

光赤外線分野の展望

次世代天文学 - 大型観測装置とサイエンス -

2004/12/25 於東大理

土居 守(東大・理)

光赤外線分野のプロジェクト紹介

土居 守(東大) 世界情勢・HOP・JTPF・JASMINE・ILOM

中川貴雄(JAXA) SPICA他

家 正則(国立天文台) JELT・国立天文台プロジェクト室関連



Yerkes 1m (1897)



Palomar 5m (1948)



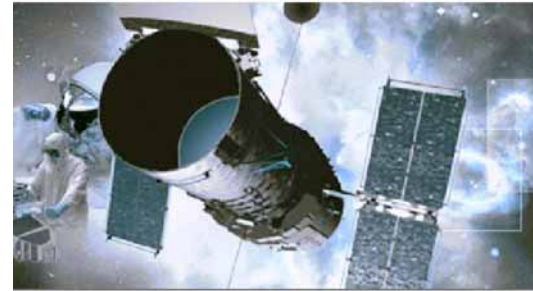
Subaru 8m (1999)

スペース望遠鏡

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

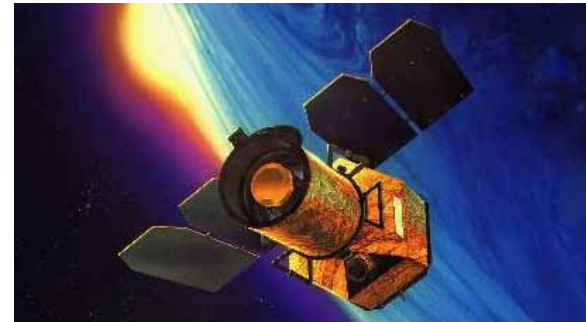
$3.6\sim 160\ \mu\text{m}$



GALEX 紫外

口径50cm

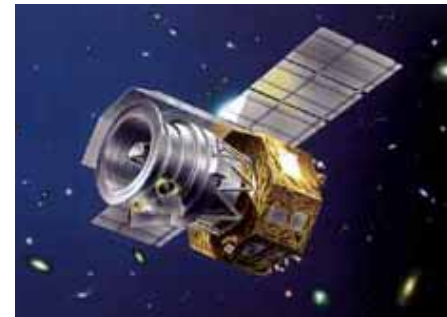
$0.135\sim 0.280\ \mu\text{m}$



Astro-F (soon) 近赤外～遠赤外

口径67cm

$2\sim 200\ \mu\text{m}$

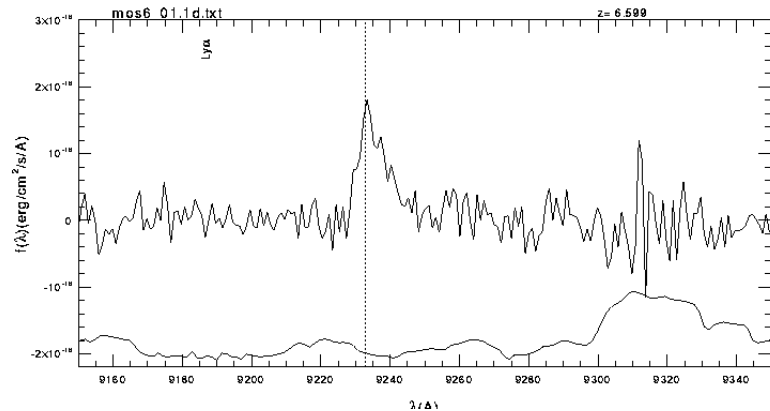


Frontierその1 最遠の銀河

$z \sim 6.6$ のライマン 輝線銀河
Kodaira et al. 2003



Subaru Suprime-Cam(左) FOCAS(右) による

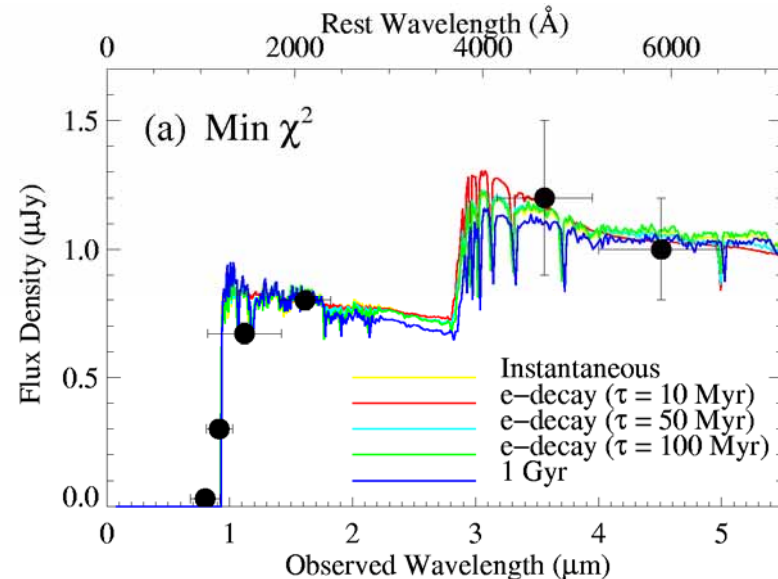
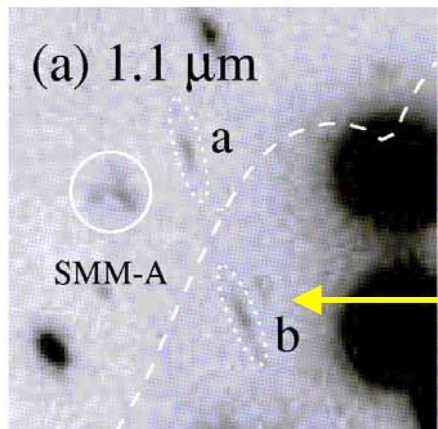


915nm

935nm

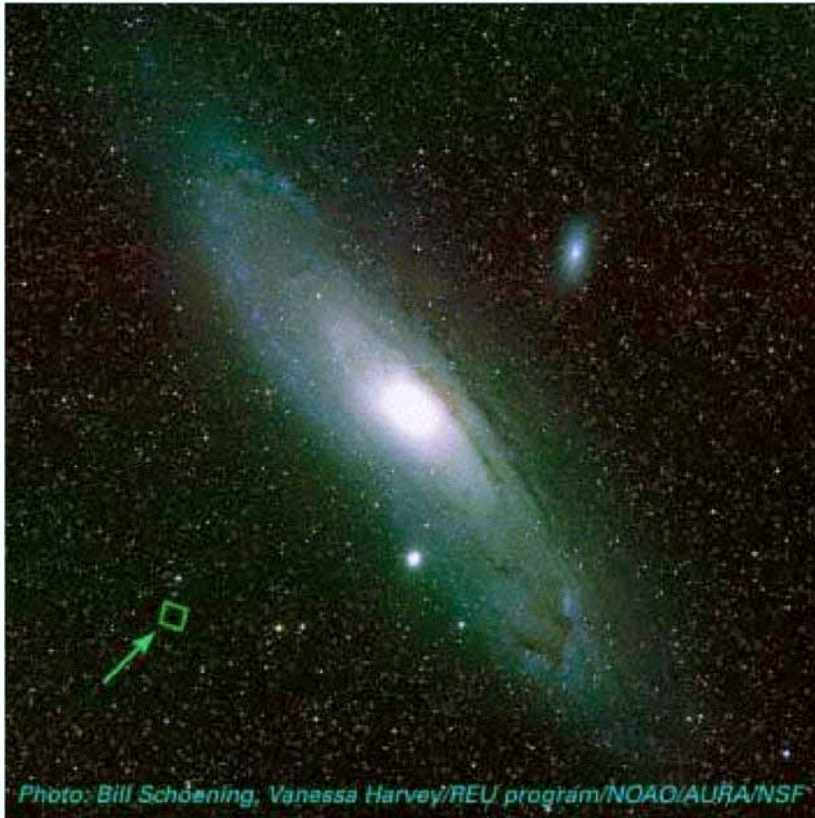
$z \sim 7$ の銀河候補(重力レンズ天体)
Egami et al. 2004

HST/NICMOS(左) SpitzerST他(右) による



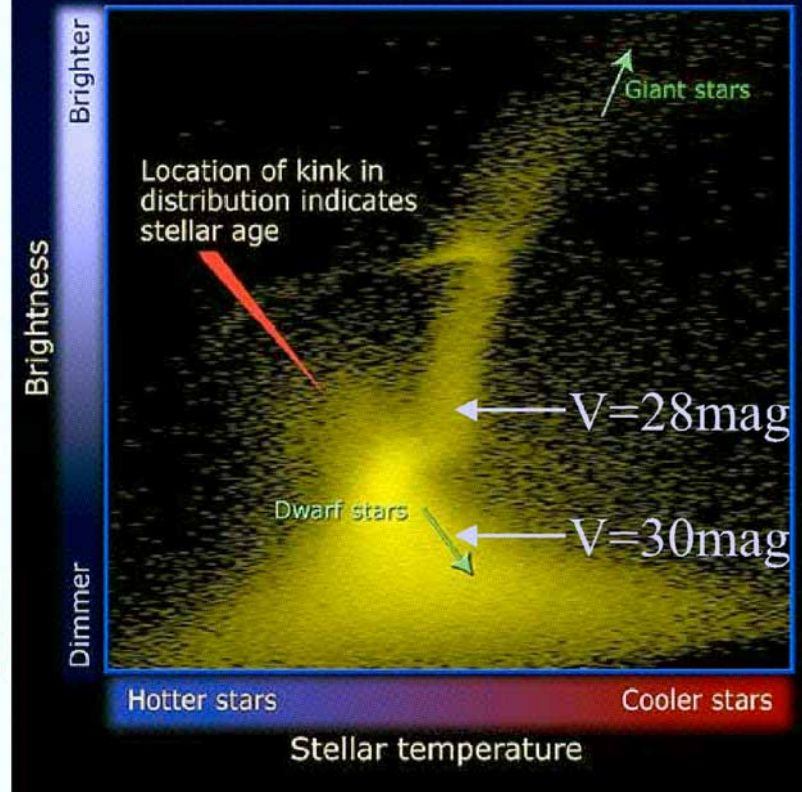
Frontierその2 M31のHR図

ACS/HST photometry of M31's halo
(using 120 HST orbits!)



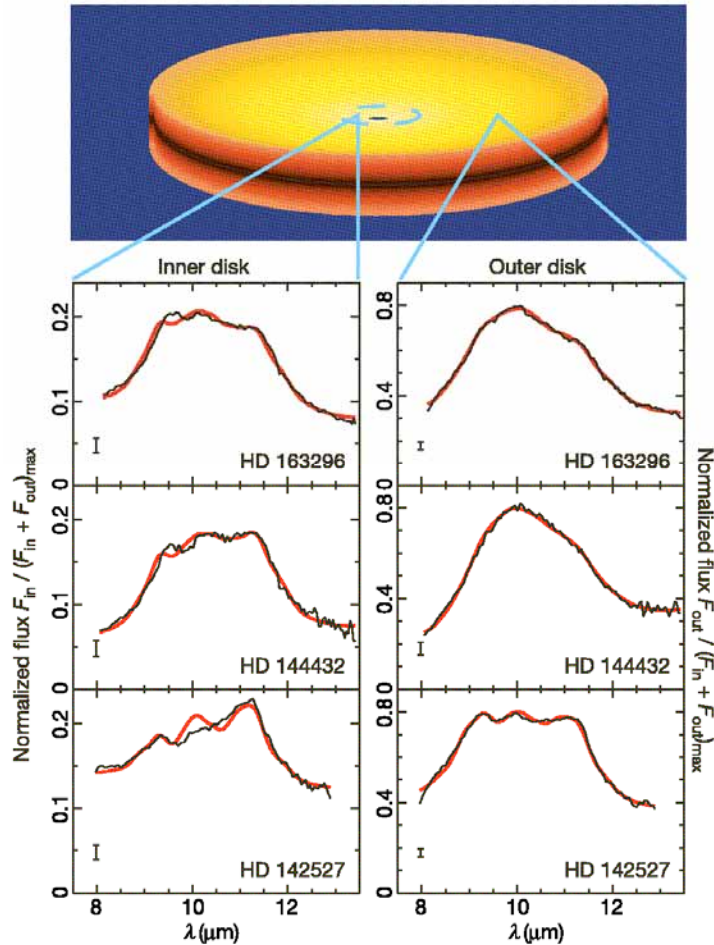
Hubble Space Telescope helps scientists track stellar population in M31 halo

Stars in M31 halo have a wider age range (6–13 billion years) than those in the Milky Way halo (11–13 billion years).



From HST press release
(光赤外将来計画検討会千葉柁司氏資料より)

Frontierその3



VLT/MIDI 8.2m望遠鏡103mベースライン
による約20masの空間分解能で
proto-planetary diskを内外に分離して
中間赤外線分光

from van Boekel et al. 2004
cf. Okamoto et al. 2004



世界の**超大型**(**汎用望遠鏡**)計画

地上超大型望遠鏡

TMT (**CELT**, GSMT) 30mセグメント鏡 2012??

Giant Magellan 8.4m × 7(有効口径~21m)

OWL 100m ...

スペース大型望遠鏡

JWST 6.5m 2011??

日本

地上超大型望遠鏡

JELT 家氏講演

30m 級

日本独自の技術開発を進めながら国際協力も視野にいれて

スペース大型望遠鏡

SPICA 中川氏講演

3m級

JWSTよりも長波長側で相補的に、冷却望遠鏡

30m Ground-Based Telescopes: TMT



HST



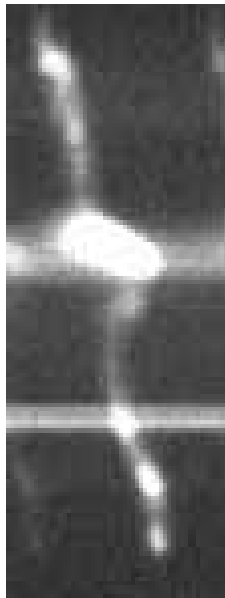
TMT

(Figures by Richard Ellis)

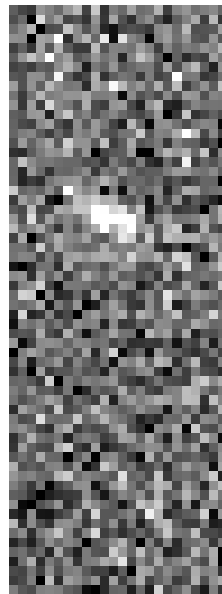
30mの威力

$z=1.5$ の銀河のH α スペクトル

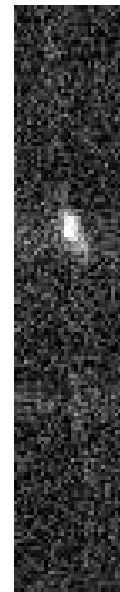
H α in typical spiral galaxy: 10^5 sec exposure



$z=0$



$z=1.5$
8m

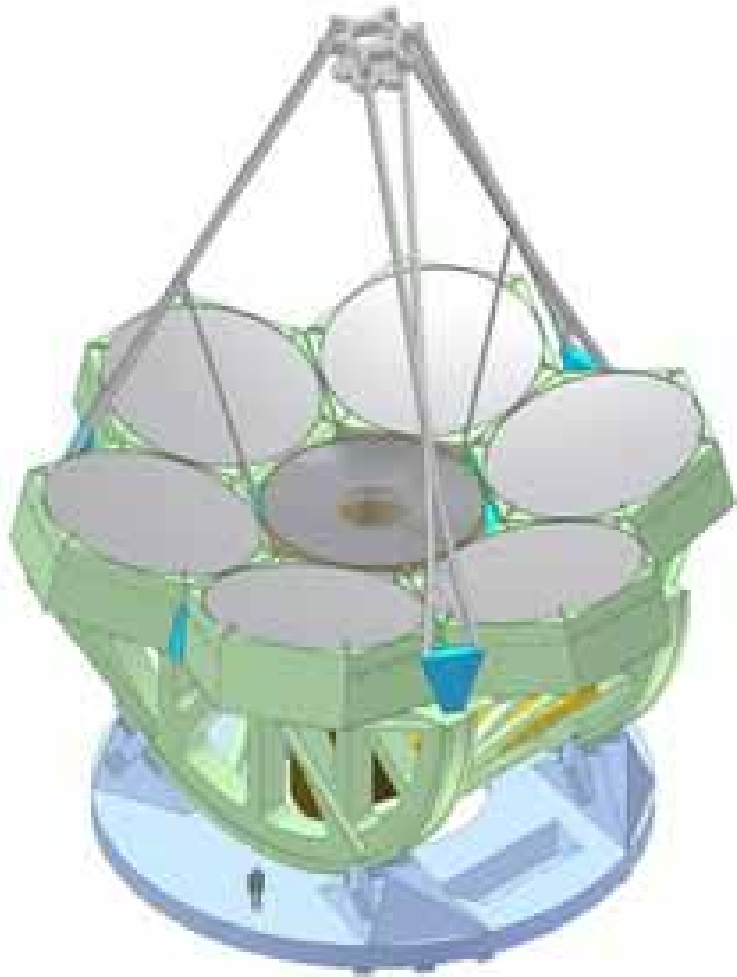


$z=1.5$
20m

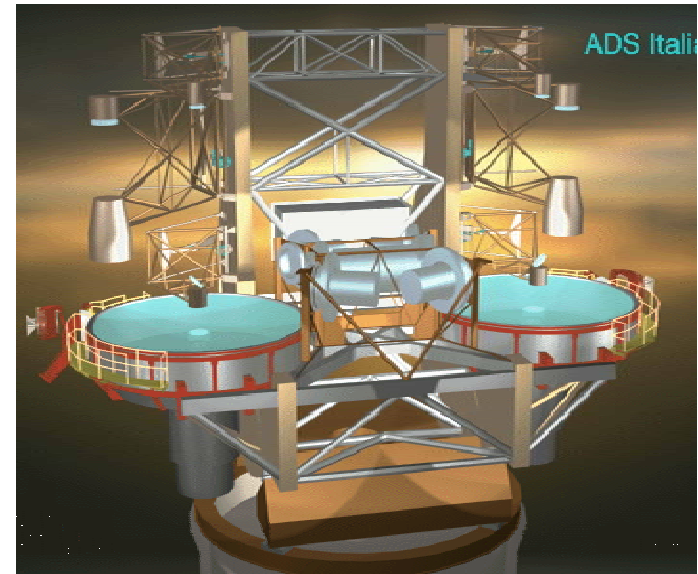


$z=1.5$
30m

Giant Magellan Telescope



8.4m × 7(有効口径~21m)

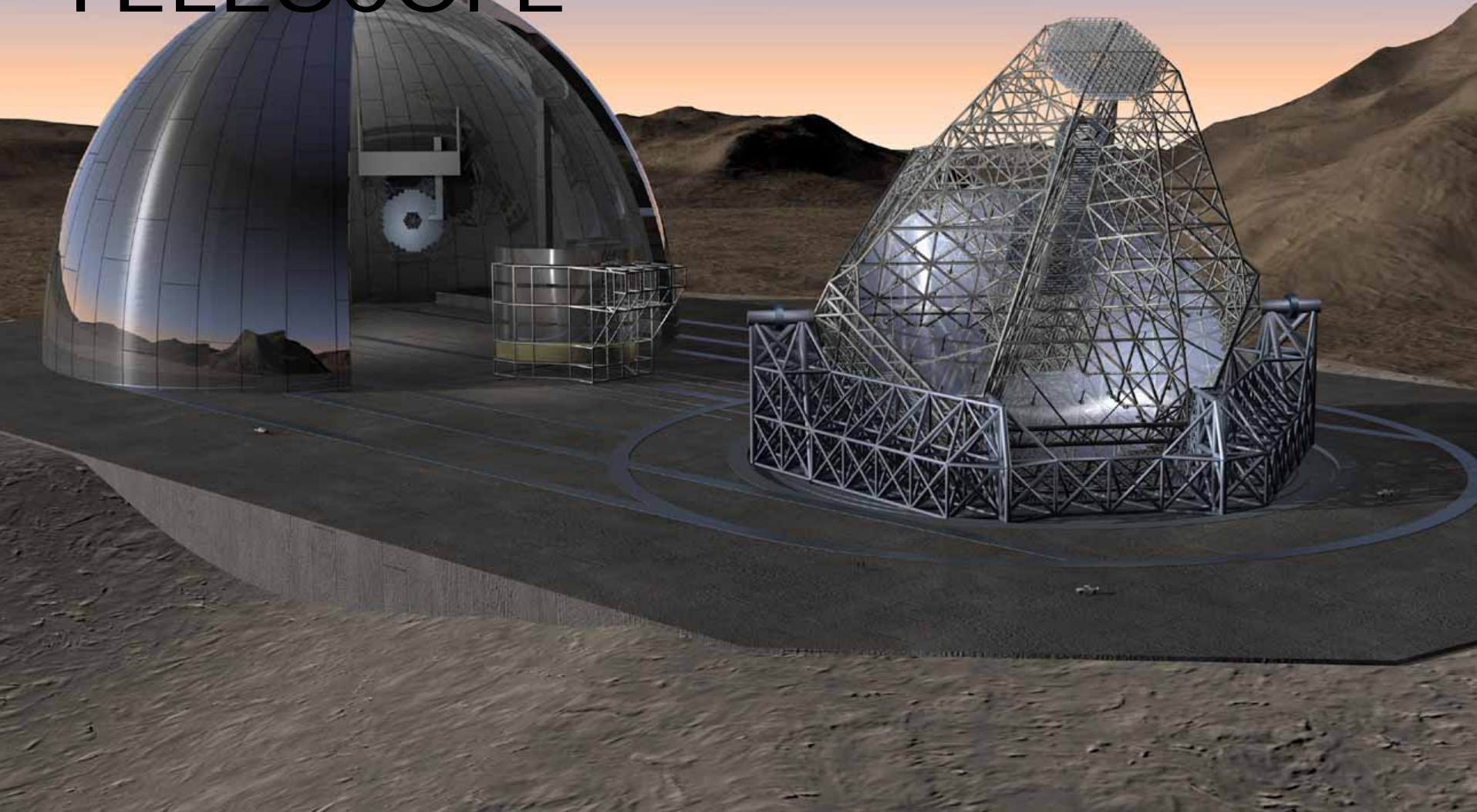


LBT 8.4m × 2



THE OWL 100-M

TELESCOPE



James Webb Space Telescope

口径 6.5m

観測波長域 0.6-28 μm

空間分解能 ~ 0.1 arcsec

打ち上げ予定 2011年8月

観測装置

[Near Infrared Camera \(NIRCam\)](#)

0.6-2.3, 2.5-5 μm 2×5 分角

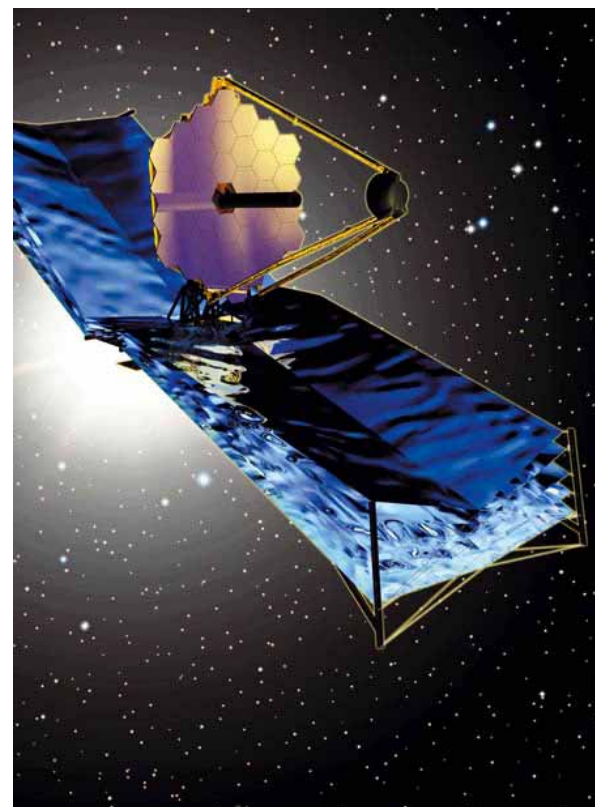
[Near Infrared Spectrograph \(NIRSpec\)](#)

0.6-5 μm 3.4分角

R \sim 100grism, R \sim 1000 MOS, R \sim 3000 IFU

[Mid Infrared Instrument \(MIRI\)](#)

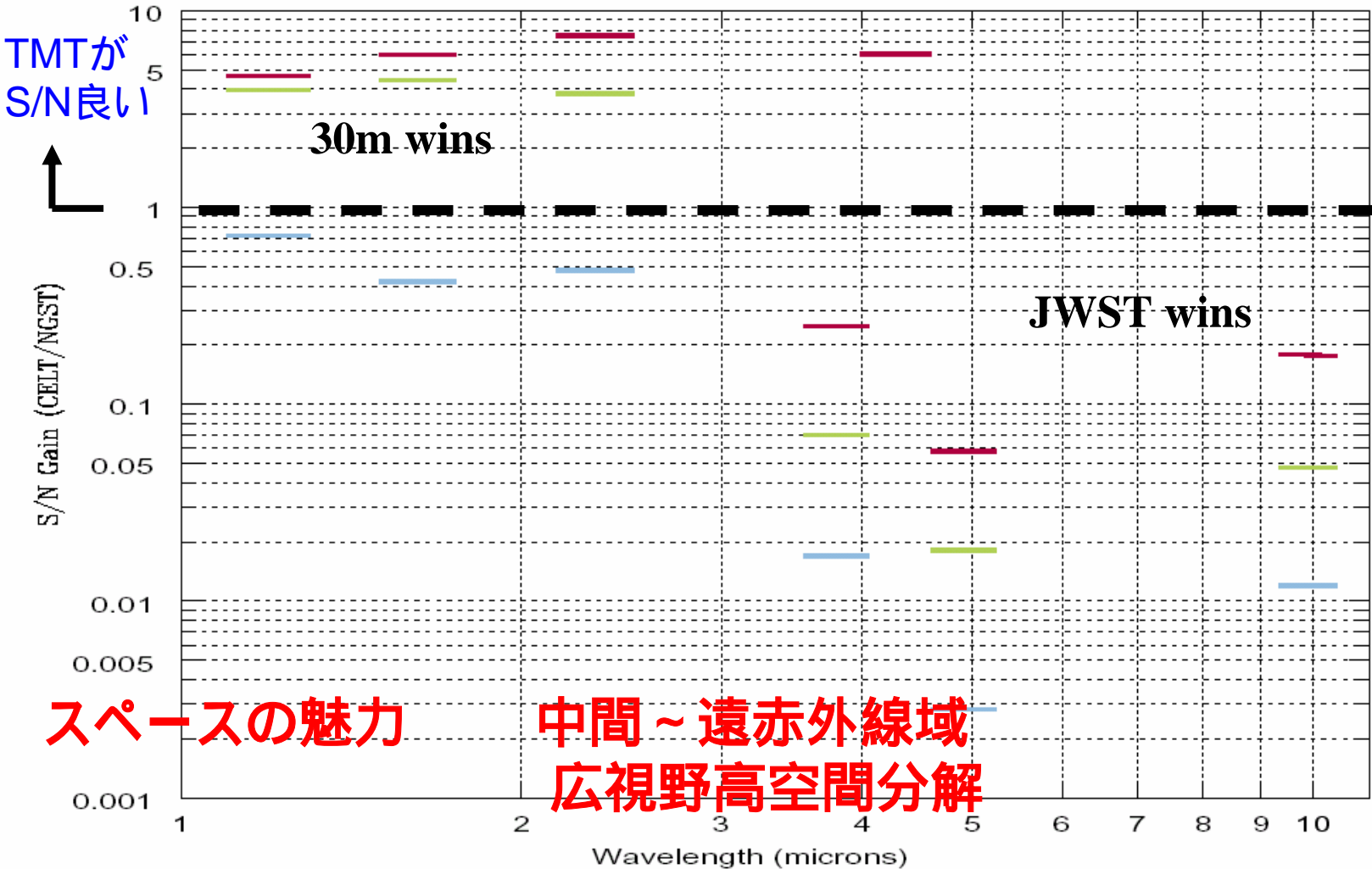
5-27 μm 1.5分角



30m TMT vs 6.5m JWST

(近赤外 ~ 中間赤外域) Adaptive Opticsなし

— R=10,000
— R= 1000
— R=5



スペースの魅力

中間 ~ 遠赤外線域
広視野高空間分解

$t=4 \times 1000s$, $S/N=10$, *no AO!*

By Richard Ellis

CELT: adapted from
Gillett & Mountain (1998)

日本の光赤外将来計画

- 地上超大型望遠鏡 高空間分解能・高分散
 JELT (家氏)
- スペース大型望遠鏡 中間・遠赤外で高感度
 SPICA (中川氏)
- スペース広視野望遠鏡 広視野高空間分解
 HOP
- スペース高コントラスト望遠鏡 惑星探査
 JTPF
- スペース位置天文衛星 高精度astrometry
 JASMINE
- 月面望遠鏡 月惑星科学(with位置天文)
 ILOM

スペース広視野望遠鏡

宇宙へ出る利点の一つ

Adaptive Opticsなしでも高空間分解能
広視野が可能

SNAP (Supernova Acceleration Probe)

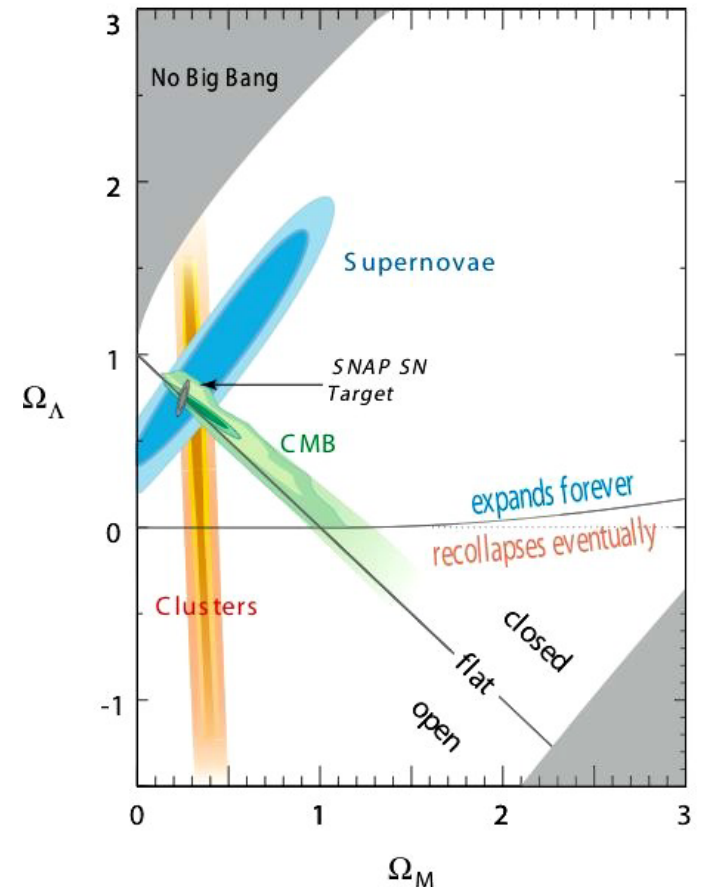
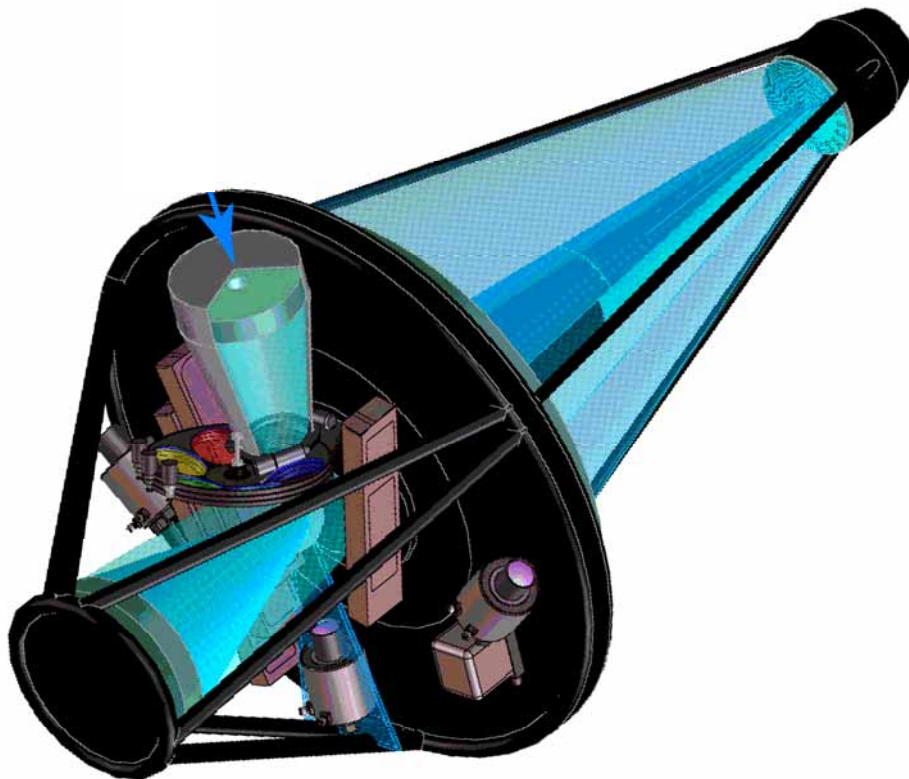
2m広視野望遠鏡

2014以降？

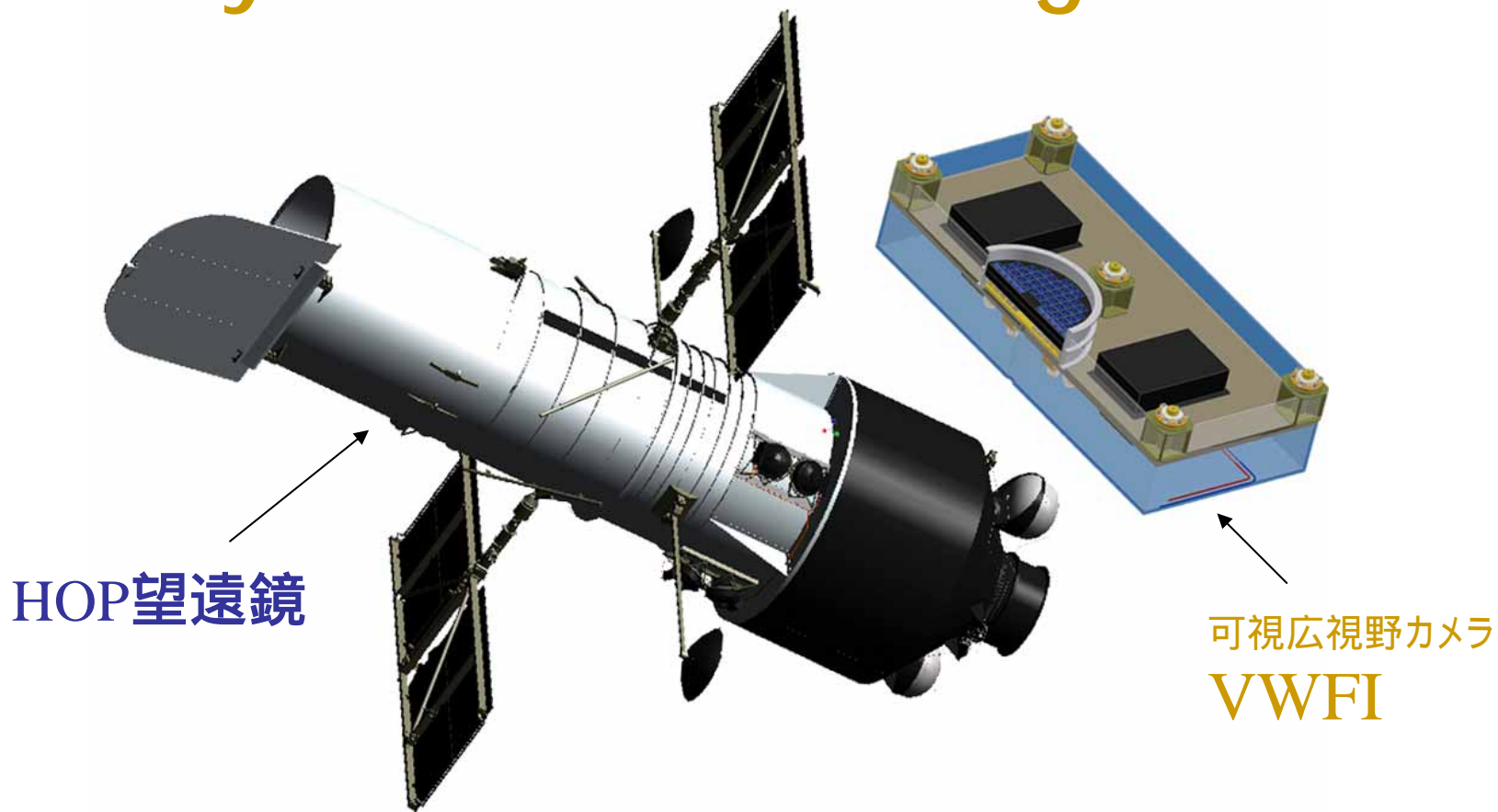
HOP (VWFI)

SNAP (Supernova Acceleration Probe)

2.0m広視野宇宙望遠鏡 (視野1.37平方度)
撮像・分光 (0.35-1.7 μm , 0.34平方度 \times 3) L2軌道
数千個のIa型超新星によるダークエネルギー測定など
かなり大変なプロジェクト 2014? 米国中心



Hubble Origins Probe 衛星 Very Wide Field Imager 計画



Hubble Origins Probe とは？

ハッブル宇宙望遠鏡・・放置すれば、2007 - 2008年に運用停止
残された2つの製作済み観測装置は？

(1) スペースシャトル有人サービスミッション



(2) ロボットによる修理・装置交換・deorbit

(3) ハッブルの遺産を活用し、後継機(コピー)を
迅速に製作、打ち上げ = Hubble Origins Probe

HOP 望遠鏡 2.4 m 軽量鏡、球面収差無し、ロケットによる
2010年打上予定(サービスミッションは無し)

Wide Field Camera 3

基本機能	撮像・グリズムスリットレス分光 紫外・近赤外2チャンネル
観測波長	IR: 850-1700 nm UVIS: 200-1000 nm 3grisms, 100 filters
視野	IR: 2.1 x 2.3 (0.13"/pix) UVIS: 2.7 x 2.7 (0.04"/pix)
検出限界	IR: H=26 UVIS: 29.1 (10h, S/N=5, point source)

Cosmic Origins Spectrograph

基本機能	紫外線分光。NUV と FUV で低・中分散分光
波長範囲	FUV: 115-205 nm NUV: 170-320 nm
開口・分解能	2.5" 円形開口 2000-3000 および 20000-24000
検出限界	F(130nm)= 10^{-14} erg/s/cm ² S/N=30, 9200sec, R=20000

詳細は、http://www.stsci.edu/hst/HST_overview/instruments

日本の参加: Very Wide Field Imager

HOP 第3の主要観測装置として、
日本が開発・製作する超広視野カメラ

VWFI Key Science

遠方超新星の探査と宇宙論
z=6-9の初期宇宙銀河探査
銀河形態の起源
広視野・重力レンズ観測に
よる宇宙論

観測波長	500- 1000 nm (短波長側検討中)
空間解像度	0.05" pix (PSF ~0.1" 80%EE)
視野	~150 平方分角 HST ACS の15倍
フィルタ	検討中 撮像のみでグリズムは無し
運用イメージ	大規模サーベイ中心の運用 すばるや ALMA との有機的結合
検出限界	m~29等 (20h、点源、SN=5)

日本が主導する VWFI の特徴

波長 1 μ m (=1000 nm) までの高い量子効率
をもたらす完全空乏型CCDの採用
広視野に渡って高解像度の星像を実現する
補正光学系

VWFIの視野を150'とした場合、5000 orbits
(正味約1.5年)で達成出来るサーベイ視野と深さ。

	限界	目安	Obts.	色数	達成可能な面積
極・深探査	~29等	HUDF	50	4	約1平方度
深い探査	~28	HDF-N	7	4	約7平方度
浅い探査	~27	COSMO	1	1	約200平方度

高赤方偏移の Ia 型超新星探査と宇宙膨張

赤方偏移 $0.5 < z < 2$ において、 ~ 1000 個に達する Ia 型超新星を検出 ($m_{\text{lim}} \sim 26-27$ 等、2バンドで少なくとも5点以上の光度曲線)・同定し、数%の精度で過去100億年に及ぶ宇宙の減速・加速膨張の歴史を明らかにする。

VWFI サーベイ + WFC3 によるグリズム分光
+ 地上 AO 分光

$z=6-9$ 高赤方偏移星形成銀河の広域探査

$z=6-9$ の初期宇宙における星形成銀河の
広域 ($0.1-1 \text{ deg}^2$) 探査とマッピングを行う

- i-drop ($z \sim 6$) $\sim 10^4$ 個
- z-drop ($z \sim 7$) $> 10^3$ 個 + limited coverage by WFC3
- z_R -drop ($z \sim 8-9$) WFC3 との共同で...

—————→ ALMA / JWST へのターゲット供給も

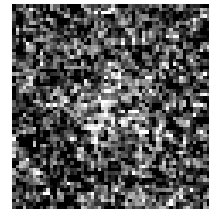
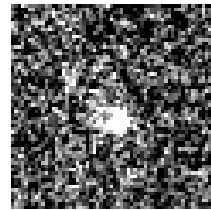
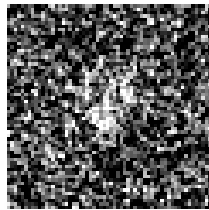
Goals of VWFI Surveys (III) Galaxy Evolution

DEEP
SURVEY

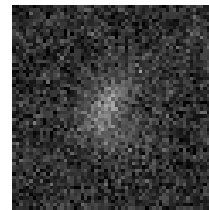
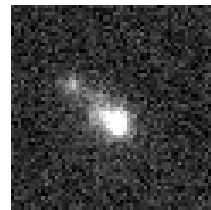
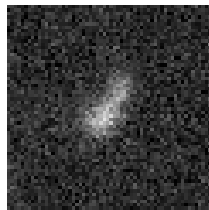
ハッブル系列の起源: $z \sim 1.5$ での静止系可視銀河形態

HUDF の深さ ($z \sim 26$ 等の銀河まで形態分類が可能)で、
1平方度の観測が出来る！

GOODS
5 orbits



HUDF
144 orbits



$z_{AB}=26.3$
 $z_{phot}=1.52$

$z_{AB}=25.7$
 $z_{phot}=1.45$

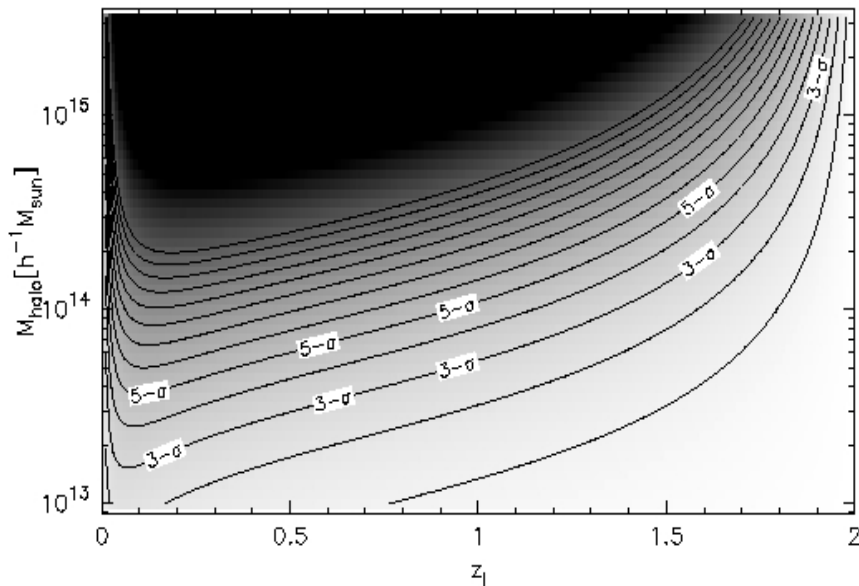
$z_{AB}=26.1$
 $z_{phot}=1.60$

No evolution で M^*+1 の銀河まで
形態を調べることが可能

Photo-z is possible with ground-base
UBVRI ($m < 27-29$) + JHK ($m < 25$)

Weak Lensing による Mass Mapping

- 宇宙からの観測で、高解像度 $m \sim 27$ 等の銀河まで、
~ 100 / の銀河サンプルを用いて weak lensing 解析
- 広い視野での撮像により、点源を用いた星像修正がより有効に働く
- A few $\times 10^{13} M_{\text{sun}}$ のダークマタ - ハローまで検出できる => 宇宙の質量分布
質量で見る大規模構造



Hamana et al. 2003

~ 10 - 100 平方度の広視野
撮像により、宇宙の質量分布、
その統計的性質を解明する

2004年 NASA Origins: Future Mission Concept Study の
ひとつとして公式に検討開始

2004年 5月 ~ 検討開始 HOP 国内 WG
(天文台、東北大、東大、企業)

2004年 5-12 月 4回の国内 HOP 会議 + 個別検討会議多数
3回の米国 HOP 全体会議 (STScI, JHU)

2005年 1月 NASA roadmap ワークショップ (ヒアリング)

次回 HOP 国内会議 2005年1月18日@三鷹

JTPF

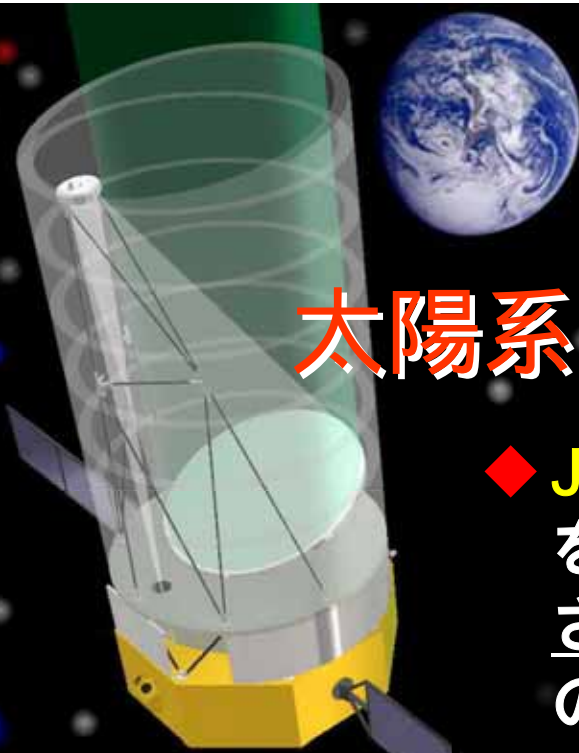
太陽系外地球型惑星検出ミッション

◆ **JTPFとは?** : 地球型系外惑星の直接検出を主サイエンスドライバーとして、さまざまな天文分野への応用を追求する日本のスペース将来計画。

◆ 大別して2つのアーキテクチャー :

可視光高コントラスト望遠鏡 (HCST) : シャープな画像を得やすい可視光望遠鏡で第2の地球を探す。クリーン、高コントラスト、かつ安定した星像性能を追求した望遠鏡。

赤外線干渉計 (名称未定) : 恒星と惑星の明るさのコントラストが小さい中間赤外線波長で第2の地球を探す。スペース赤外線ナール干渉計望遠鏡。



太陽

水星

金星

地球

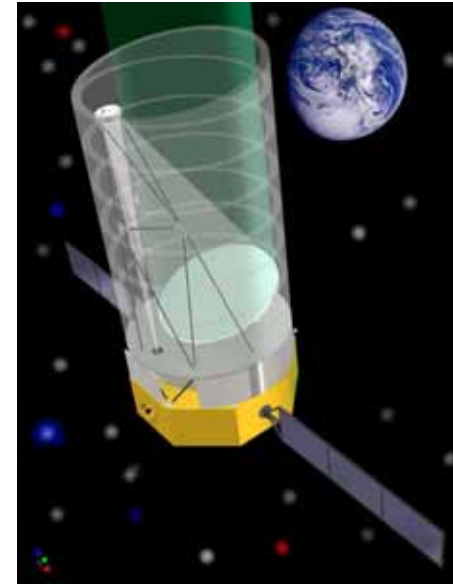
火星

木星

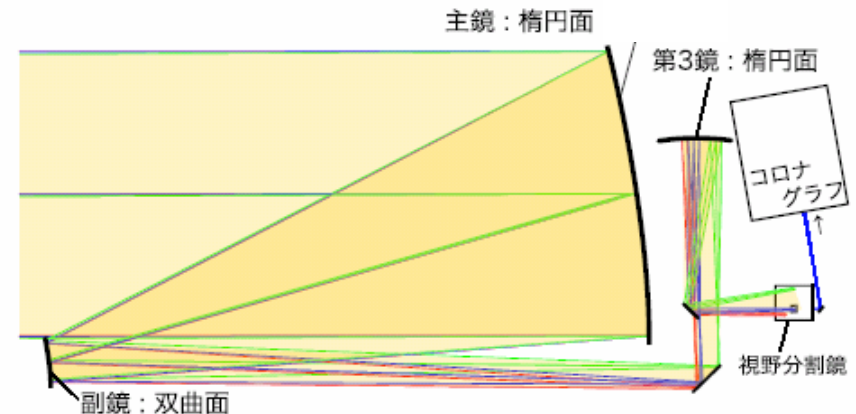
土星

コロナグラフ望遠鏡 (HCST) 案

望遠鏡	口径 3.5m 軸はずし単一鏡
波長	可視・近赤外が主 ($c = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.2-5 \mu\text{m}$) 紫外線もカバー
打上	2015年頃
寿命	5年以上
軌道	太陽-地球 L2
装置	可視近赤外コロナグラフ
	広視野可視近赤外撮像分光器
	紫外線分光器



衛星ミッション想像図



高コントラストと広視野を兼ねた望遠鏡光学系案

詳細は以下サイトの提案書参照

<ftp://optik3.mtk.nao.ac.jp/pub/hidden/jtpf/>

JTPFが目指すサイエンス

◆系外惑星の「直接」観測

◆地球型惑星の直接撮像 (<10pc)

◆木星型惑星の直接撮像 (<50pc)

◆惑星の質量

◆明るさ、色、アストロメトリから導出

◆惑星の分光

◆生命存在の指標：酸素(760nm)、水(940nm)、メタン(890nm)など

◆巨大惑星：太陽系内巨大惑星と褐色矮星を併せた比較惑星分光学を展開

◆惑星の測光・変光

◆気象学的変化や生物学的変化

■系外惑星探査以外にも豊富なサイエンス

■9桁以上の高コントラストを生かしたもの

■褐色矮星の 砂漠、晩期型星の質量放出・非対称性、若い星の星周構造、クエーサー母銀河、スターバースト銀河核周、AGN核周、重力レンズ

■10 視野・0.1" 解像度・30等の可視近赤外深撮像能力を生かす

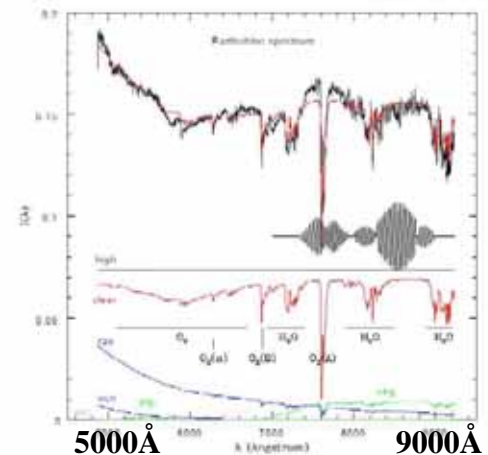
■初期宇宙天体 (First Object) の検出、宇宙で最も古い銀河の探査、広視野での形態・恒星質量マッピング、銀河の内部構造の進化の解明

10pc以内に

G: 22個

K: 42個

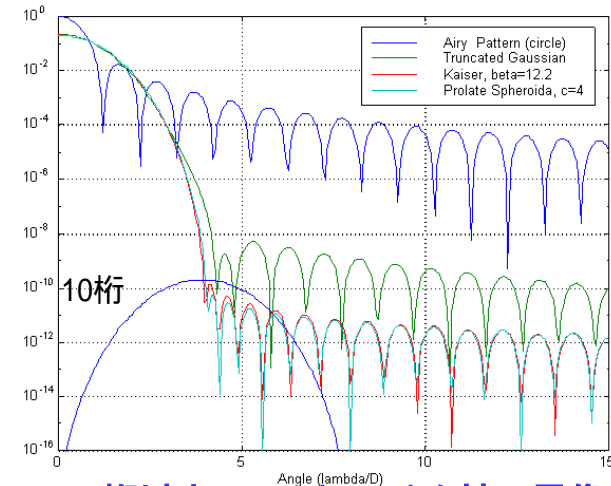
M: 240個



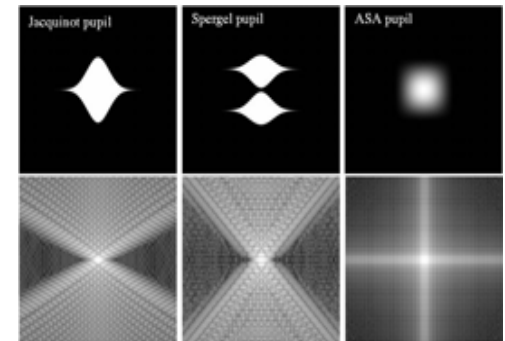
地球照のスペクトル

特徴と技術開発要素 (HCST)

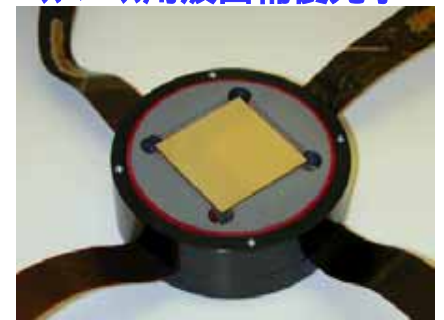
- これまでの天文観測では、波長・感度・解像度を重視。
- 本計画の鍵となるのは、**コントラスト**という、明るい天体のすぐ近くの暗い天体を観測するための技術であり、これまで本格的に追及された事が無いパラメータ。
- **鍵となる技術**
 - **高性能スペース用コロナグラフ**
 - 9桁以上の高コントラストを得るための工夫
 - 最近さまざまなアイデアが提案されている
 - **波面補償光学**
 - コロナグラフを有効稼働させるための鏡面補正（惑星存在空間周波数で $< 0.1\text{nm}$ ）
 - 21x21素子で既に0.025nm実現（JPL）
 - **高精度鏡面**
 - 口径3.5m程度（SPICAの短波長化）
 - 波面補償を必要最低限にする



9桁以上のコントラストを持つ星像



スペース用波面補償光学

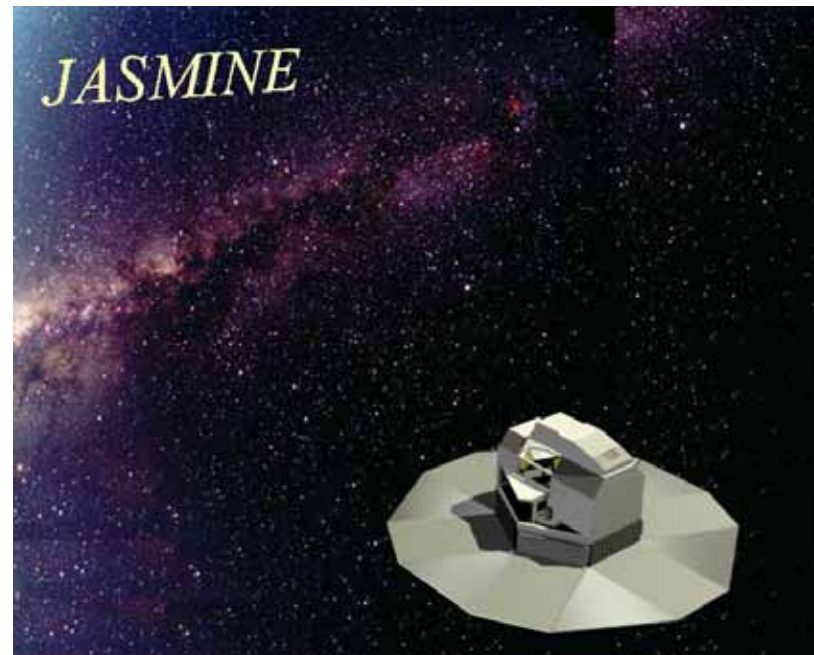


JASMINE(赤外線位置天文観測衛星)

郷田直輝(国立天文台)、JASMINEワーキンググループ

JASMINE ~ Galactic Structure Surveyor ~

—Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration —



JASMINEのミッション概要

観測：近赤外線 (z-band: $0.9 \mu\text{m}$ 付近) によるアストロメトリ (位置天文) 観測を衛星を用いて行う。
星の距離、運動という天文学の様々な分野に役立つ
基本情報を提供

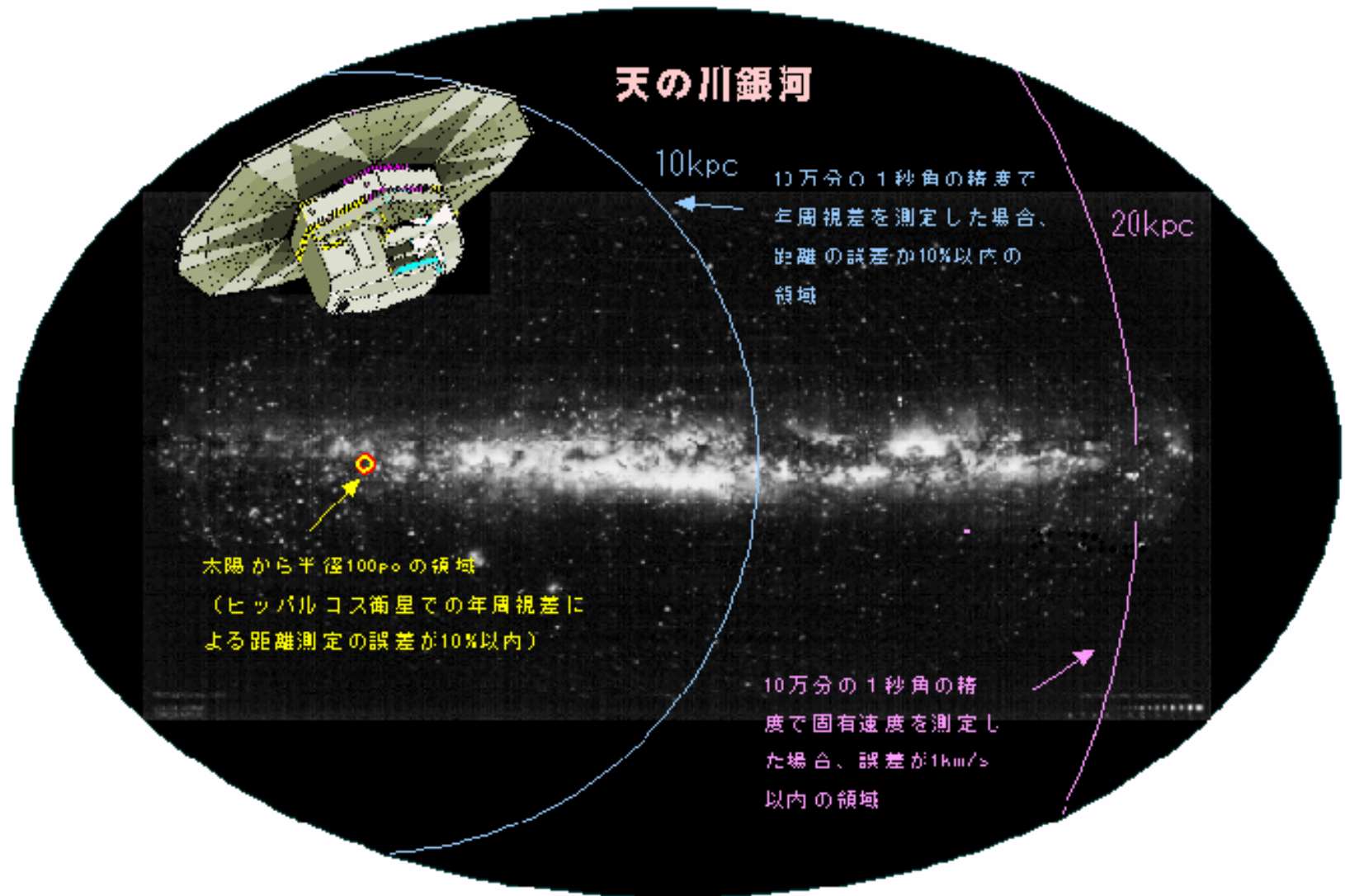
精度：星の位置、年周視差、1年当たりの固有運動を
約1億個の星に対し、約10万分の1秒角の高精度
で測定 ($z < 14\text{mag}$)

観測対象：銀河系内、特に銀河面、バルジなどの天体を
サーベイ (ハロー方向も部分的に行う)

サイエンス：天文学の基本情報を提供
様々な分野に関連。

位置天文精度:1ミリ秒角(1mas) [ヒッパルコス衛星]

→ 10マイクロ秒角(10 μ mas)の時代へ (天文学の大革命)



今後の高精度アストロメトリ計画

計画	機関	装置	打ち上げ予定	星の観測数 (個)	限界等級	精度
Hipparcos	ESA	望遠鏡	1989	120000	12	1mas@V=10
SIM	NASA	干渉計	~ 2009	1万	20	4 μ as@V=20
GAIA	ESA	望遠鏡	~ 2012	10億 (全天)	20	10 μ as@V=15
OBSS	USNO	望遠鏡	~ 2015	10億	20	10 μ as@V=14
JASMINE	日本	望遠鏡	~ 2014	1億 (銀河面)	z=17	10 μ as@z=14
cf.地上 VERA	日本	電波 干渉計	運用 開始	メーザー源 を 1000 個		10 μ as

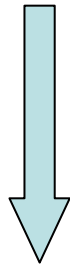
Remark: 欧米の計画はすべて可視光

日本の戦略:

天の川面探査(バルジやディスクの探査)

星が密集し、銀河系形成史や星の情報の宝庫である、バルジやディスク面の高精度な位置天文情報を得る。

可視光———>ダストによる減光効果が大



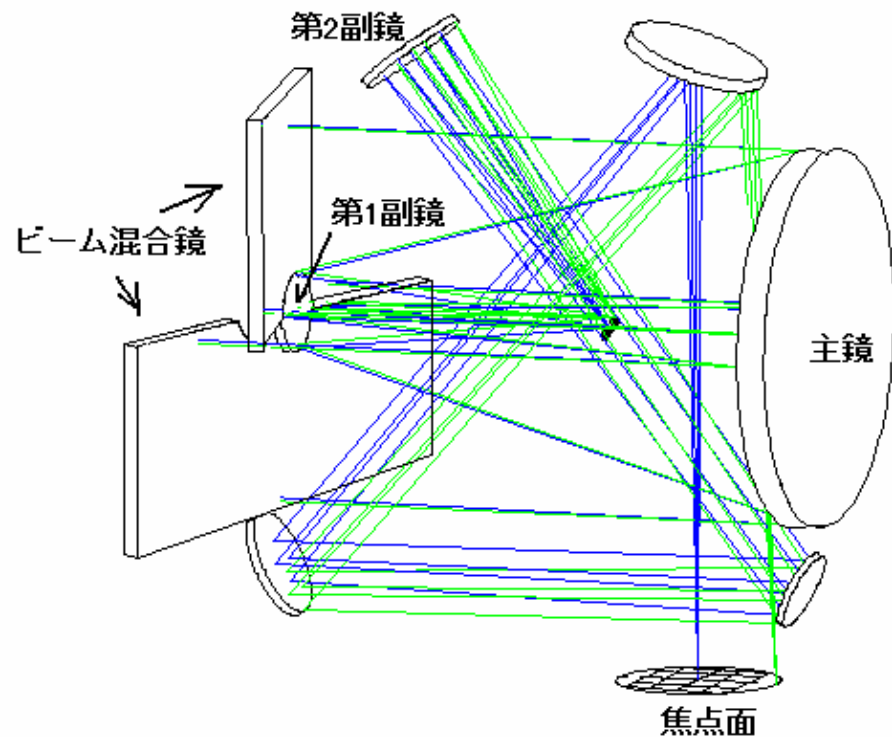
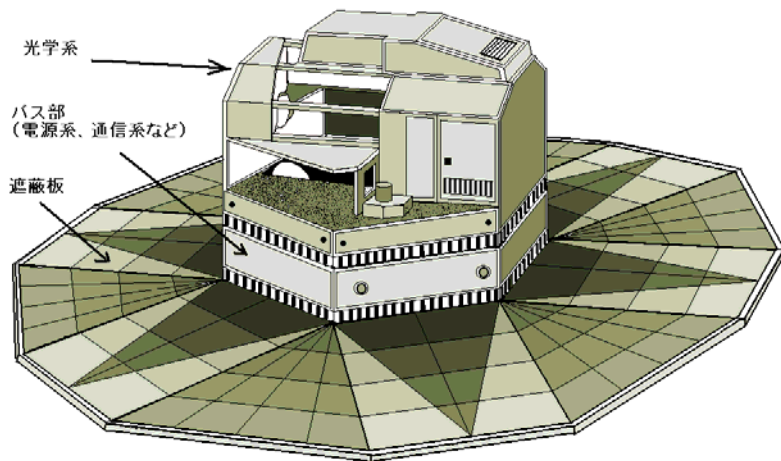
吸収効果が少ない波長へ

電波干渉計:VERA

*メーザー源を1000個程度観測

赤外線スペース望遠鏡:JASMINE

*星自体を約1億個観測



望遠鏡主鏡直径 1.5m
視野0.24平方度

その他の仕様

打ち上げ目標: 約10年後(目標)。

H-IIAロケット(dual launch)

またはGXロケットでの打ち上げを
想定

軌道: 太陽-地球のL2点周りのリサーチ軌道が
有力

しかし、高々度略円極軌道や地球ランデブー
軌道と呼ばれる地球周回軌道もトレードオフ中。

観測期間: 約5年間

JASMINEで拓けるサイエンス

天の川銀河の力学構造(本当の“姿”)

・バルジ

・ディスク: 渦巻きの正体、ディスクの湾曲の原因, ...

大規模な自己重力多体系の物理法則の解明

天の川銀河の形成・進化の“化石”を探る

・バルジ、ディスク → 銀河の形態

・星形成史

距離指標

ディスク星等によるマイクロレンズ効果

恒星物理、変光星、超新星、連星

系外惑星

基礎物理(一般相対論の検証)

月面小型(20cm級)望遠鏡計画

(ILOM:

In situ Lunar Orientation Measurements)

ILOMグループ(国立天文台:花田英夫)

ILOMの科学目標

月の回轉變動(物理ひょう動、自由ひょう動)、潮汐を1ミリ秒角以下の精度で1年以上観測し、月の内部構造、物性を通して月の起源・進化を解明する

月に金属核があるか無いか？

月は地球のマントルと成分が同じか？

月に流体核があるか無いか？

月の熱史、過去のダイナモ、
マグマオーシャンへの制約

月のマントルの物性

月面望遠鏡の第一段階(技術実証)

月の基準座標系の確立

月の核、流体核の存在を何の観測で調べるか？

現象

(観測)

計画

慣性モーメント (力学的扁平率 + 低次重力場係数)

SELENE / RISE

核マントル境界の形状 (月震観測等)

LUNAR-A

自転速度のカッシニ状態からの進み (自転速度)

LLR ILOM

自由ひょう動の消散 (自由ひょう動の振幅と減衰)

LLR ILOM

物理ひょう動の消散 (物理ひょう動の位相)

LLR ILOM

LLR:月レーザー測距

LLRのみではなぜ不十分か

長期観測(約25年)で測定精度3cm以下を達成しているが、

大きな振幅の地球回転や月の公転運動が含まれる

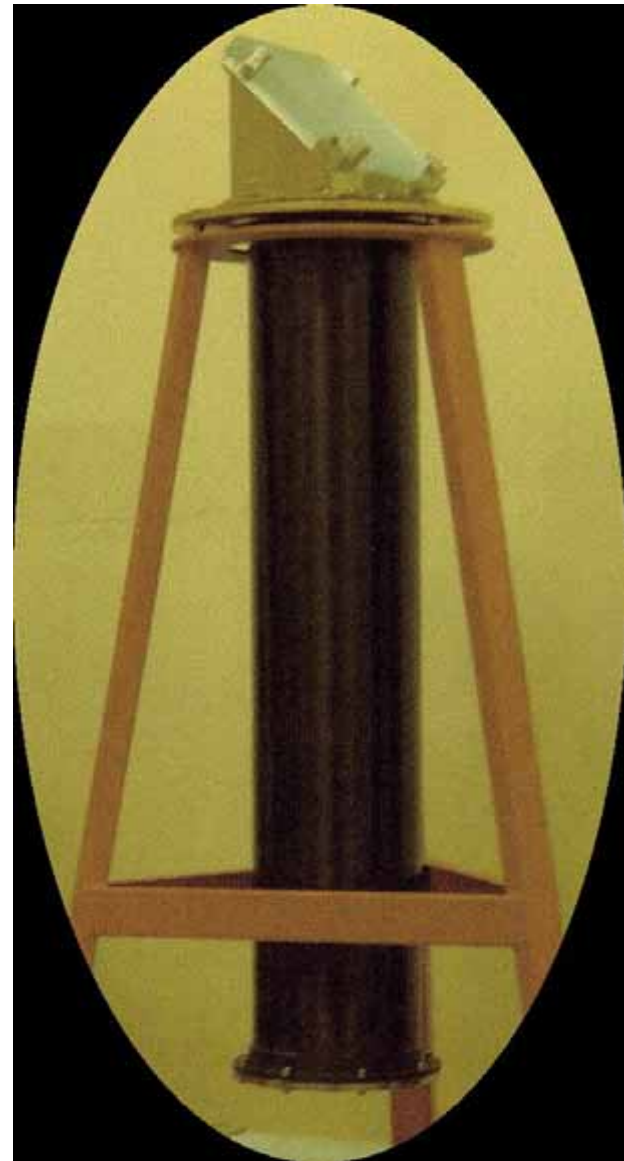
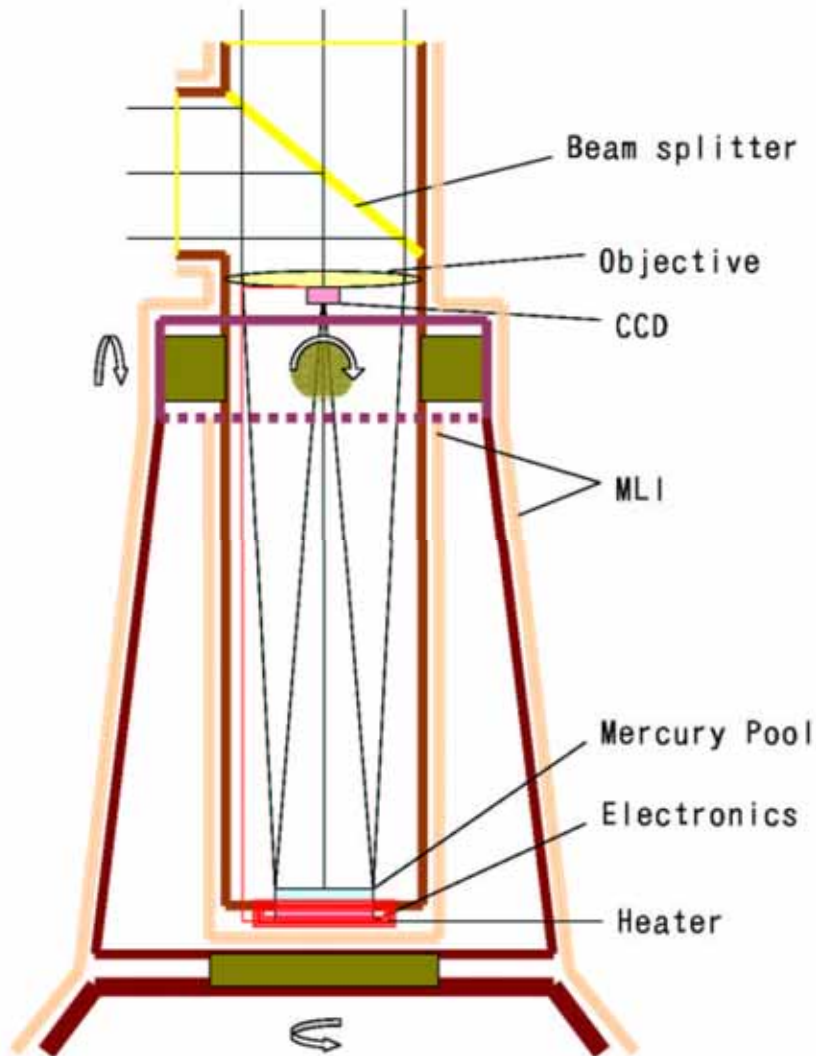
視線方向の観測のみ

満月や新月での観測が困難

逆反射器の位置の不確定

LLRと独立なもう一つの観測を組み合わせることによって月の公転運動、月回転パラメータが分離でき、精度が飛躍的に向上する。系統誤差の議論も可能になる。

月面天測望遠鏡の略図(左)と熱モデル(右)



月面天測望遠鏡の仕様

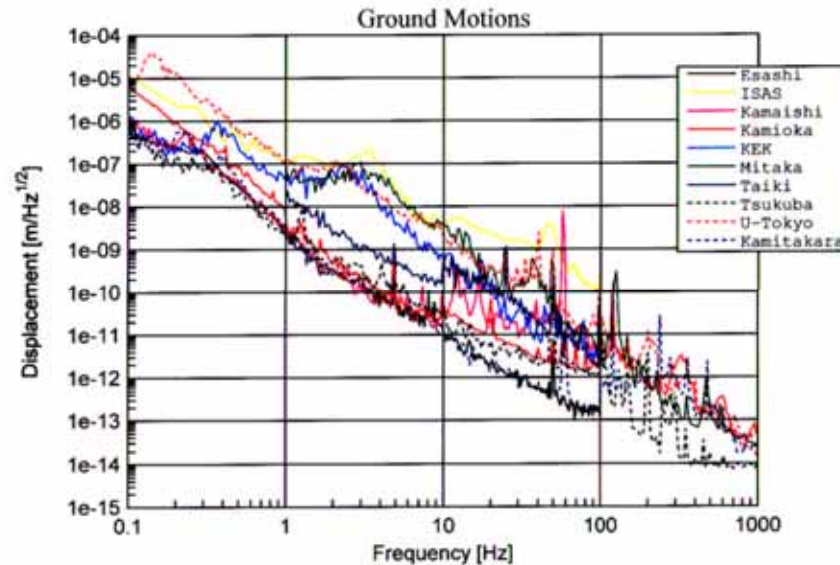
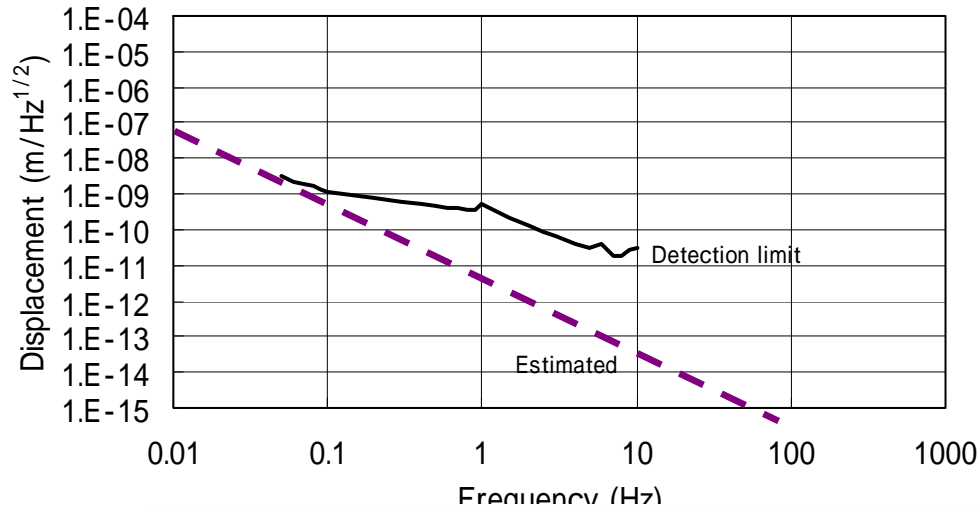
口径	0.2m	
焦点距離	2m	
形式	PZT	
検出器	CCD	
1画素の大きさ	10mm × 10mm (1" × 1")	
画素数	4,096 × 4,096	
視野	1° × 1°	
積分時間	10s	1視野約45星
観測星の等級	M < 12	
読みとり精度	1画素の1/1,000 (1mas)	

月面の評価

	月面	人工衛星	地球
空気のゆらぎ	無し	無し	不可避
振動雑音	静穏	機械振動	微動、地震
安定な基盤	可能	無し	可能
温度環境	過酷	きびしい	平穏
ダスト	多い	少ない	少ない
機械制御	困難	困難	容易
環境維持	困難	困難	容易

月面と地球の振動レベルの比較

Apollo LPZ Ground Noise (m)



資料:重力波推進室

世界的に見たILOM計画の位置づけ

月回転関連の観測計画

月レーザー測距(米国、継続中)

能動型月レーザー測距計画(日本NICT、ILOMと相補的)

月回転観測月面望遠鏡(ロシア、構想、詳細不明)

月面天文台計画

月からの天文観測(IAU、20年間の天文観測計画)

月面天文観測基地(中国の月探査プログラム、2020まで)

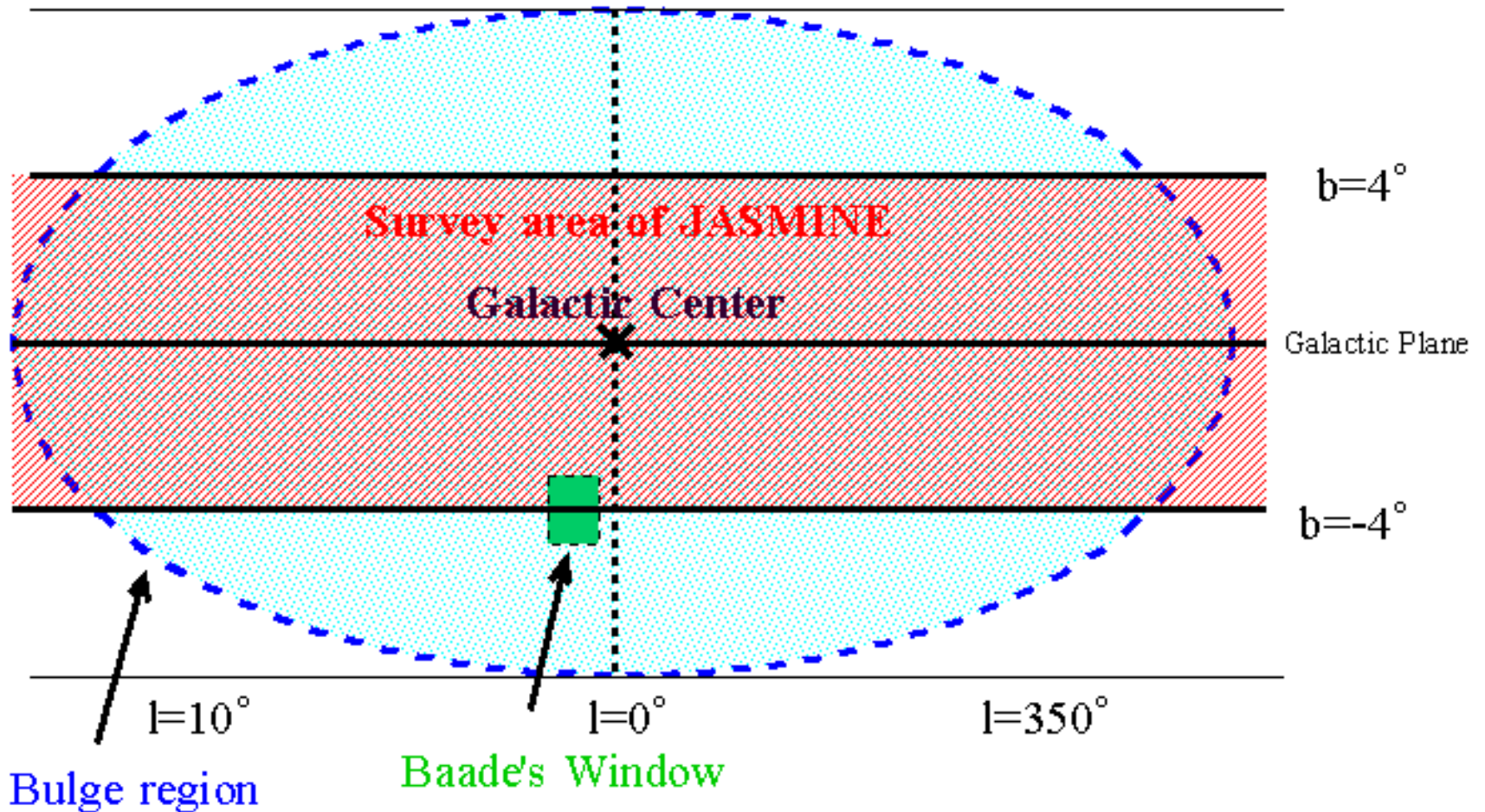
月探査長期計画検討中(日本)

その他の関連

望遠鏡による火星回転観測の提案(Hilton、1980年代)

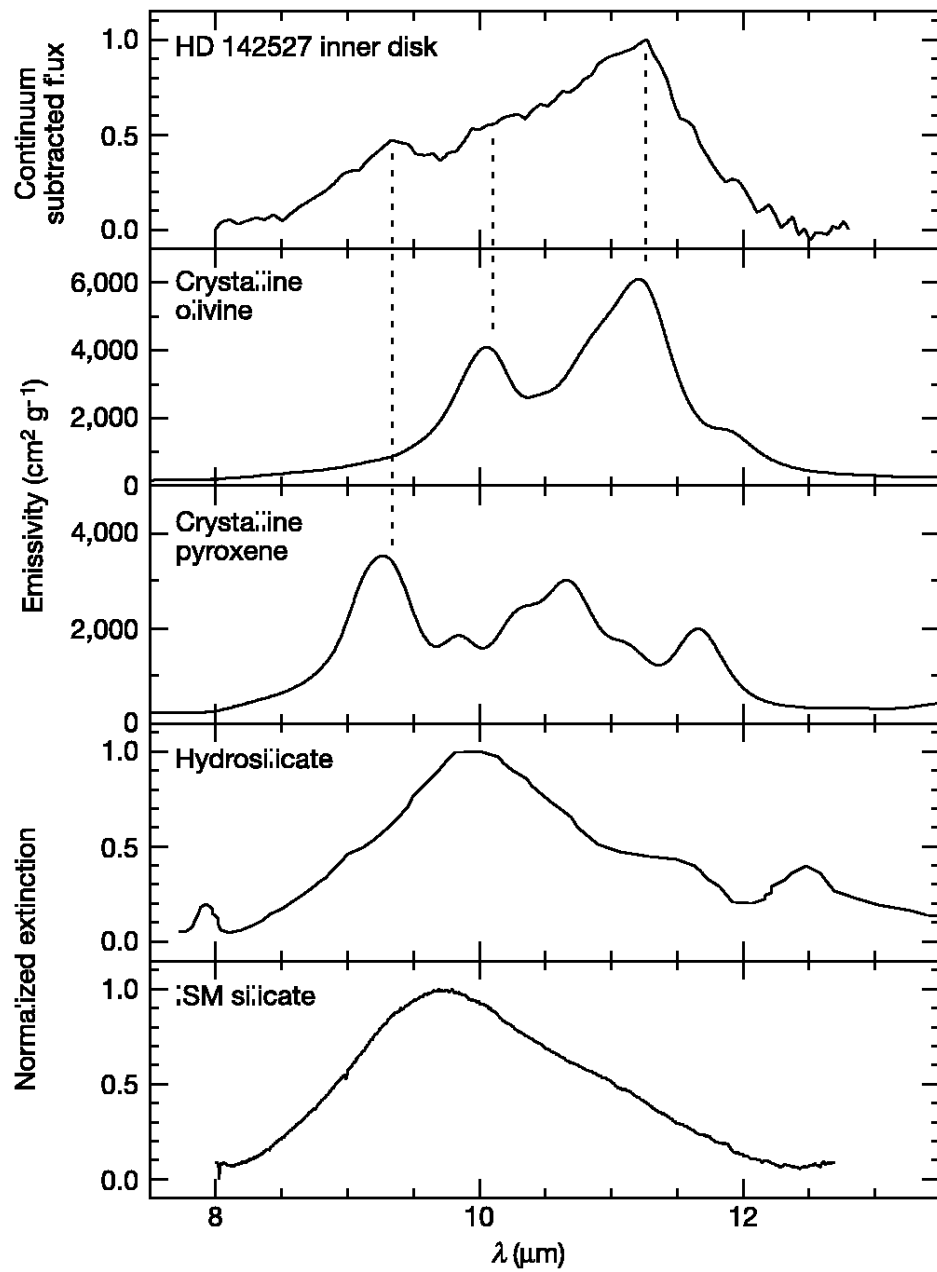
日本の光赤外将来計画

- 地上超大型望遠鏡 高空間分解能・高分散
 JELT (家氏)
- スペース大型望遠鏡 中間・遠赤外で高感度
 SPICA (中川氏)
- スペース広視野望遠鏡 広視野高空間分解
 HOP
- スペース高コントラスト望遠鏡 惑星探査
 JTPF
- スペース位置天文衛星 高精度astrometry
 JASMINE
- 月面望遠鏡 月惑星科学(with位置天文)
 ILOM

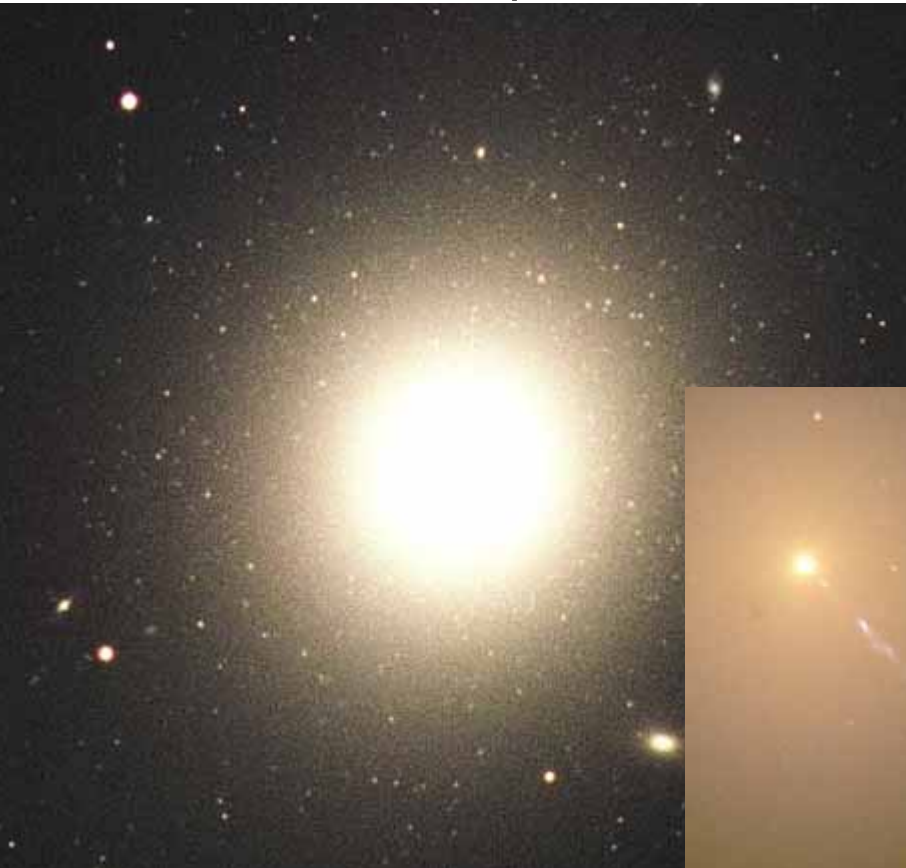


JASMINE: 7.3×10^5 stars of the bulge in the survey area
 (with $\sigma / \mu < 0.1$)

GAIA: 400 stars in the same area as that in JASMINE
 (with $\sigma / \mu < 0.1$) (excluding Baade's window)

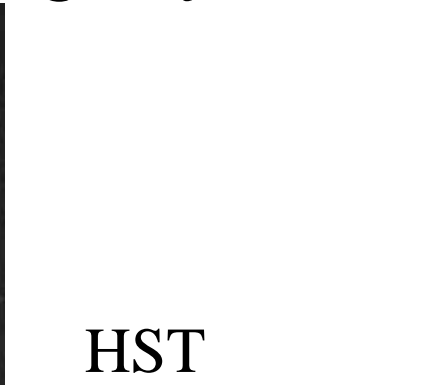


Resolving the stars in Virgo (60 million light years away)



AAT 3.9-m

Hi precision HRD
down to $1 M_{\odot}$



HST



OWL



口径、積分時間と観測限界等級、観測星の数(括弧内)

等級(星の数)		積分時間		
		1秒	10秒	100秒
口径	15cm	8.7(2.2)	11.2(26)	13.7(259)
	20cm	9.3(4.0)	11.8(45)	14.3(442)
	30cm	10.2(9.8)	12.7(104)	15.2(972)