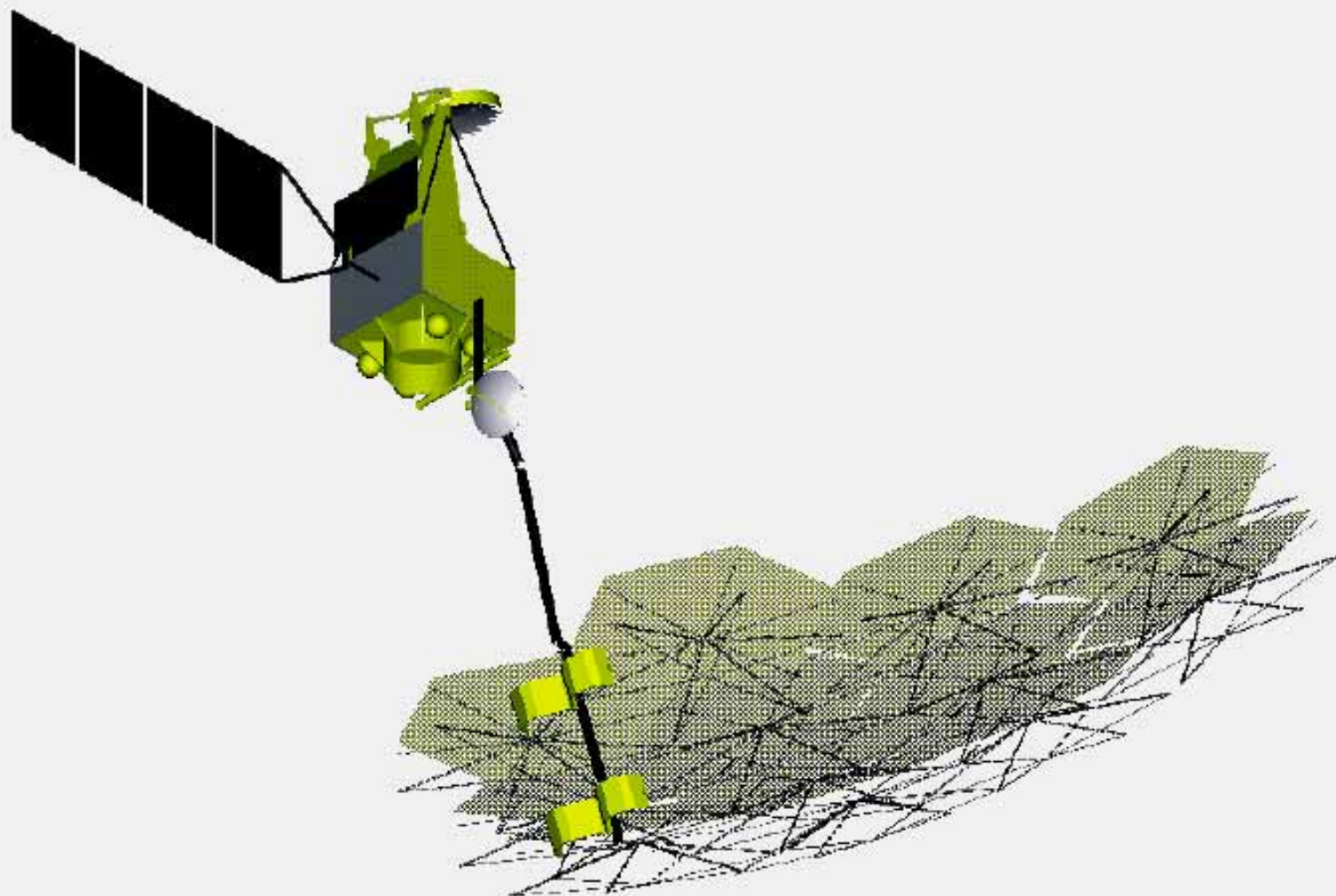
VSOP-2 satellite antenna



- A 9-m offset Cassegrain antenna with modulus structures
 - Light weight and high accuracy with hoop and lib
 - Main & sub reflectors adjustable



高精度アンテナ





年次計画

2004	プロジェクト提案
2005	概算要求
2006-2007	PM
2008-2010	FM
2010-2011	フライトオペレーション
2011 2 月	打ち上げ
2015	運用終了(5年以上の運用期間)

VLBI stations in EA





Scientific Targets

- Physics of accretion disk of AGNs
 - Standard model, ADEF, others?
- Black Hole shadow
 - visualized image?
- Acceleration of jets
 - magnetic field working?
- Activities of protostellar disk
 - accretion disk and magnetosphere?

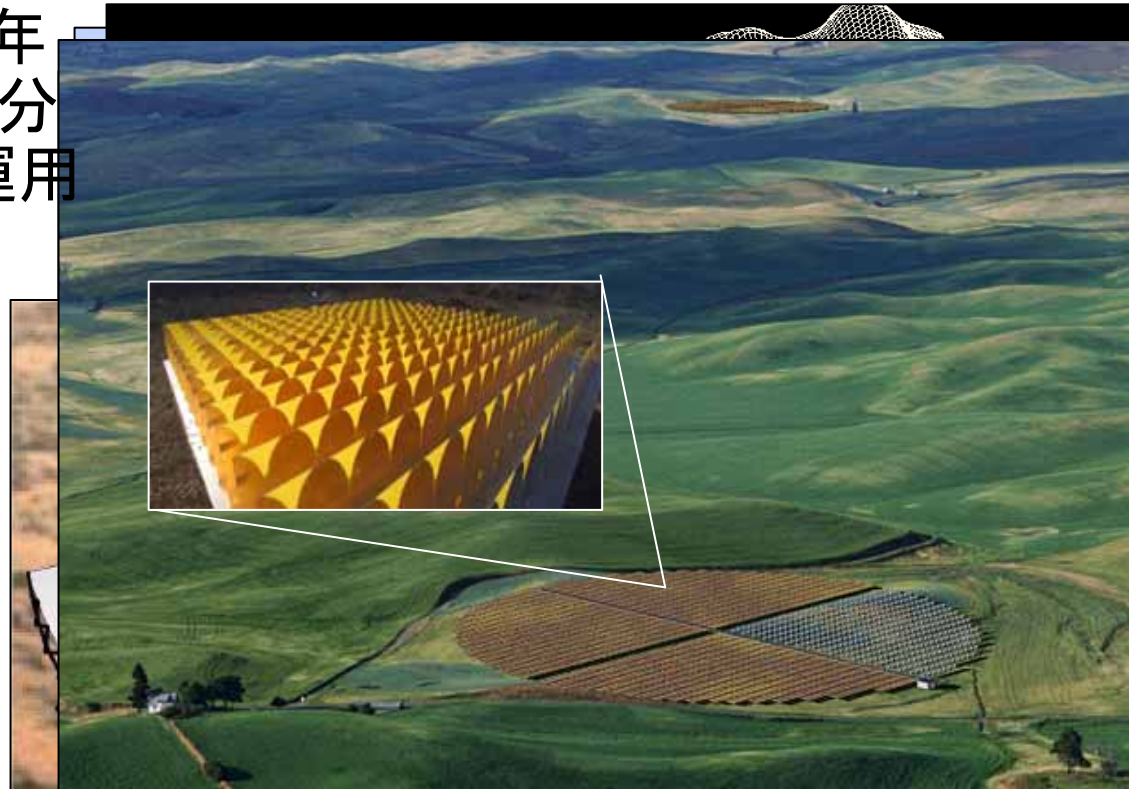


SKA

- 1km²の集光面積。
- 0.1–25GHz。
- 15か国の国際協力。
- 2006年サイト決定、2008年デザイン決定、2015年部分運用開始、2020年本格運用開始予定。
- 総建設費～1000億円。

Square
Kilometer
Array

(www.skatelescope.org)



A Schematic Outline of the Cosmic History

Time since the Big Bang (years)

~ 300 thousand

~ 500 million

~ 1 billion

~ 9 billion

~ 13 billion



← The Big Bang

The Universe filled with ionized gas

← The Universe becomes neutral and opaque

The Dark Ages start

Galaxies and Quasars begin to form
The Reionization starts

The Cosmic Renaissance
The Dark Ages end

← Reionization complete, the Universe becomes transparent again

Galaxies evolve

The Solar System forms

Today: Astronomers figure it all out!



History of IGM

Epoch of Reionization (EoR)

- bench-mark in cosmic structure formation indicating the first luminous structures
- ended 'dark ages'



Current scientific drivers

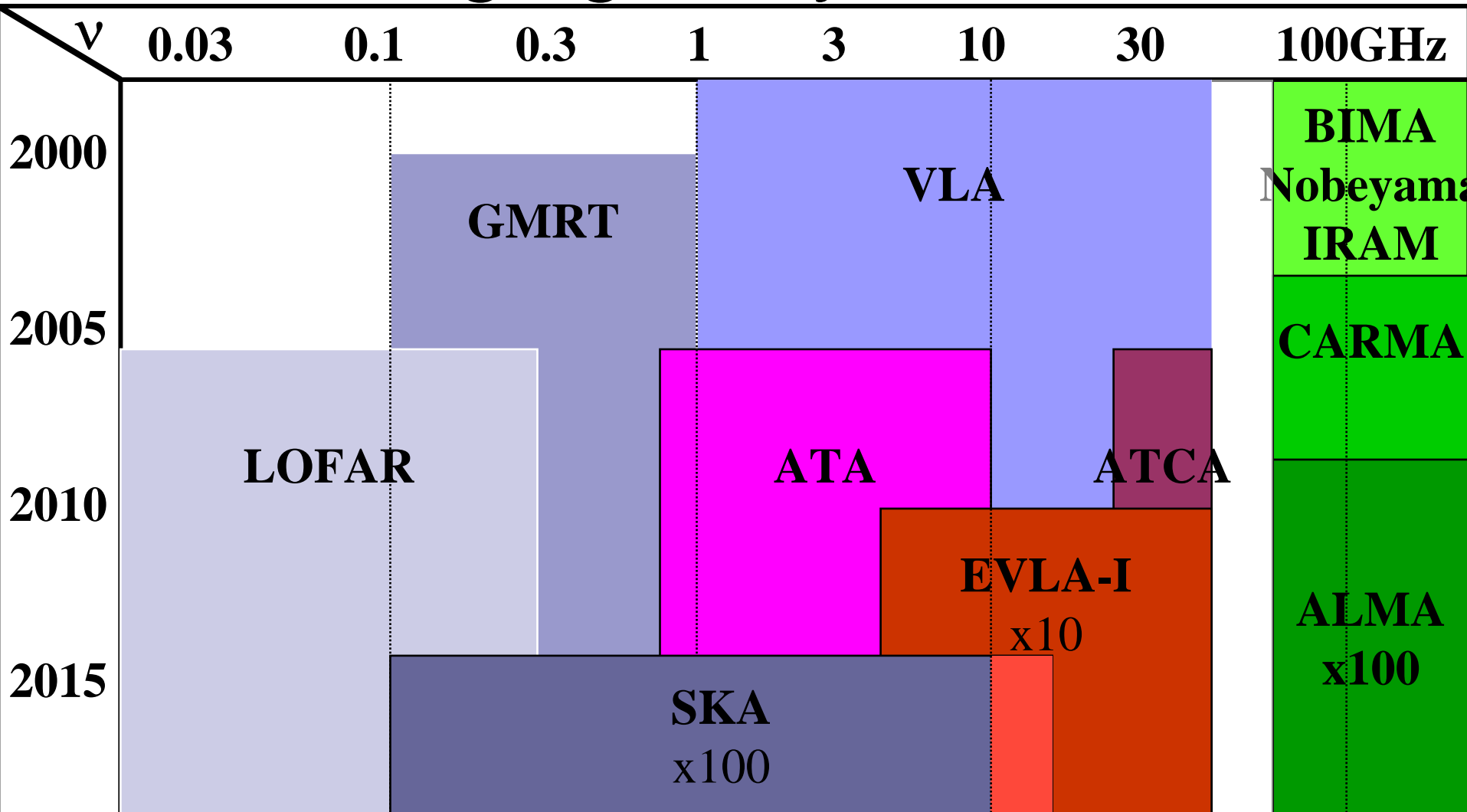
- Dark Ages and Epoch of Re-ionization
 - ionization of neutral IGM
 - properties of first luminous objects
- Large Scale Structure in the Universe
 - dark energy as function of redshift
- Evolution of galaxies
 - genesis of black holes
 - star formation rate
- Probing Gravity through pulsars
 - black hole binary as probe of strong gravity
 - low-frequency gravity wave background
- Origin and evolution of Cosmic Magnetic Fields
 - large scales, primordial fields
 - small scales, turbulence & dynamos
- Transient universe
- Protoplanetary disks



SKA Development Plan

- 2000-7 technology prototyping
- 2004-5 site testing
- 2006 **selection of site**, major external review of design
- 2007 prepare funding proposal for 5% demonstrator
- 2008 **selection of technical design** (may be a combination)
- 2009 start construction of **5% demonstrator** on selected site
- 2010 submit funding proposal for full array
- 2012 **start full construction**
- 2020 complete construction

SKA the Context: radio imaging arrays



Management structure





Current SKA specifications

Sensitivity	$A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}} = 2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{K}$
Surface brightness sensitivity	1 K at 0.1 arcsec (continuum)
Frequency range	0.15 – 22 GHz
Redshift coverage	$z < 8.5$ (HI); $z > 4.2$ (CO (1 \rightarrow 0))
Imaging field of view	1 deg ² at 1.4 GHz
Multi-beam capability within FoV	$N_{\text{beams}} > 100$
Angular resolution	< 0.015 arcsec at 1.4 GHz (> 3000 km)
Number of spatial pixels	> 10 ⁸
Instantaneous bandwidth	0.5 + frequency/5 GHz
Number of spectral channels	> 10 ⁴
Image dynamic range	10 ⁶
Polarisation purity	-40 dB

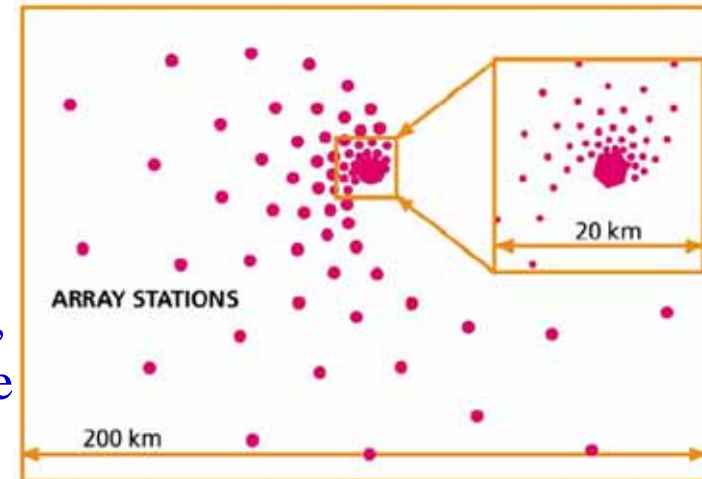


Site

- Initial site analyses submitted by **Australia, China, South Africa, and USA** in May 2003, and by **Argentina and Brazil** in March 2004
- Formal **Request for Proposals** to be issued in July 2004, due 31 May 2005. Decision 2006
- RFI testing at candidate sites in 2004-5, calibrated by ASTRON team under contract to the ISPO

configuration

20% of total collecting area within 1 km diameter,
50% of total collecting area within 5 km diameter,
75% of total collecting area within 150 km diameter,
maximum baselines at least 3000 km from array core



The Square Kilometre Array

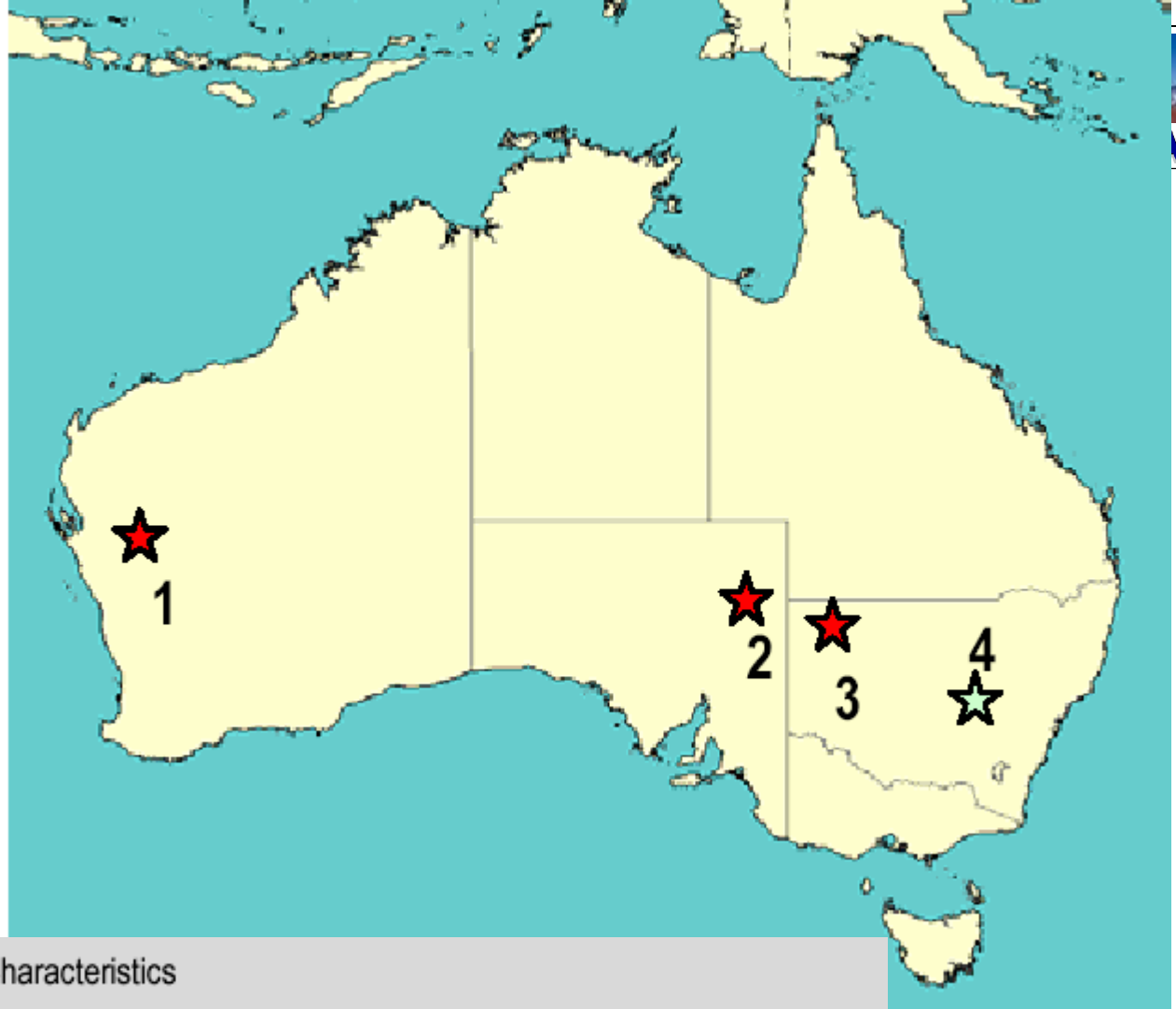


Initial Australian Site Analysis

Submitted by
The Australian SKA Consortium Committee

Prepared by
The Australia Telescope National Facility and
Connell Wagner

31 May 2003



Australia

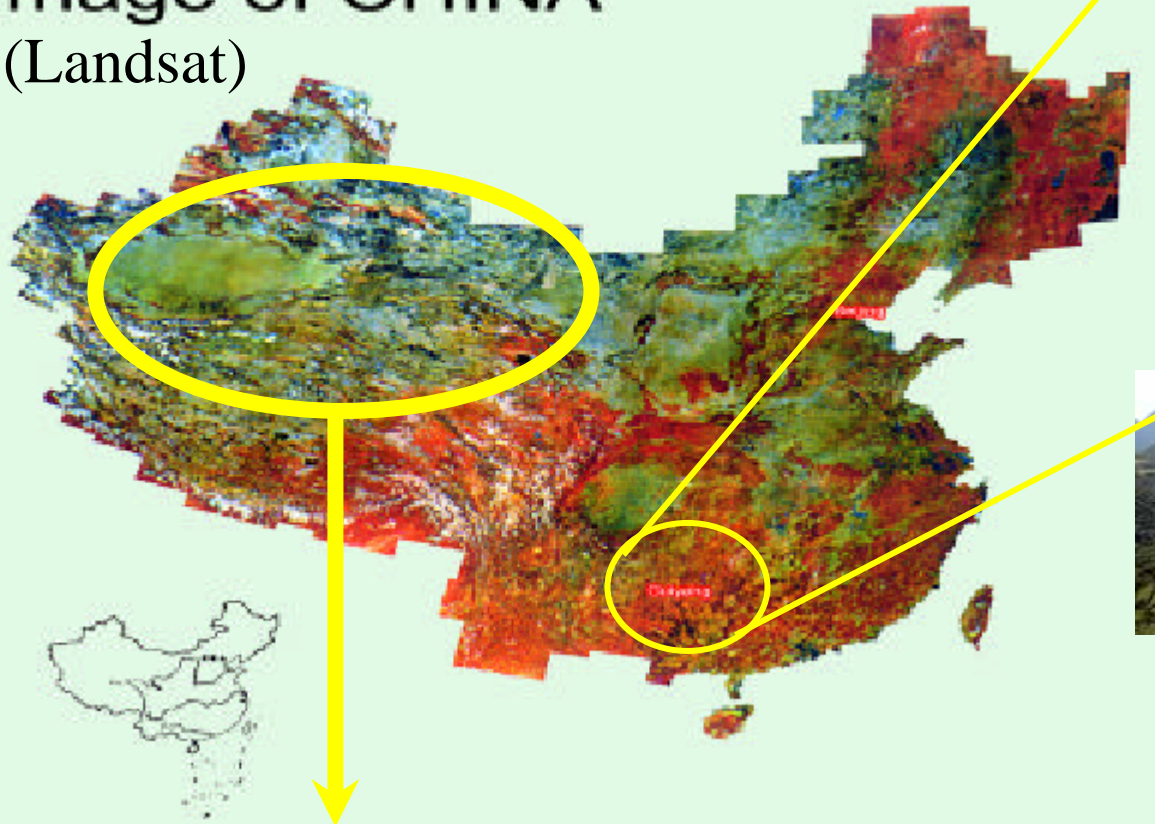
Table 2-1 Candidate Sites and Their Characteristics

Site	Map Index	Nominal Position	RFI Rating	Existing Infrastructure
Mileura (WA)	1	26° 30' S; 117° 04' E	Excellent	Fair
Murnpeowie (SA)	2	29° 18' S; 139° 03' E	Excellent	Fair
Reola (NSW)	3	29° 52' S; 143° 05' E	Excellent	Fair
Parkes (NSW)	4	33° 00' S; 148° 16' E	Very good	Very good

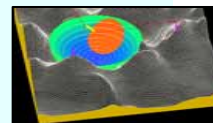
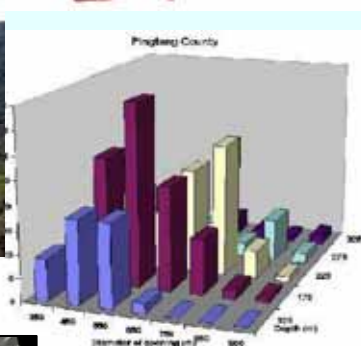
Australia #1



Image of CHINA (Landsat)



KARST



**SKA
in
China**

简介

中国贵州省普定县
尚家冲喀斯特洼地

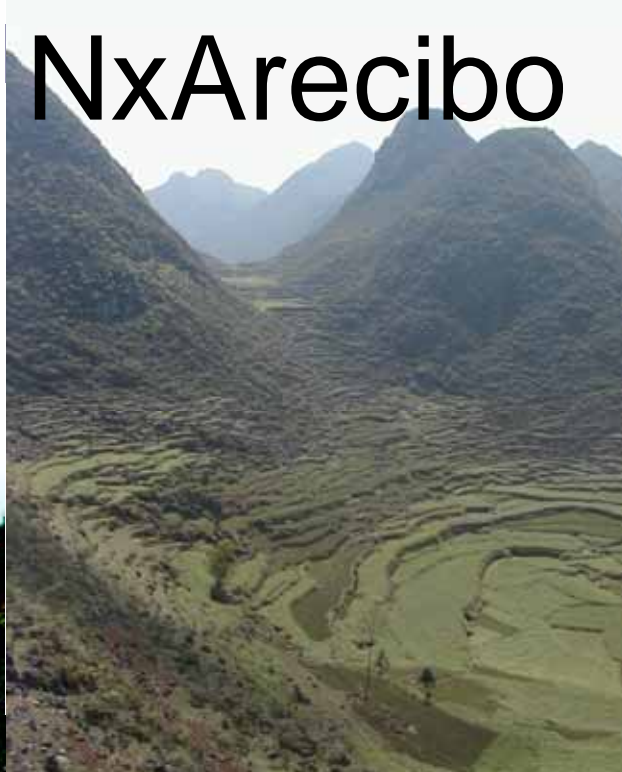
*Brief Introduction on Shangjiachong
Karst Depression in Puding County,
Guizhou Province, China*

NxArecibo



Karst region for array
of large Arecibo-like
Telescopes

$D > 200 \text{ m}$



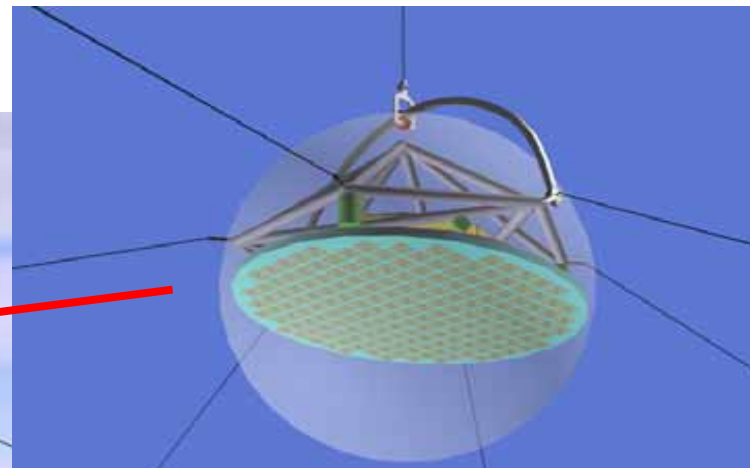
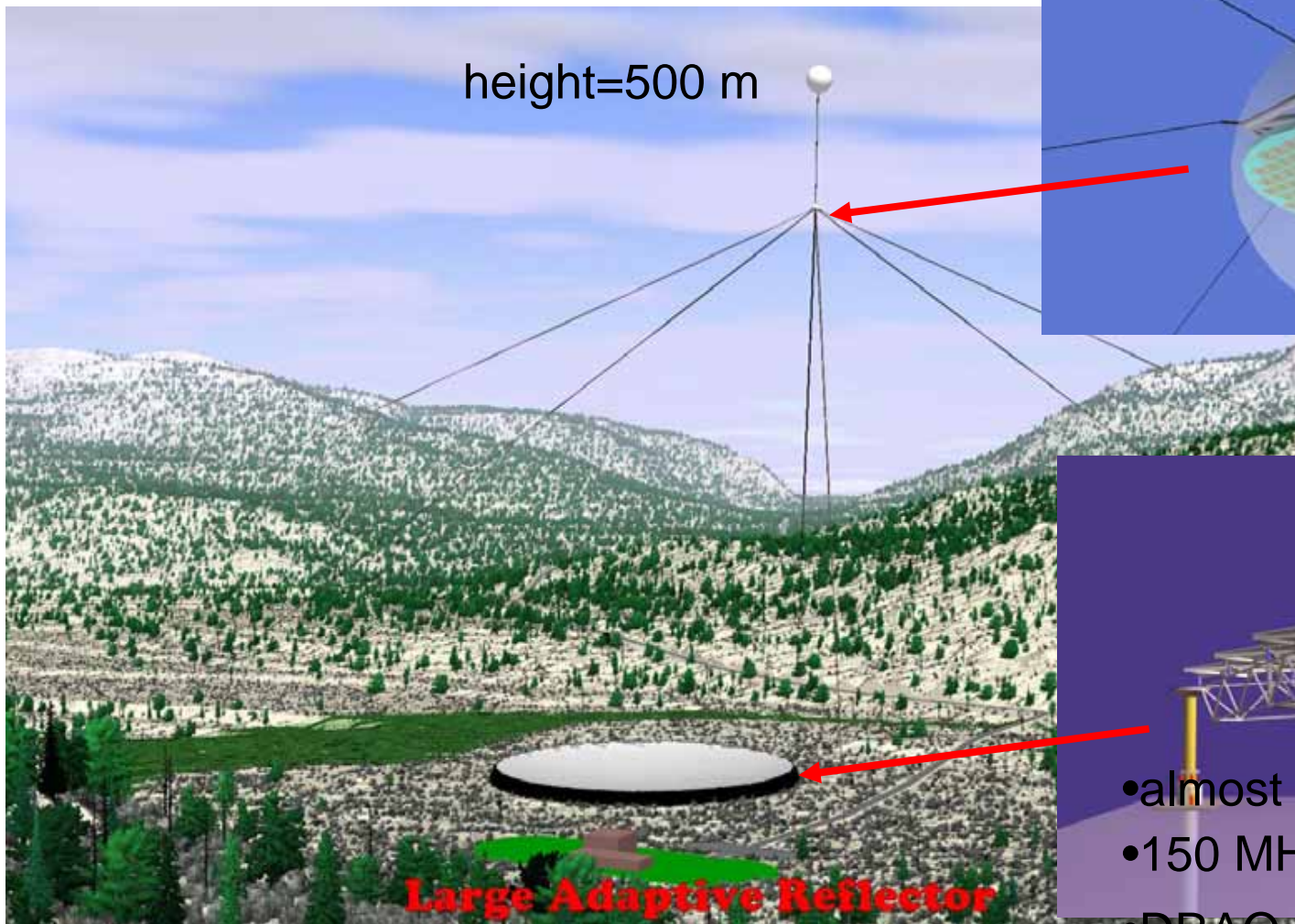
中国 FAST 工程选址组
FAST 工程地方协调组
贵州省普定县人民政府
一九九九年十月

Site Selection Group of China for FAST Engineering Program
Local Coordination Group for FAST Engineering Program
People's Government of Puding County, Guizhou Province

October, 1999



- 150-200m diameter stations
- large F/D
- focal platform supported by aerostat



- almost flat panels
- 150 MHz to 22 GHz
- DRAO, U Calgary



LAR Prototyping

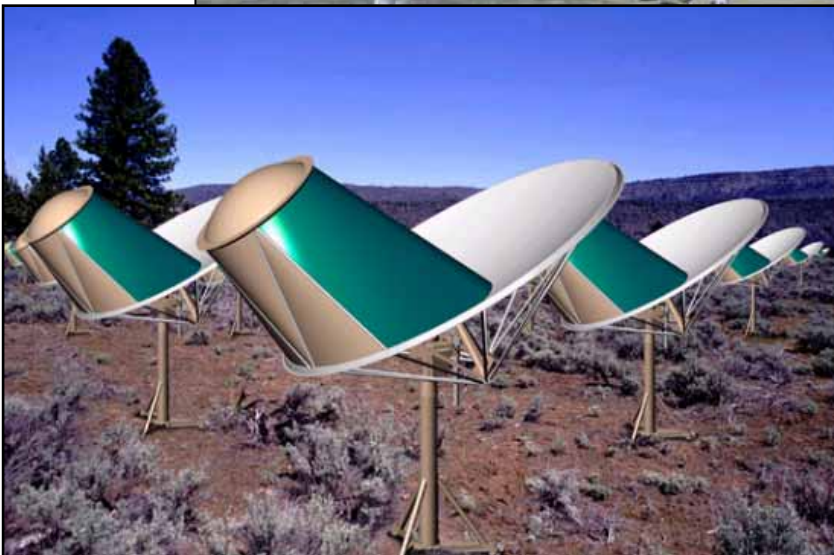
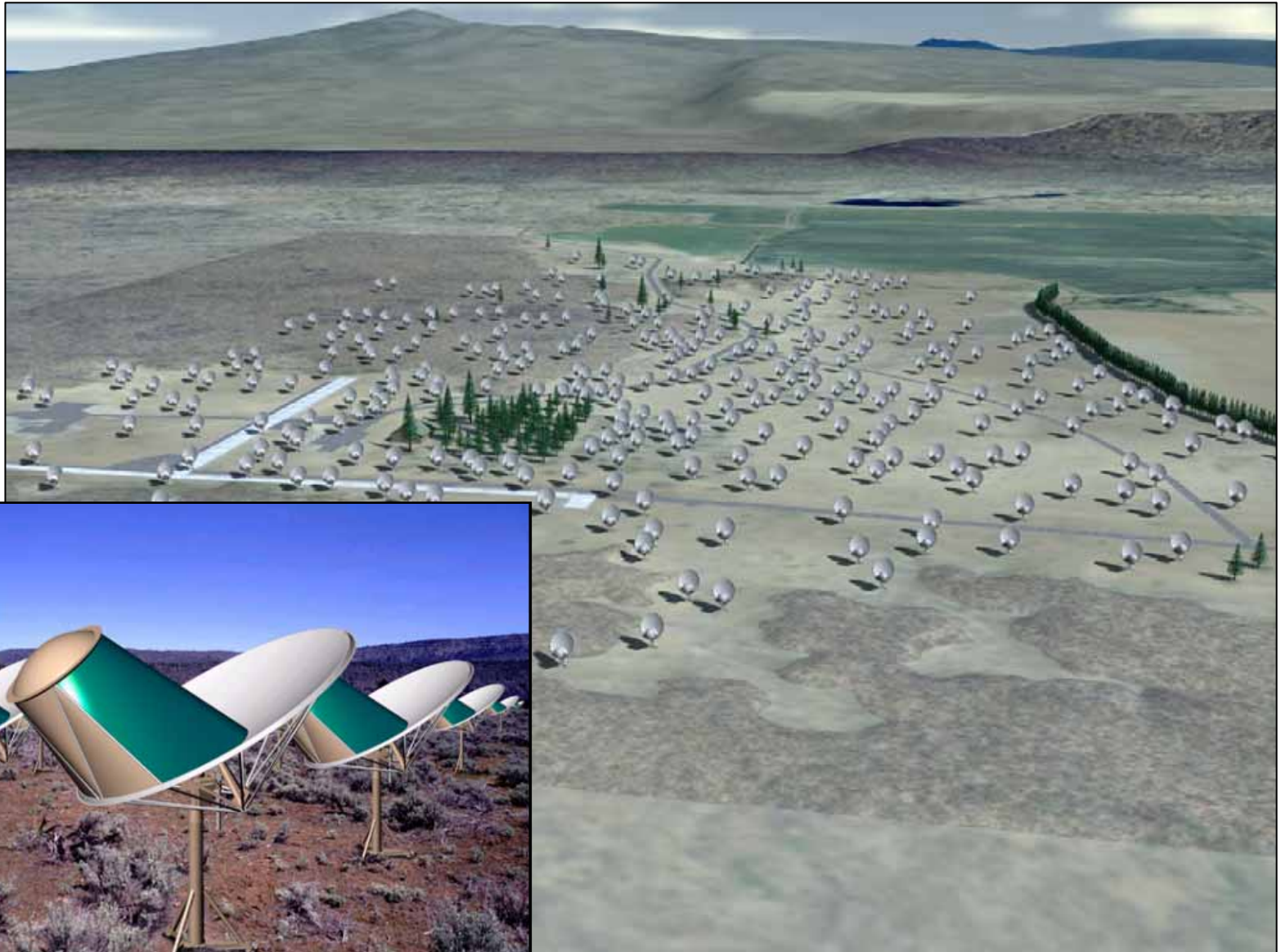
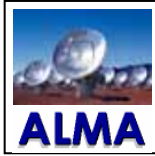


Instrument Package



- Focal Plane Array package covering 0.7-1.4 GHz
- RF Feed design
- Beam forming
- Reflector actuators

The ATA in 2005





Mass-produced parabolas: the Allen Telescope Array



- SETI Institute
- UC Berkeley
- 100 m equivalent
- 350 x 6.1 m parabolas
- 0.5-11 GHz
(simultaneously)
- 2.5° FoV at 1.4 GHz
- 4 simultaneous beams
- 206 antennas in 2005

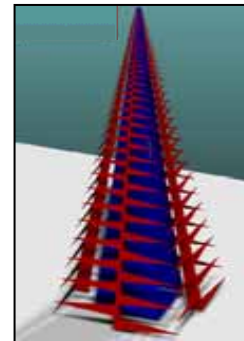
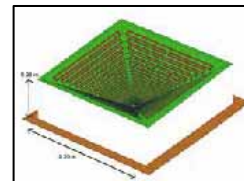
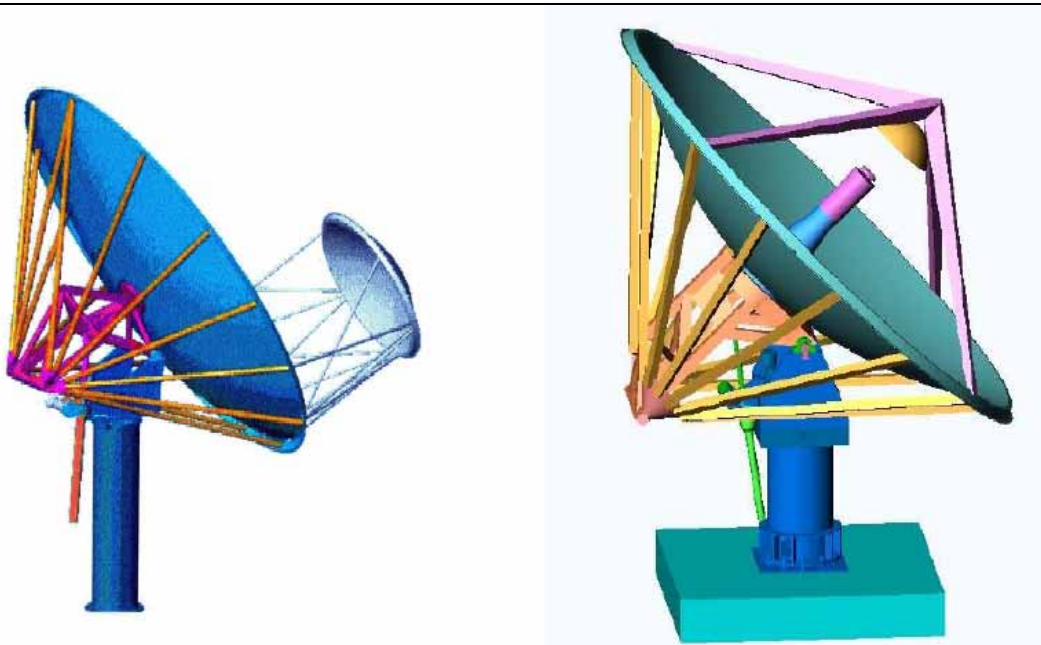


Large N: Inexpensive Antennas

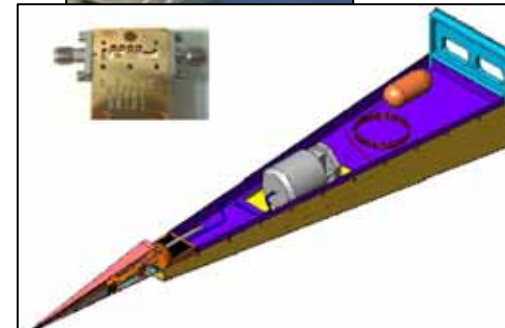
Large-N/Small-D

12 m Hydroformed Dishes

Offset Gregorian Symmetric Cassegrain

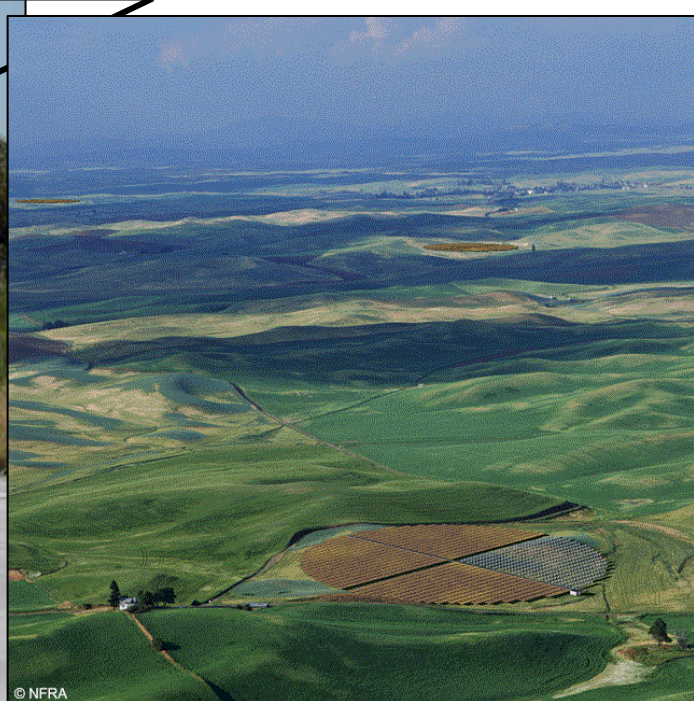


Wideband
Cryogenic
Feeds & Receivers





Thousand Element Aperture Array: ASTRON, NL





funding

1. prototype development phase to 2007: ~ 30 M€ (Australia, Canada, China, India, NL, US)
+ 65 M€ (LOFAR) + 20 M€ (Allen Telescope Array, USA) + 5 M€ (NASA Deep Space Network)
(+ FP6 Design Study (Europe) and TDP (US) if successful)
2. global demonstrator/SKA phase 1 (2008-2011): 50-100 M€
3. full construction (2012 - 2020): ~1 B€ (~1000 €/m²)
 - 40% Europe
 - 40% USA
 - 20% Australia, Canada, China, India, Japan, South Africa,



我々はどうする？

SKAサイエンスミーティング：04/11/12

- ・何が面白そうか
- ・どう関わるか

議論が必要

<http://alma.mtk.nao.ac.jp/~iguchi/SKA/SKAScienceMeeting20041112.htm>