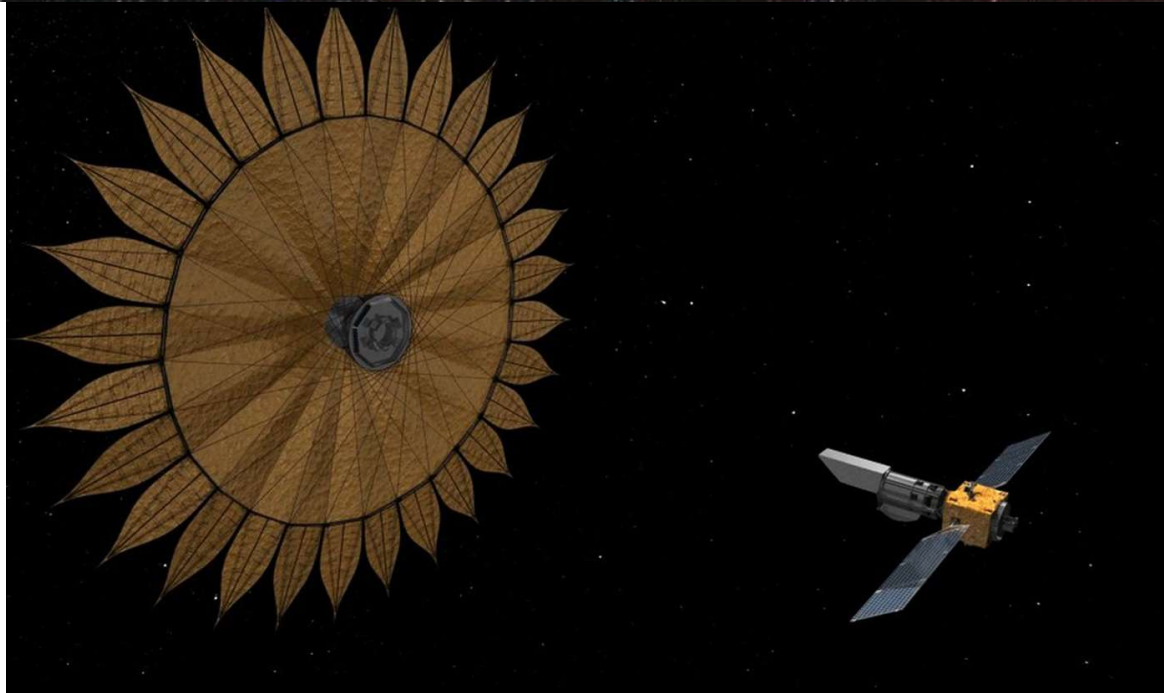
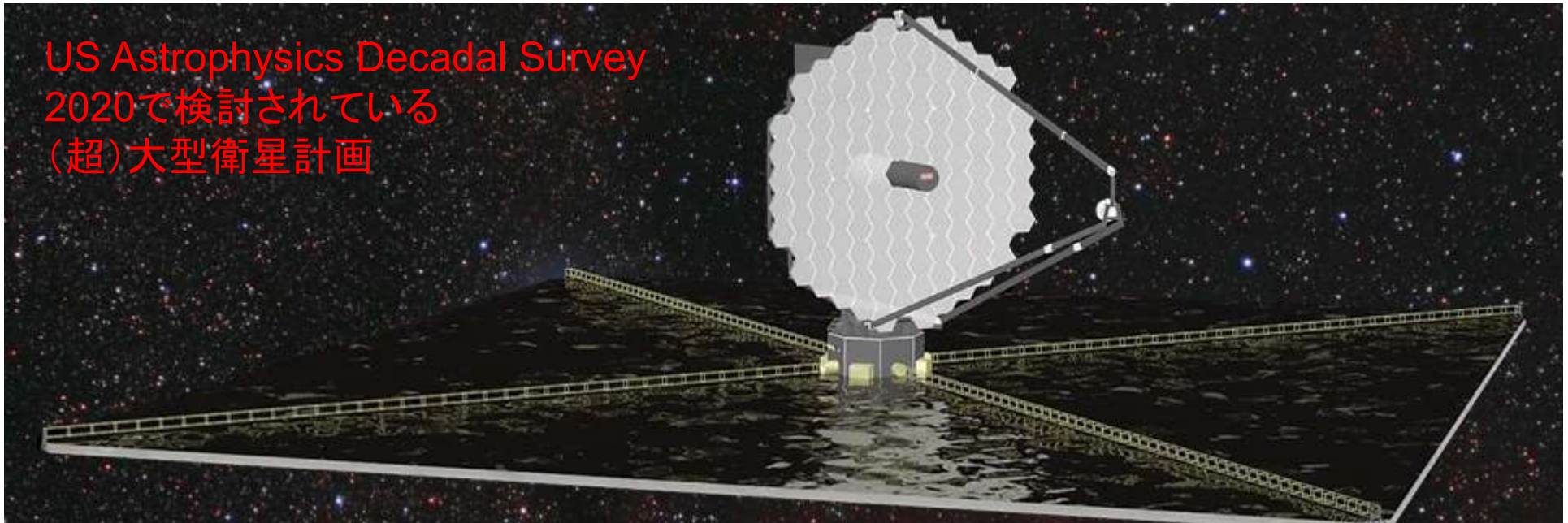


LUVOIR/HabExへの参加

US Astrophysics Decadal Survey
2020で検討されている
(超)大型衛星計画



- Habitable exoplanets & biosignatures
- Broad range of general astrophysics

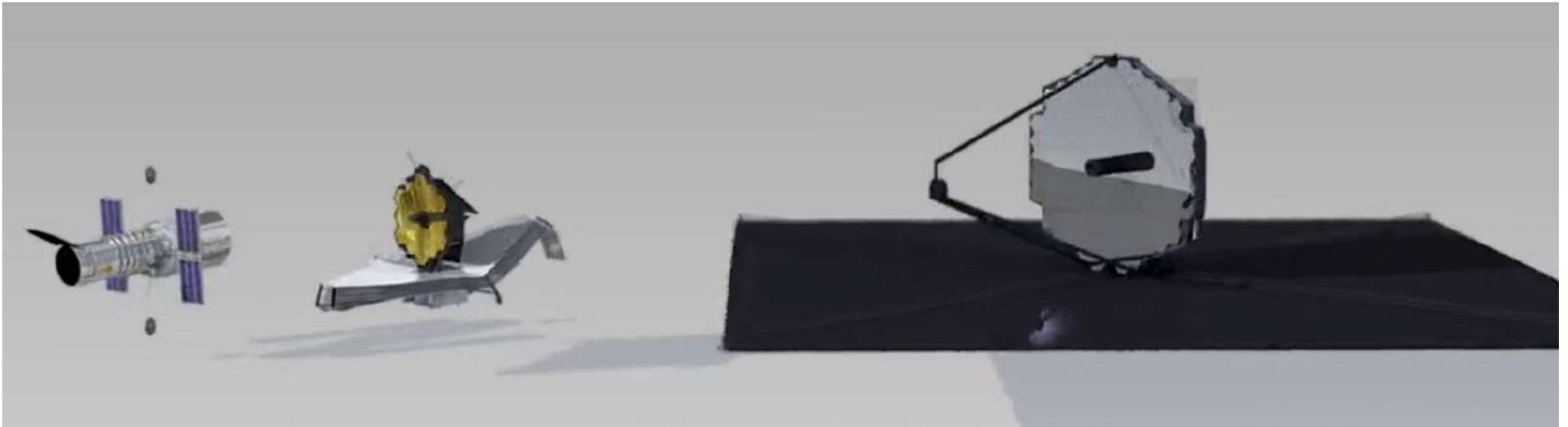
Takahiro Sumi (Osaka)
Motohide Tamura (U.Tokyo/ABC)
LUVOIR/HabEx teams



L U V O I R

LUVVOIR計画への参加

(Large UV/Optical/Infrared Surveyor)



T. Sumi(Osaka), Akio Inoue (Waseda University), Ikuru Iwata (NAOJ), Shingo Kameda (Rikkyo University), Tadayuki Kodama (Tohoku University), Yuichi Matsuda (NAOJ), Taro Matsuo (Osaka University), Kentaro Motohara (Tokyo University), Naoshi Murakami (Hokkaido University), Go Murakami (JAXA/ISAS), Norio Narita (NAOJ), Jun Nishikawa (NAOJ), Masami Ouchi (Tokyo University/ICRR), Nao Suzuki (Tokyo University/IPMU), Motohide Tamura (Tokyo University/ABC), Masaomi Tanaka (Tohoku University), Kohji Tsumura (Tokyo City University), Toru Yamada (JAXA/ISAS):

Main objectives

● Habitable exoplanets & biosignatures

- 反射光の直接分光で惑星表層大気の成分を求め、**生命痕跡探査**(太陽型星回りの地球型星)

- 地球の様な環境の惑星の頻度 → **大口径が必要**

(自然科学における人類最大のテーマの一つ)

● Broad range of general astrophysics

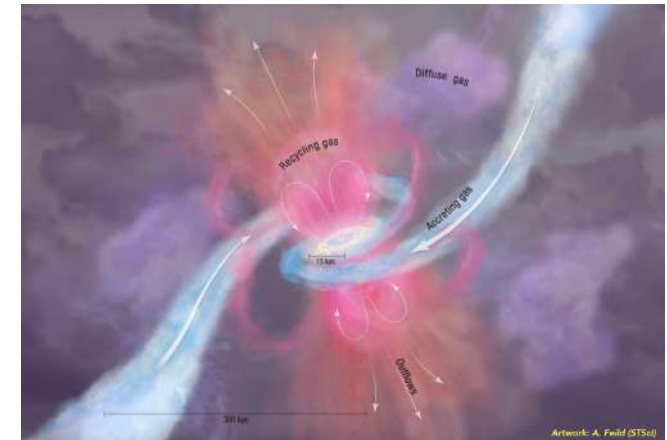
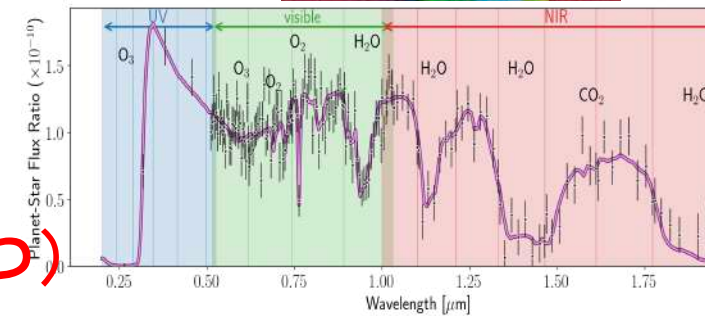
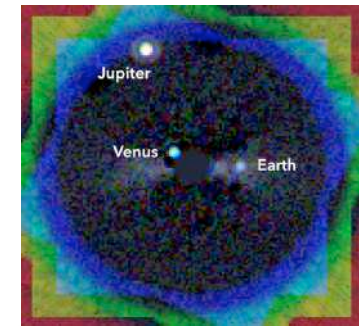
- 銀河形成と死

- UV分光で、銀河内の熱い**ガスの膠着、噴出**を調べ、そのサイクルと形成過程を解明する。

- 過去に遡って、最小の構造体(sub-structure)を分解し、**銀河のマージャー史**、生成過程を解明する

- 太陽系天体のモニター

氷衛星での生命探査。高空間分解能UV分光撮像により、探査衛星なみの観測ができ、**ガイザーの活動強度や頻度**を解明する。



Europa jets observed
with 15-m LUVVOIR



Credit: G. Ballester
(LPL)

Telescope

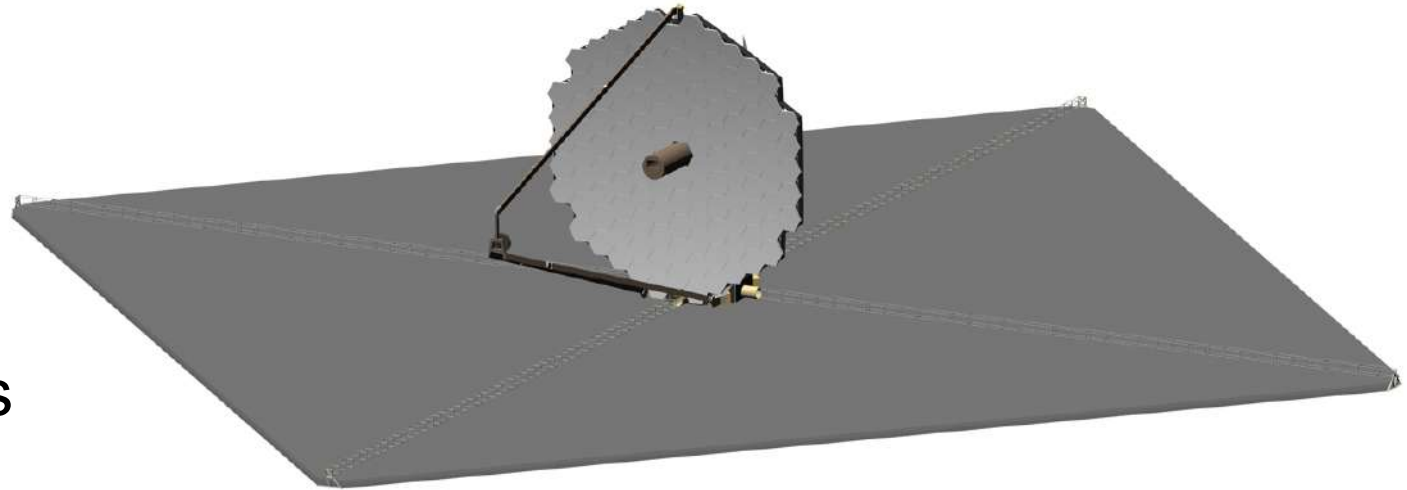
- **Segmented, deployable** far UV/optical/NIR telescope (**100 nm to 2500 nm**)
- **Ultra-stable** to enable high performance coronagraphy
- Serviceable & upgradable (25 year lifetime goal for non-serviceable comp.)

LUVOIR A

15m

On-axis

4 instruments

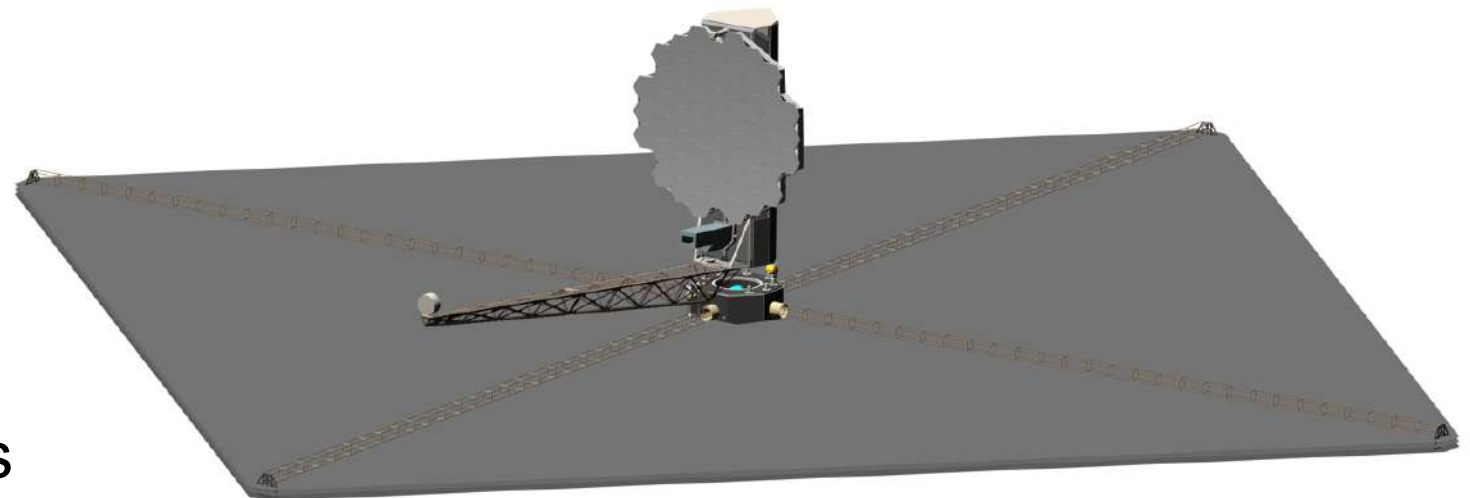


LUVOIR B

8m

Off-axis

3 instruments



LUVOIR Instruments

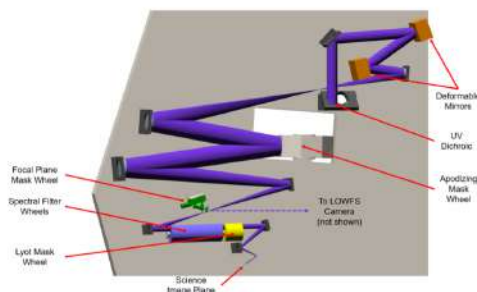
CANDIDATE INSTRUMENTS STUDIED

ECLIPS	
Coronagraph with imaging and imaging spectroscopy	
Bandpass	200–2000 nm
Contrast	1×10^{-10}
IWA	$3.5 \lambda/D$
OWA	$64 \lambda/D$
$R (\lambda/\Delta\lambda)$	Vis: 140 NIR: 70, 200

HDI	
Wide field imager with simultaneous UV/Vis and NIR coverage	
Bandpass	200–2500 nm
FoV	$3' \times 2'$
67 science filters + grism	
Nyquist sampled	
High-precision astrometry	

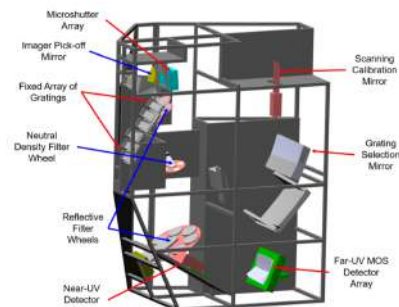
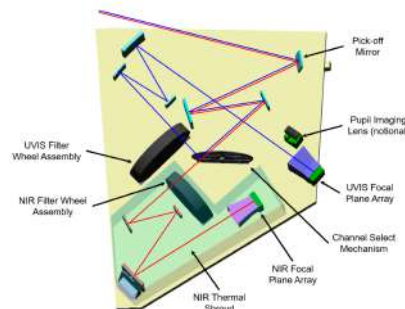
LUMOS	
UV/Vis multi-object spectrograph and FUV imager	
Bandpass	100–1000 nm
MOS FoV	$2' \times 2'$
Apertures	840×420
$R (\lambda/\Delta\lambda)$	500–50,000

POLLUX	
Point-source UV spectropolarimeter (European study for LUVOIR-A only)	
Bandpass	100–400 nm
$R (\lambda/\Delta\lambda)$	120,000
Circular + linear polarization	

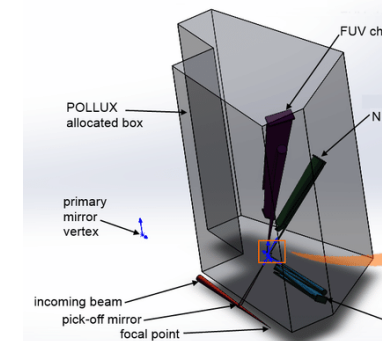


Imaging IFS

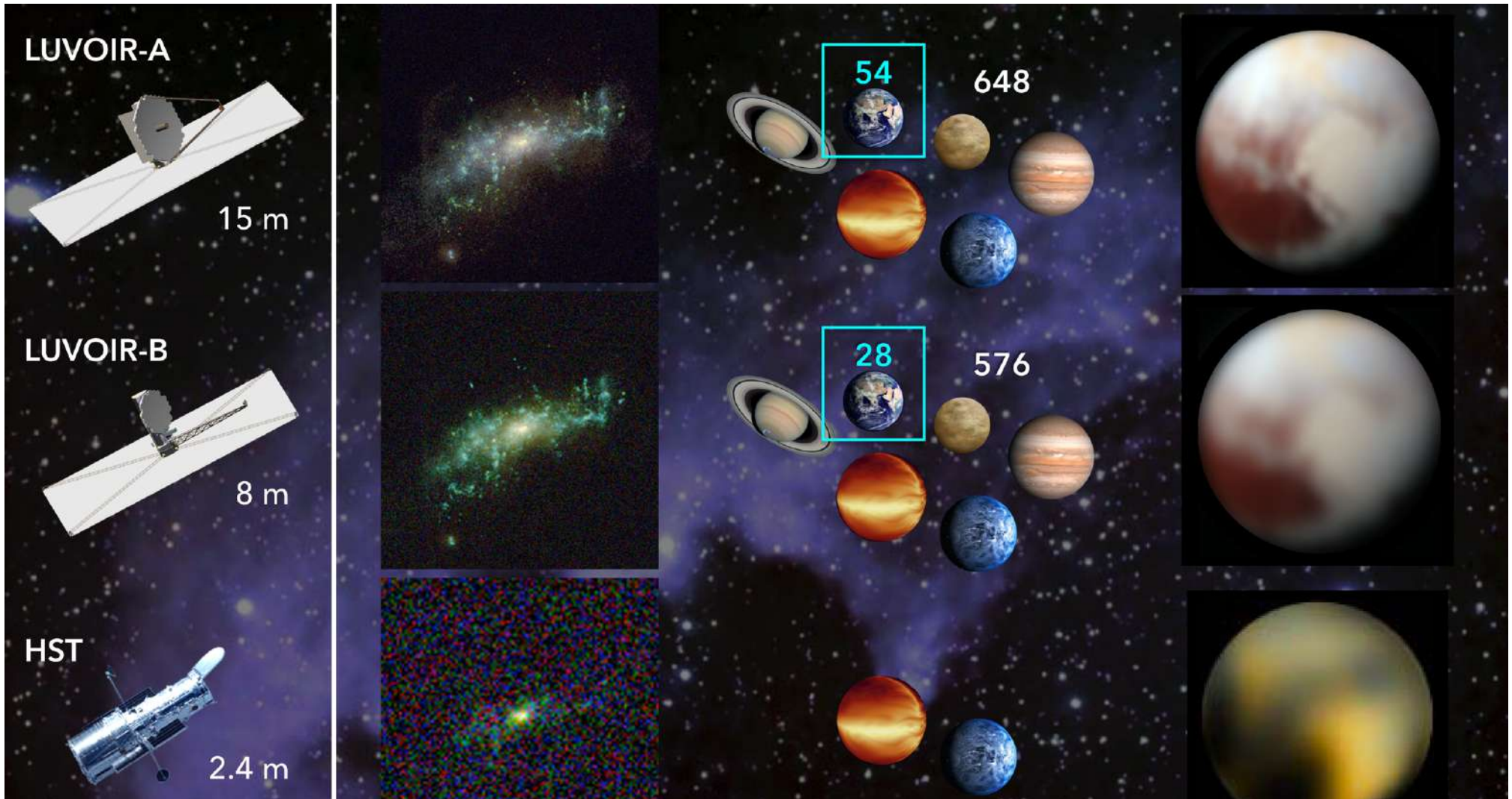
UVIS:3Gpix
NIR:320Mpix



ESA contribution
Only for LUVOIR-A

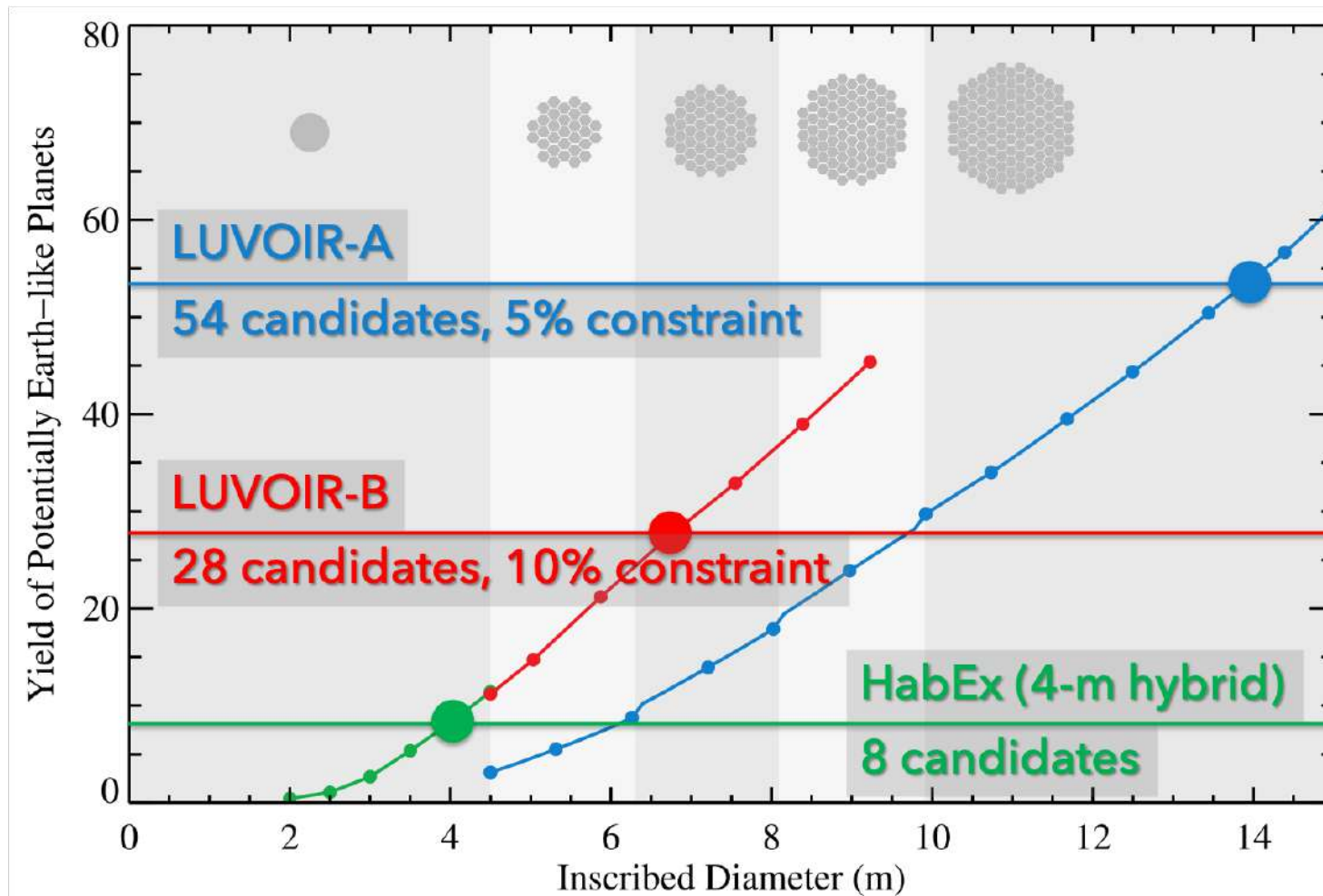


LUVOIR Sciences



- Resolve faint stars and galaxies for galaxy formation.
- Detect 54 (15m) & 28 (8m) Earth-like planets that can be probed for signs of life.
- Near-flyby quality observation of Solar system bodies.

Exo-Earth Yield vs telescope diameter



assuming ExoPAG SAG13 value ($0.24^{+0.46}_{-0.16}$)

A 5% and 10% constraint on the frequency of Earth-like planets by LUVUOIR-A and -B, respectively. (8 planets by HabEx gives 30% constraint on frequency of Earth-like planets.)

Direct spectra of exoEarth around Solar type star

反射光の直接分光で惑星表層大気の成分を求め、生命痕跡探査

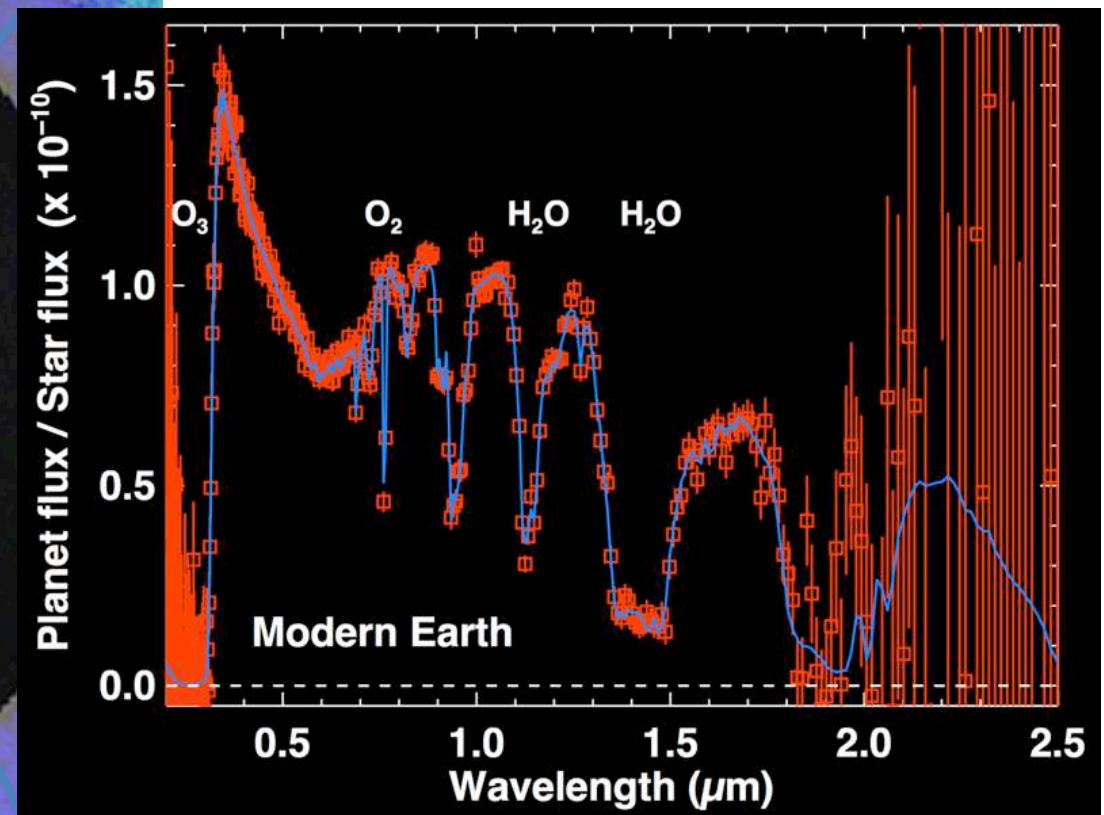
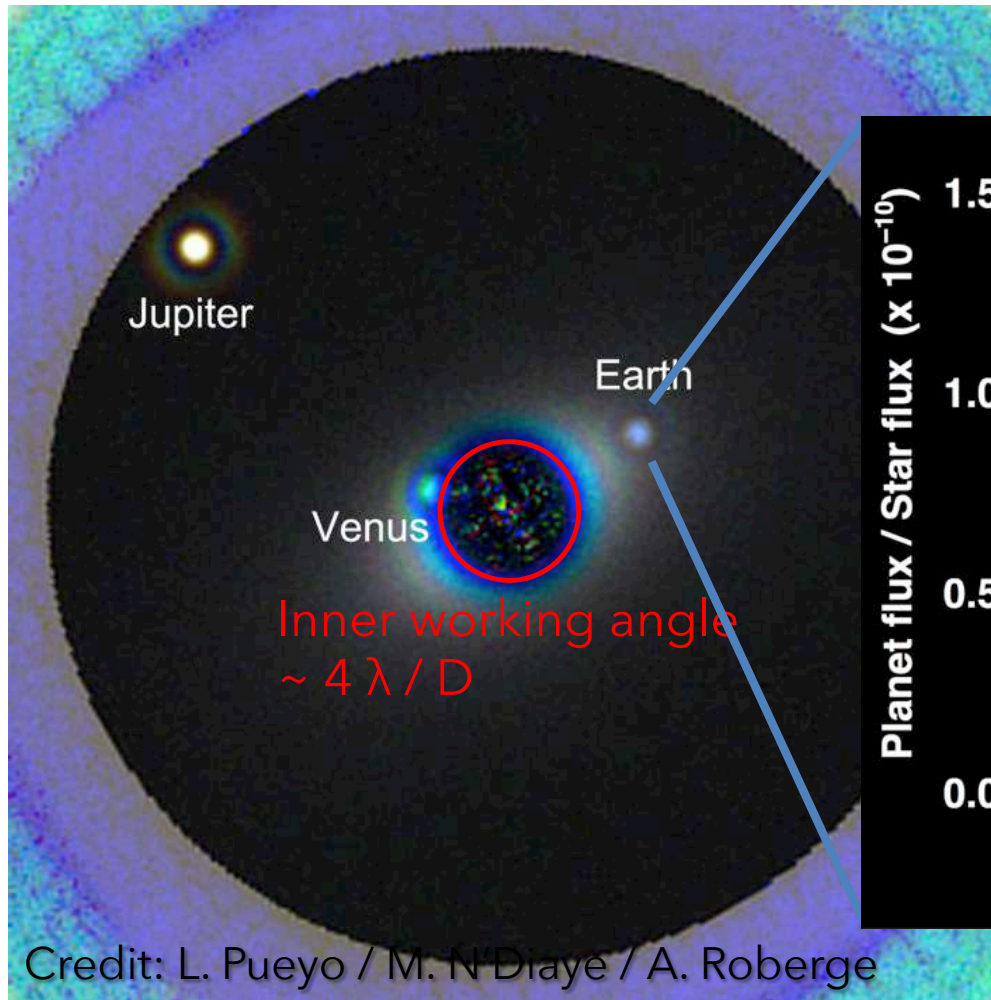
Solar System from 13 parsec
with coronagraph and 12-m telescope

Distance = 10 pc

$D_{\text{telescope}} = 12\text{-m}$

$R = 150$

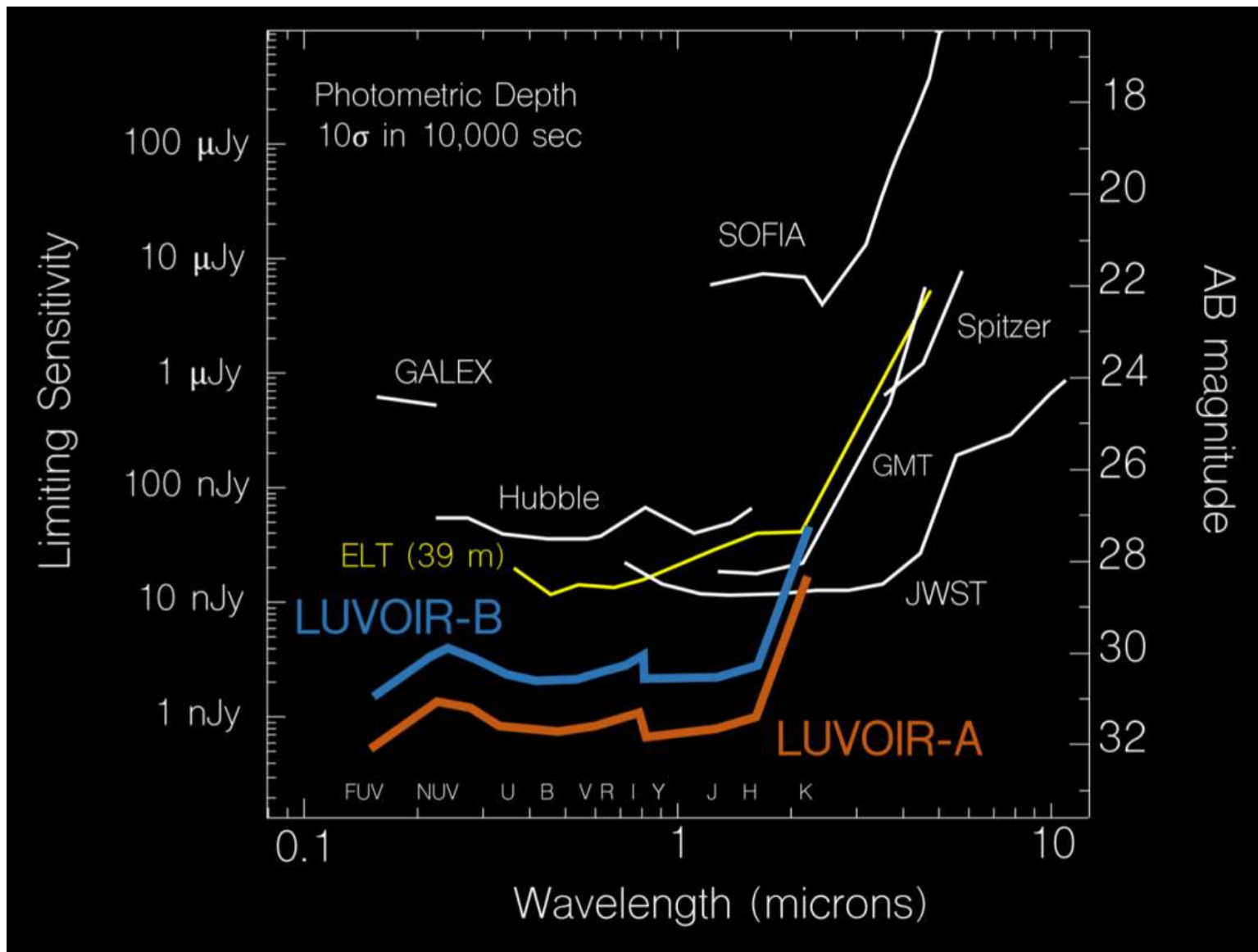
Time = 96 hrs per band



Credit: T. Robinson / G. Arney

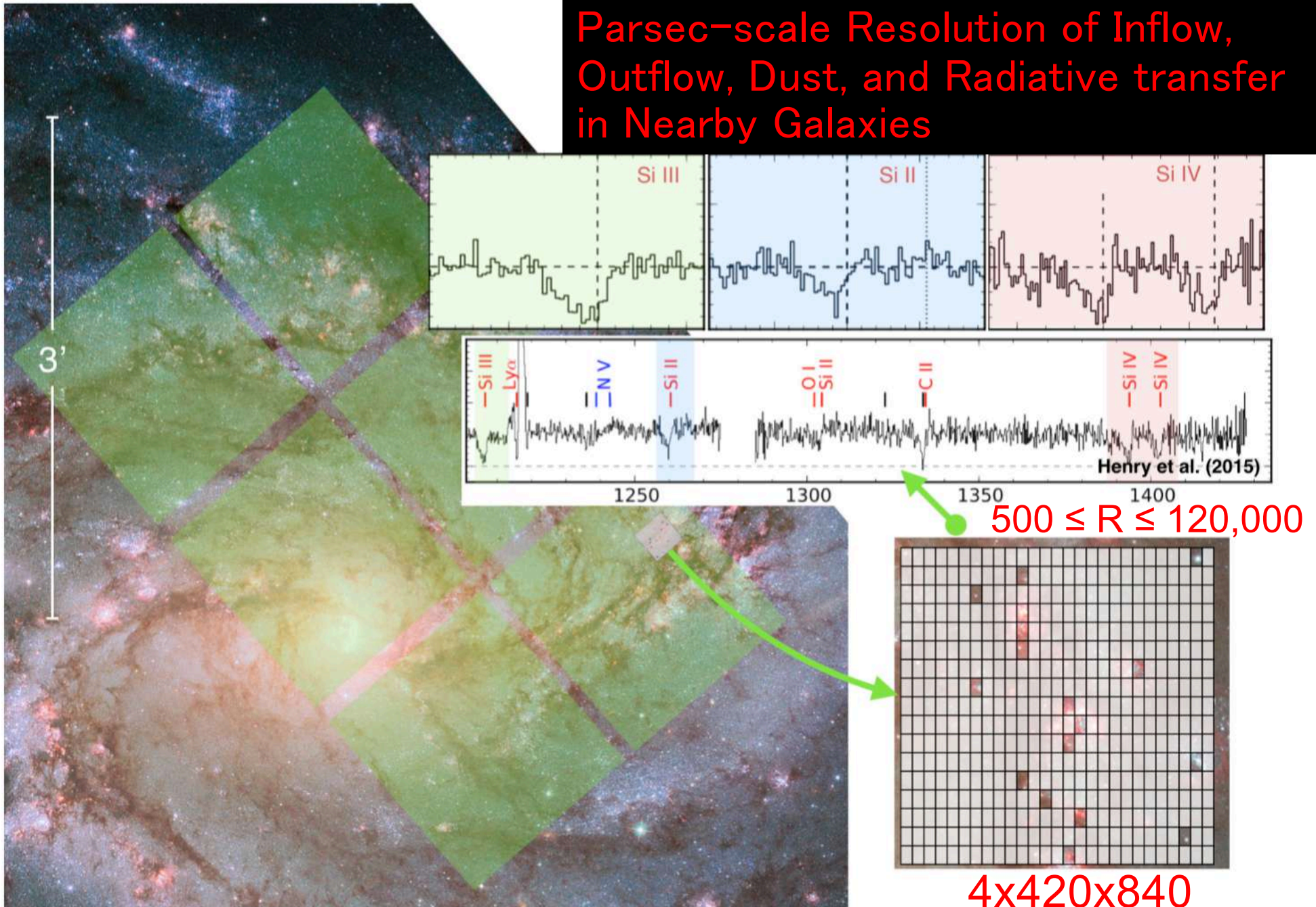
Sensitivity curves for LUVOIR and other telescopes

- 強力な紫外線、可視光望遠鏡として全分野で期待 (HSTの後継)
- 大口径、超高解像度でHST, Ultra-deep fieldを塗り替える。



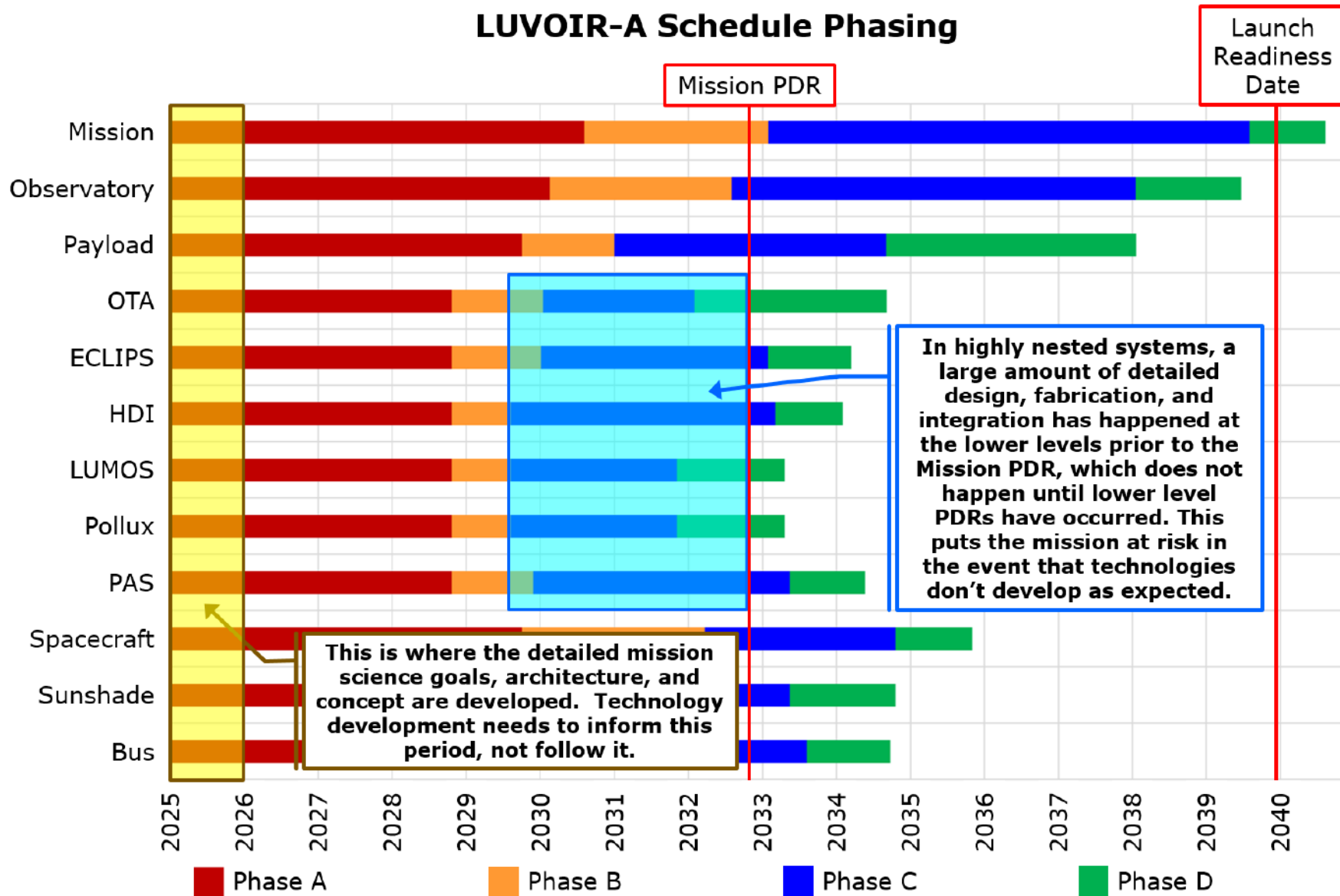
Micro shutter in LUMOS

Parsec-scale Resolution of Inflow, Outflow, Dust, and Radiative transfer in Nearby Galaxies



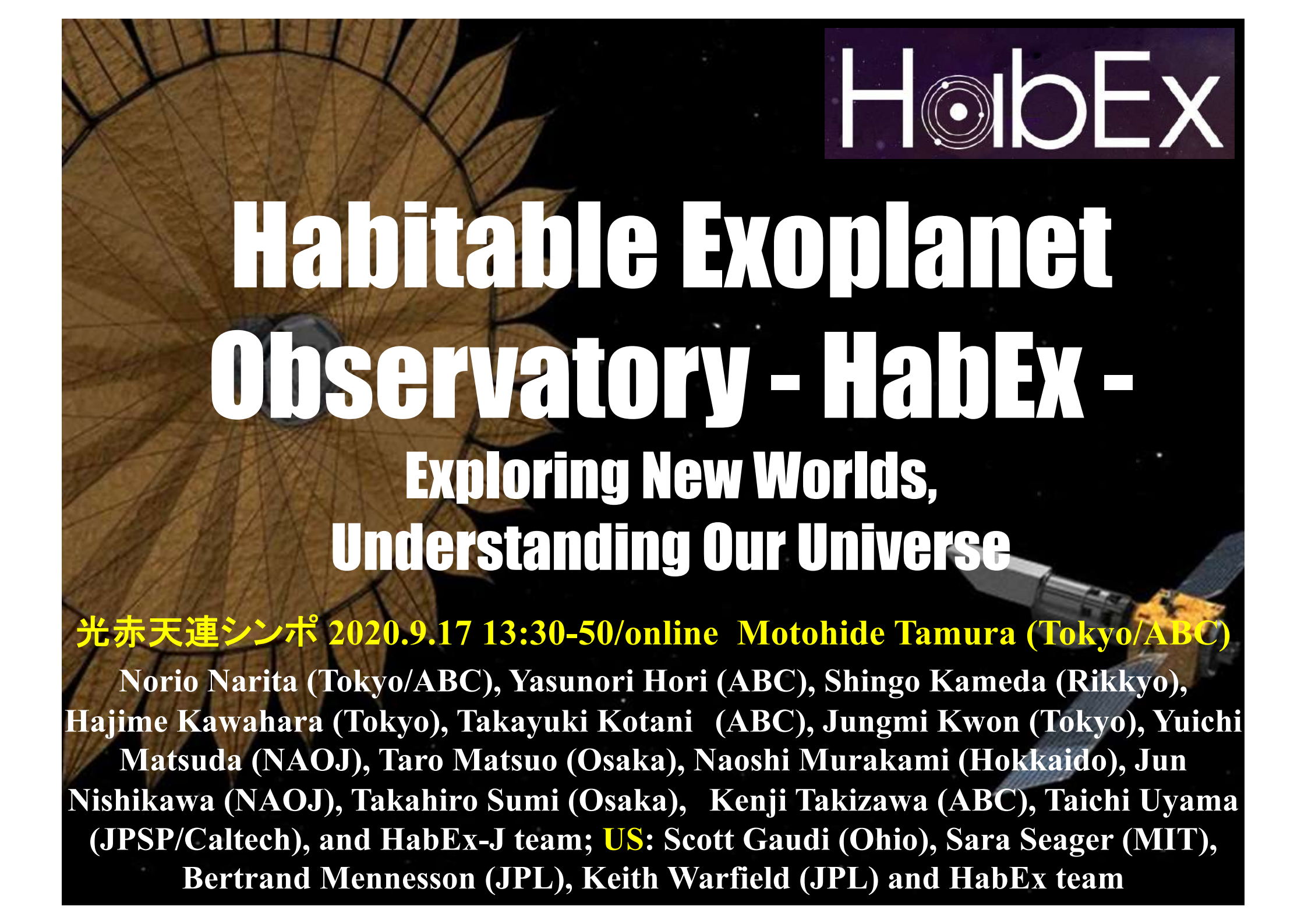
Schedule

LUVOIR-A Schedule Phasing





HabEx



Habitable Exoplanet Observatory - HabEx - Exploring New Worlds, Understanding Our Universe

光赤天連シンポ 2020.9.17 13:30-50/online Motohide Tamura (Tokyo/ABC)

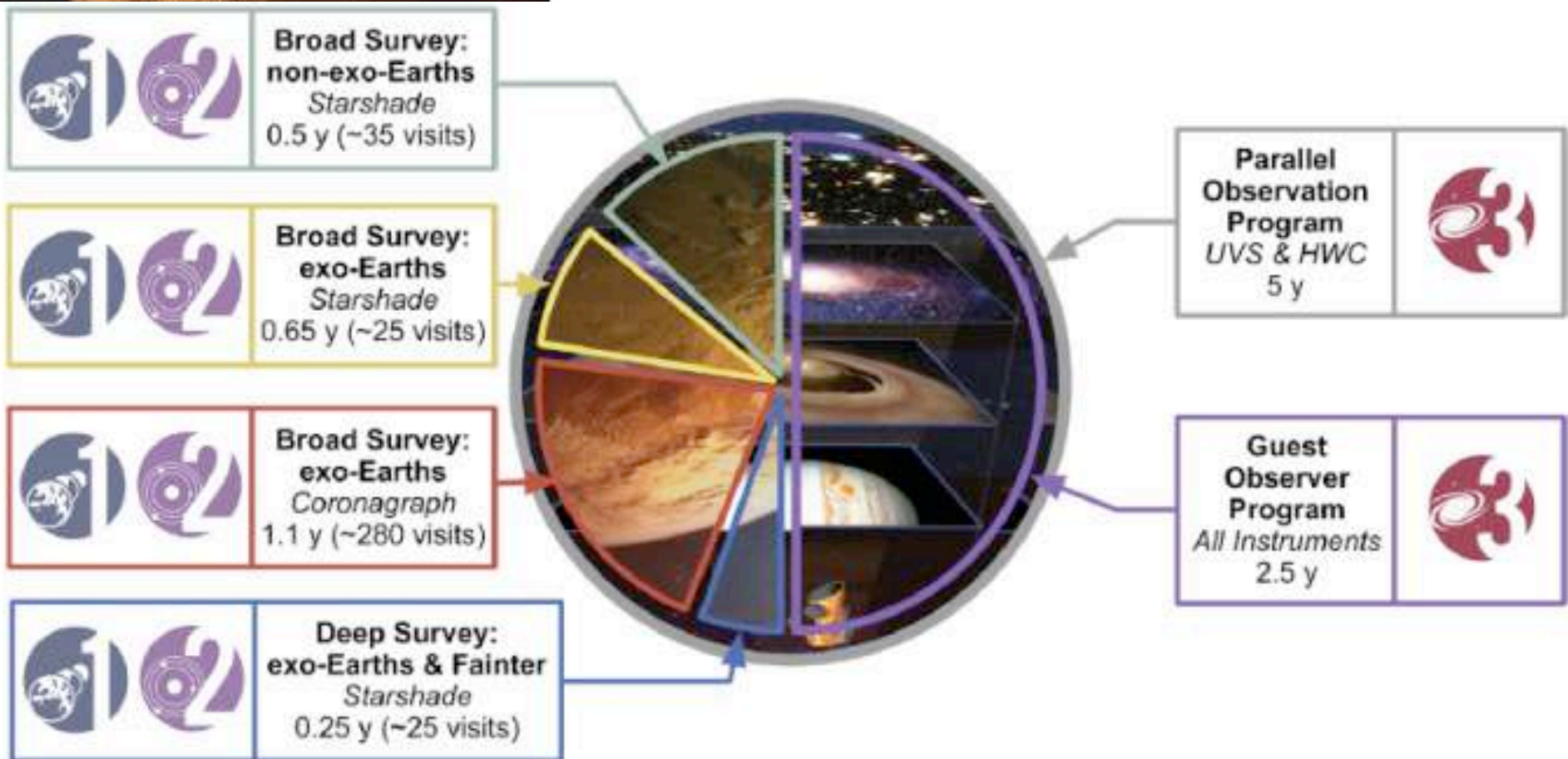
Norio Narita (Tokyo/ABC), Yasunori Hori (ABC), Shingo Kameda (Rikkyo),
Hajime Kawahara (Tokyo), Takayuki Kotani (ABC), Jungmi Kwon (Tokyo), Yuichi
Matsuda (NAOJ), Taro Matsuo (Osaka), Naoshi Murakami (Hokkaido), Jun
Nishikawa (NAOJ), Takahiro Sumi (Osaka), Kenji Takizawa (ABC), Taichi Uyama
(JPSP/Caltech), and HabEx-J team; **US:** Scott Gaudi (Ohio), Sara Seager (MIT),
Bertrand Mennesson (JPL), Keith Warfield (JPL) and HabEx team

HabEx Science Goal



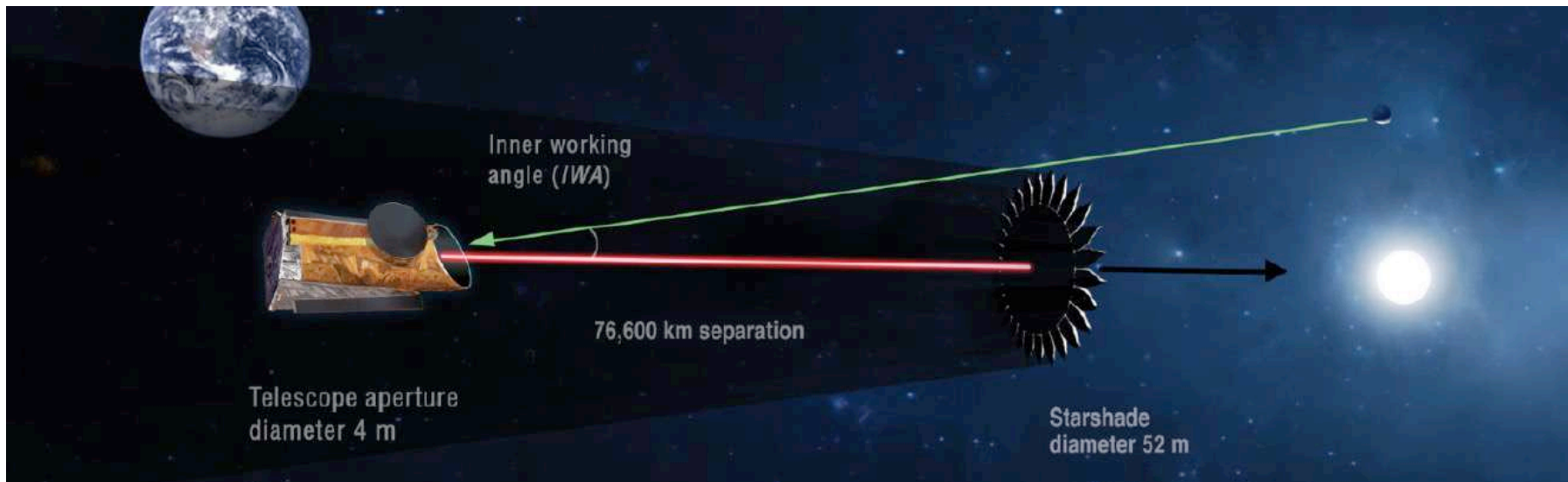
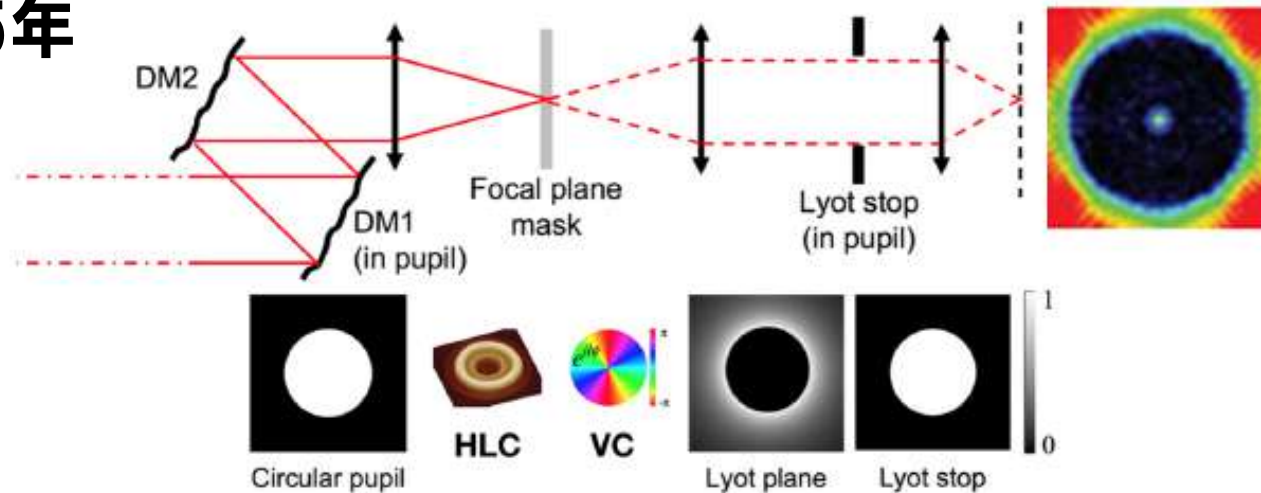
● 近傍の地球型惑星およびそのハビタビリティの探査

- 直接撮像分光観測
- 太陽型星



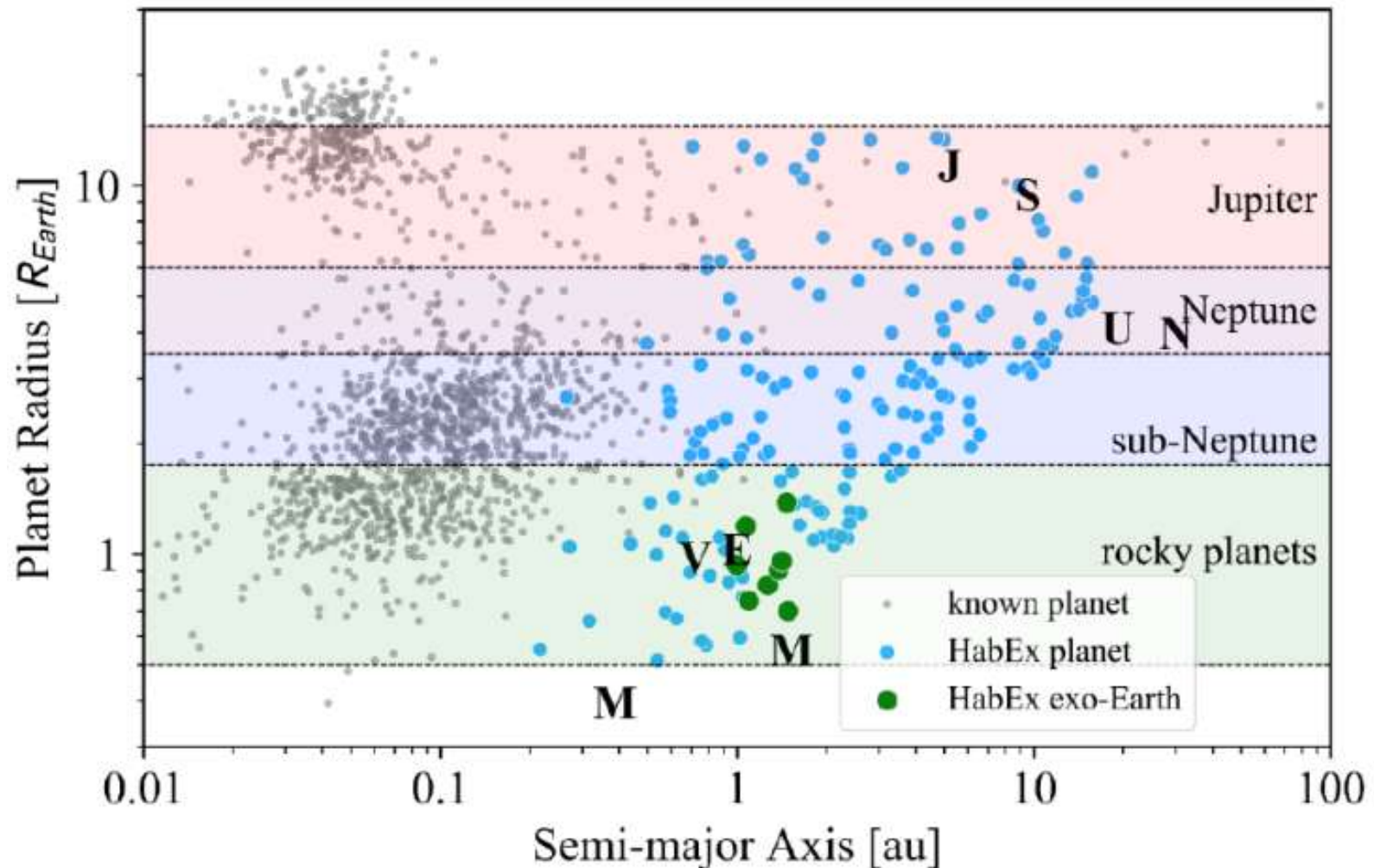
HabEx Architecture: telescope

- 口径 4m (1枚鏡), 軸はずし、 $0.4\mu\text{m}$ 回折限界スペース望遠鏡
- 内部コロナグラフとスターシェード (SS $\phi 52\text{m}$, 76600km)
- 5年+5年



HabEx Observations: detection

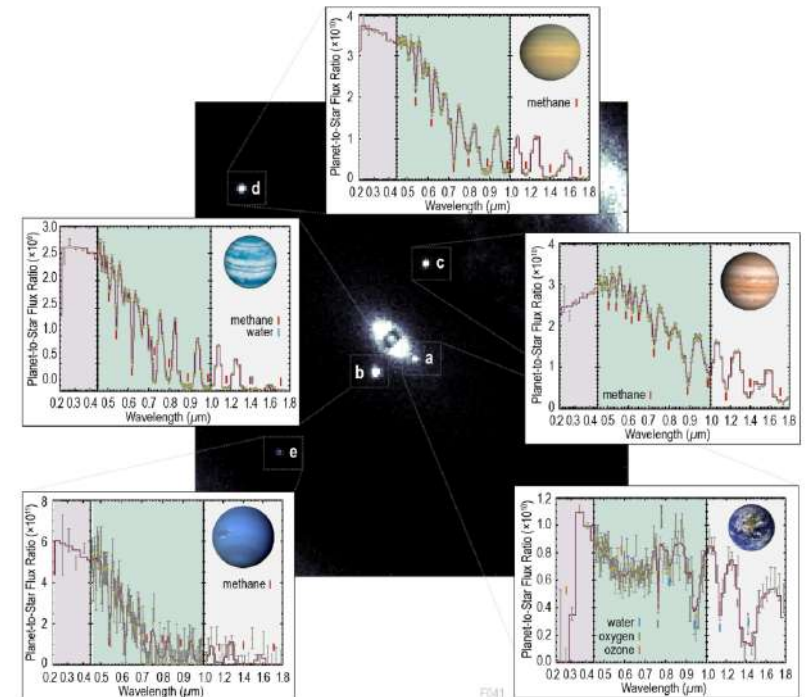
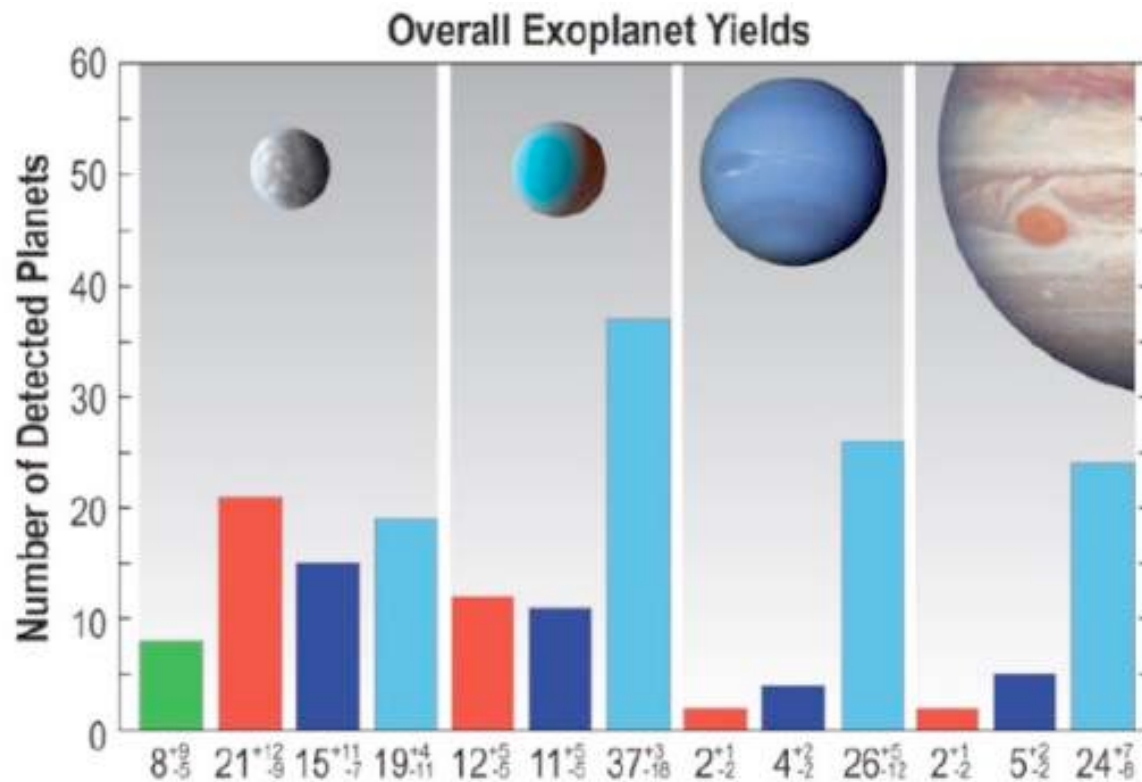
- 5年間：50%はサーベイ、50%はGO；新しいパラメータ空間（下図）
- Broad survey w/SS, CG（太陽型星42個、 10^{-10} ）
- Deep survey w/SS（最近傍太陽型星8個、 4×10^{-11} ）



HabEx Observations: planet yields

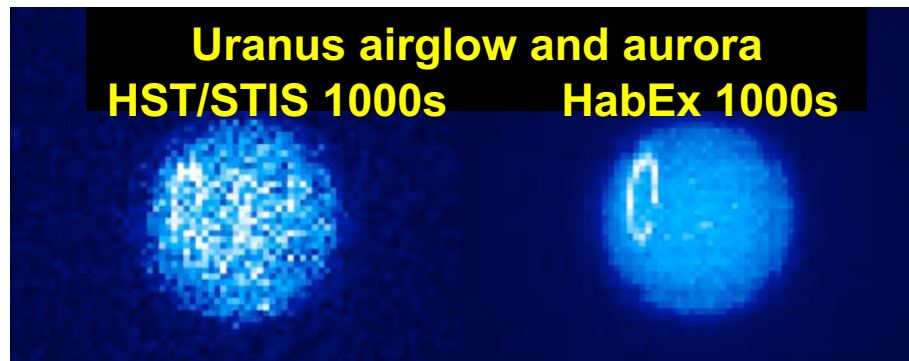
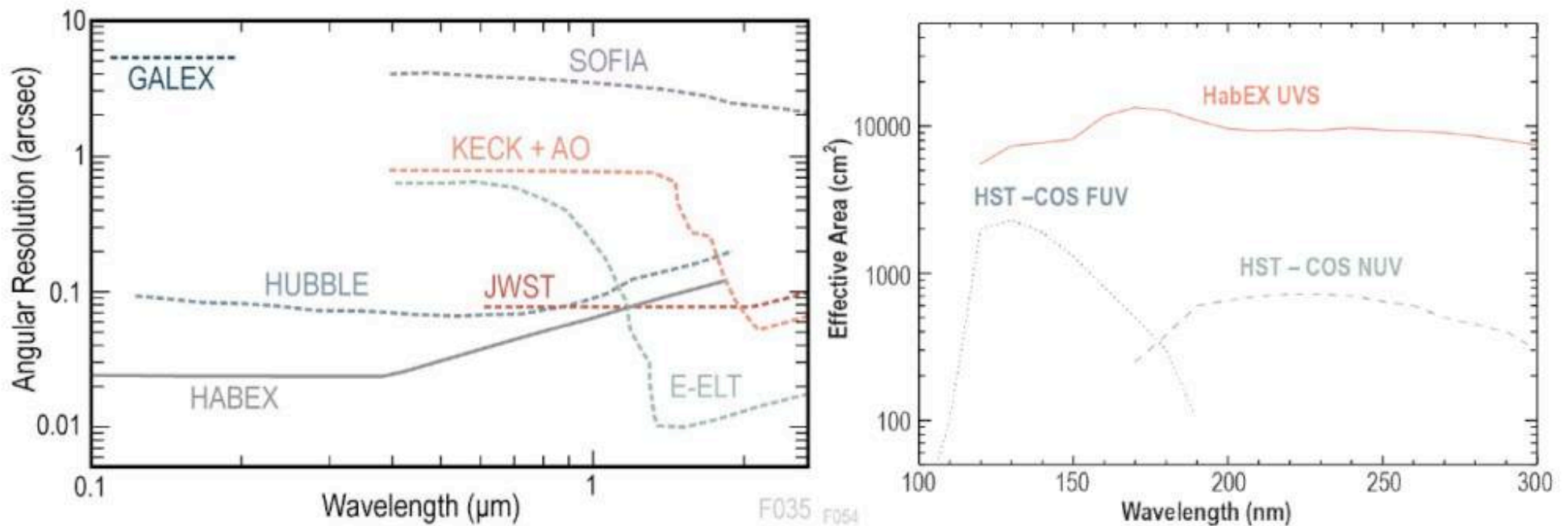
- 200個以上の系外惑星を直接撮像で発見
- 63個:岩石惑星 (含む 8 Earth analogs), 60個:ミニ海王星, 63個:巨大ガス惑星
- (赤) “hot” planets
- (藍) “warm” planets
- (薄青) “cold” planets (大気中で水が凝縮可能)

- 右図:分光スペクトルによる惑星の分類も可能



HabEx Observations: UV power

- 紫外線望遠鏡としての期待も大きい。
- Hubble 2.4mの後、ロシアWSO 1.7mのみ。
- 日本がFunnel-MCP紫外線検出器等で寄与できる可能性。



White Paper (WP) 評価結果：総評

LUVOIR 及び HabEx は、Origins、Lynx とともに米国の 2020 Astrophysics Decadal Survey に提案されている大型ミッションで、各プロジェクトは数年間に及ぶ科学及び技術の両側面からの検討に基づいてまとめ上げられている。ハビタブル領域の地球型惑星を含む系外惑星のキャラクタリゼーションは学術的価値が非常に高く、かつその成果は天文学にとどまらない波及効果や学問分野の融合といった効果を生み出すと期待される。各プロジェクトの進行は、2021 年度中に公開される予定の 2020 Decadal Survey の結果に強く依存することに注意が必要ではあるが、日本からの貢献について周到に準備しておくことが重要である。

本 white paper は、冒頭に「日本の参加によって LUVOIR または HabEx を実現する」と記述があるものの、複数の評価者によって指摘されている通り、大部分が LUVOIR または HabEx の全体計画の紹介にあてられており、日本がどの程度の規模(予算、体制)で、全体計画の中でどの程度重要な役割を果たし、そして日本が貢献することで、日本の科学の発展にどのように寄与できるのかについての説明が不足している。STDT 活動に基づいてどのように日本の参加への道筋が検討され準備されてきたか、また、Decadal Survey の結果を受けて実際に Pre-Phase A が開始する時点でどのように現実的に日本の貢献を実現するのかといった戦略を明確にしながら、日本の参加という観点から提案書を書き直していただくことが必要である。

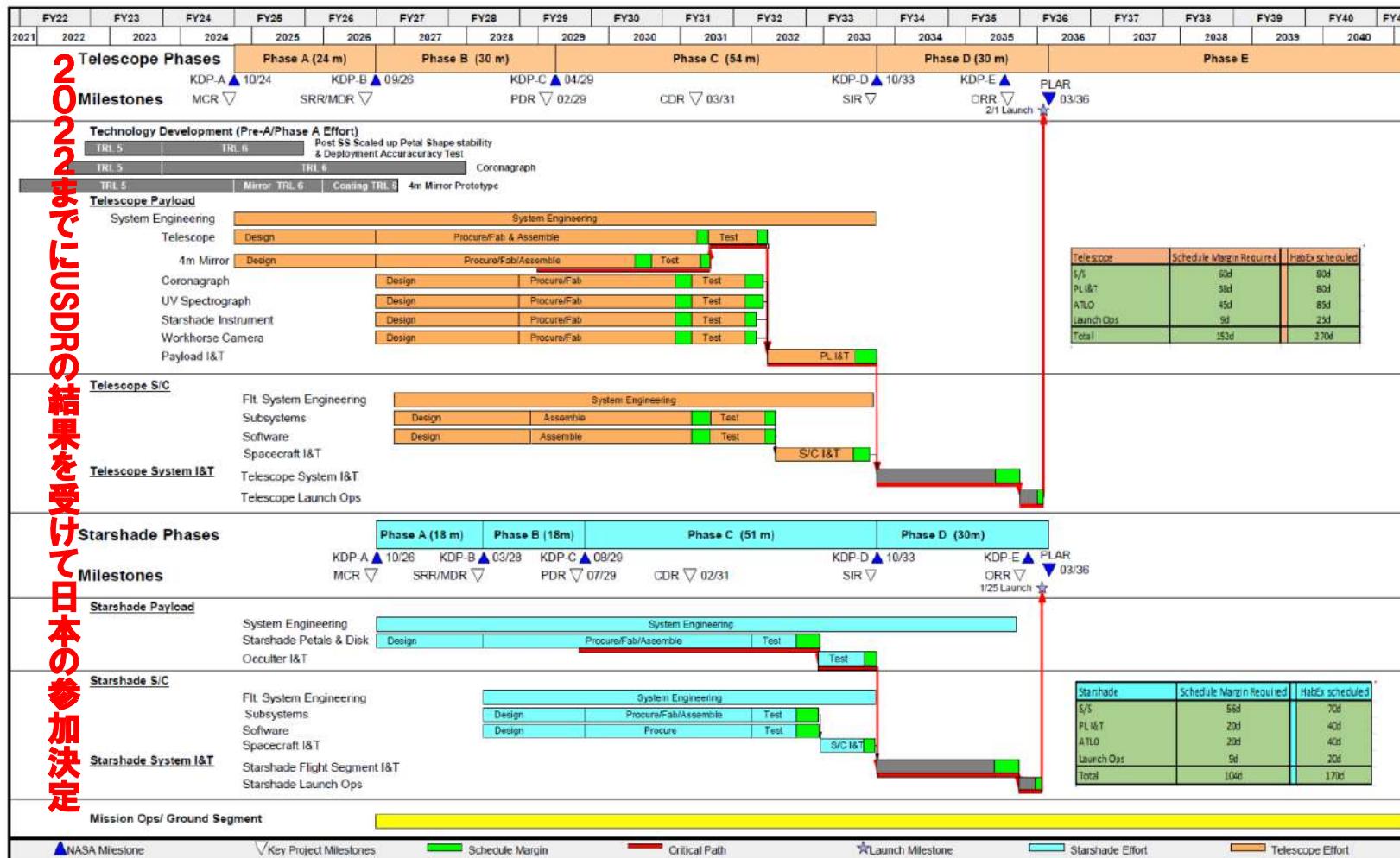
Japanese Contribution to LUVOIR/HabEx

- Roman宇宙望遠鏡(2025年頃打上)参加の実経験を活かす。
- ハードウェアコンポーネントの寄与
 - **偏光器**: 日本は40年間以上継続的に光赤外偏光器を製作してきた。現在はRomanの偏光素子を製作中。
 - **偏光補償光学系**: Romanでの設計経験あり。
 - **コロナグラフマスク光学系**: Roman用の基盤製作中。
 - Baselineマスク
 - 独自コロナグラフ(提案は20年前から)
 - **紫外線装置**: WSO用装置を開発中。Funnel-MCPなど。
- 地上局
- 合計100億円程度、LUVOIR (1.2-1.6兆円) / HabEx (7000億円) の中では1/50以下のパートナーでも、**キー技術**で**旗艦ミッション**に参加すること、TMTなど**地上予算とのバランス**が重要。Romanへの寄与と同様になる予定。(戦略的海外共同)

HabEx Contribution/Schedule

- レポートでの海外の寄与への期待の記述: "Both ESA member states and JAXA are planning to contribute to WFIRST Coronagraph Instrument (CGI) and could naturally reprise or expand on those roles in HabEx coronagraph. The interest in contributing to HabEx from the international community is clearly enthusiastic and there are more opportunities for technical contributions than funding nominally allocated."

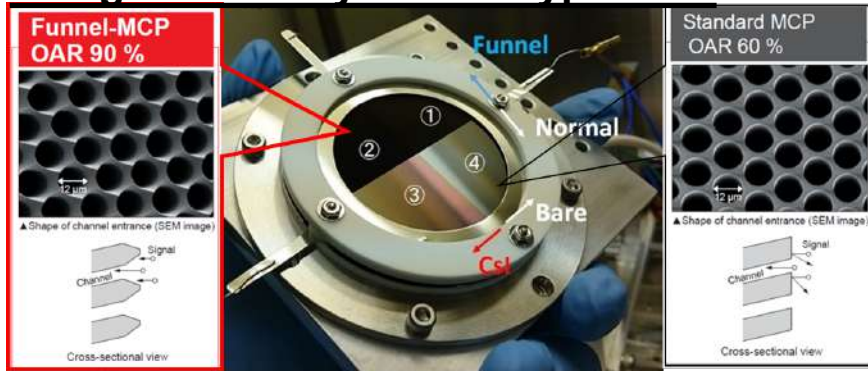
各Phaseの終わり A:2026 B:2029 C:2033 D:2036



MCP detector for UV: fundamental developments

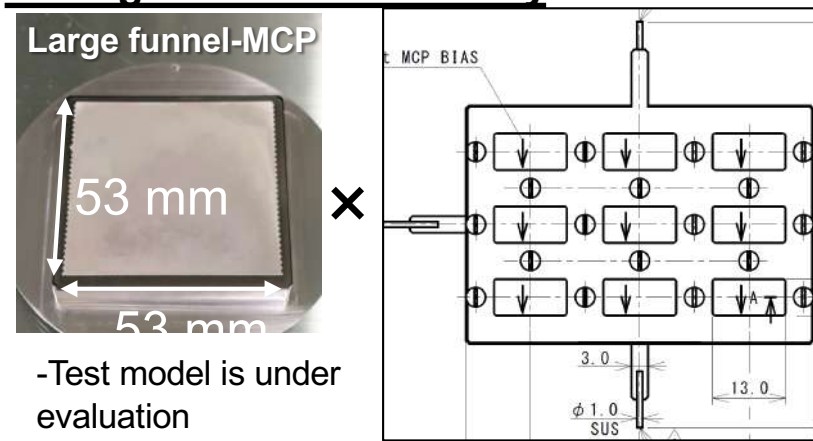
By Kameda
Murakami

1. High efficiency: funnel-type MCP



2. Large format: MCP-array

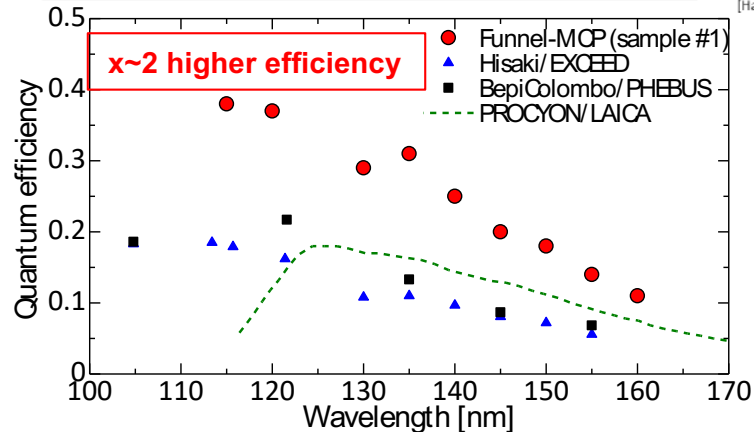
<Requirement: 200 x 200 mm>



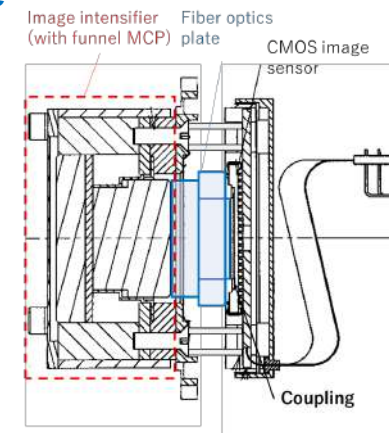
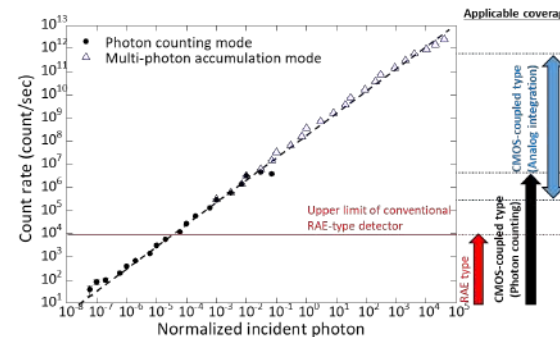
MCP-array with narrow (6.5 mm) gap
-Test model (3x3) with small MCPs is under manufacturing

3. High dynamic range and resolution: CMOS-coupled MCP

-Test model achieved dynamic range of $>10^{11}$ and MCP-channel resolution (6 μm)
-WSO-UV/UVSPEX will use this technique



-Test model ($\phi 40\text{mm}$) achieved ~ 2 times higher efficiency
-WSO-UV/UVSPEX will use this funnel-MCP technique

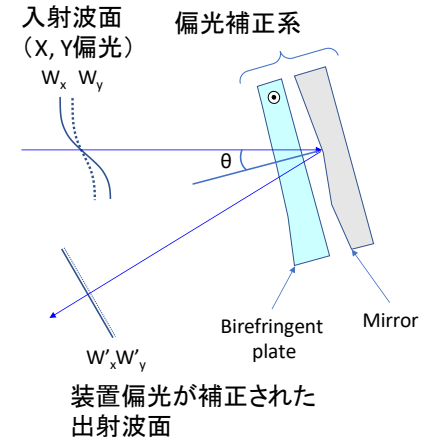


LUVOIRの科学成果を大幅に向上可能

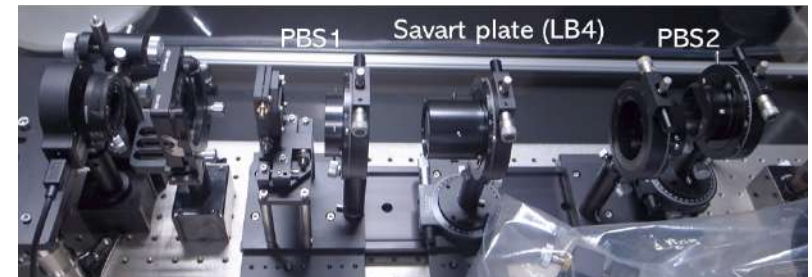
コロナグラフ装置への貢献案

試作デバイス

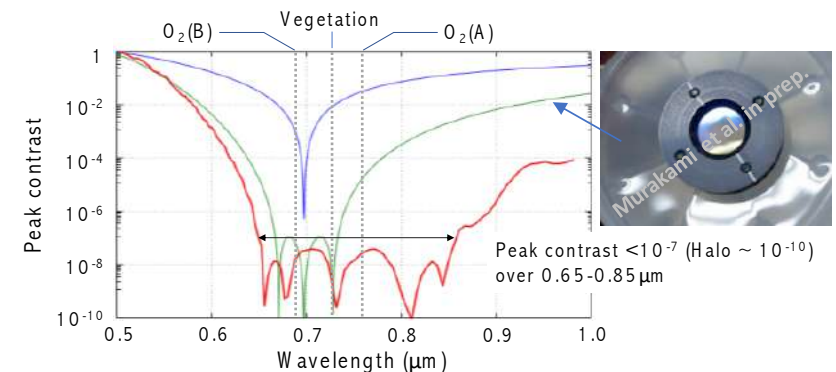
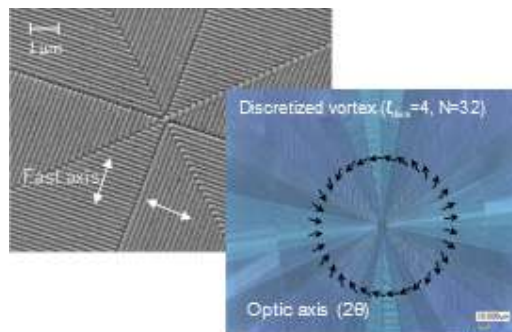
- **フォトリソ技術コロナグラフマスク**
 - 高精細パターンニング(<math><1\mu\text{m}</math>)による多様なマスク設計 (8OPM, vortex, etc)
 - 多層構造による広帯域化を研究中
 - 惑星キャラクタリゼーションに重要
- **複雑なLUVOIR瞳に最適化した瞳アポダイザ**
 - 特に中心遮蔽のあるLUVOIR-Aでのコロナグラフ性能を高める
- **他のコロナグラフ方式(例: visible nuller etc.)**
- テストベッド(e.g., EXIST)での基礎開発
- 偏光補正デバイス(Romanでの開発へリレージ)
 - 望遠鏡装置偏光を軽減
 - 軸外し鏡LUVOIR-BやHabExで重要となるかも



偏光補正デバイスの原理と、試作した方解石デバイス



せいめい望遠鏡搭載を目指して開発中のvisible nuller型コロナグラフ“SPLINE”

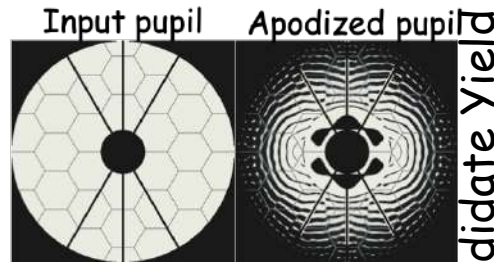
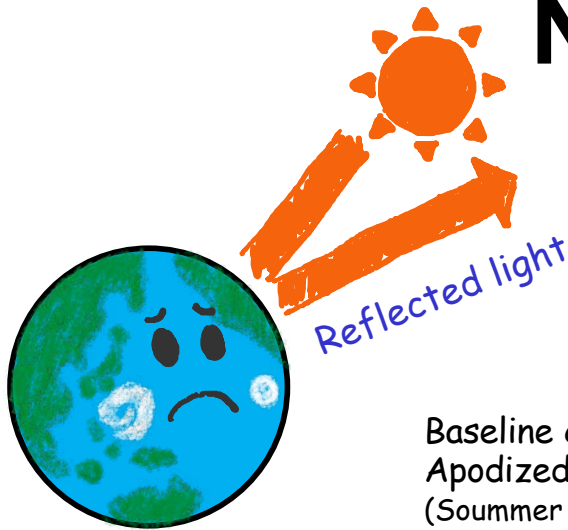


試作したフォトリソ技術8OPMと4次渦マスク(Murakami et al., 2010, 2013, 2014), およびすばる望遠鏡8OPM用に最適化した瞳アポダイザ (designed by J. Nishikawa)

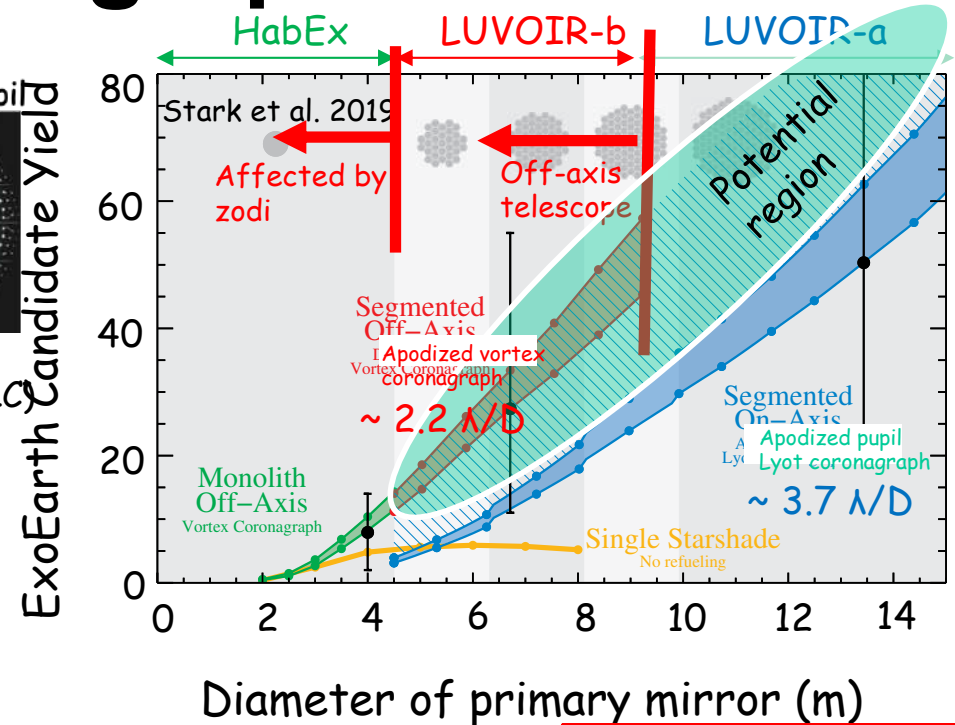
フォトリソ技術単層、3層、5層コロナグラフマスクの理論性能と、試作した3層8OPM (Habu, Murakami, Nishikawa et al.)

New coronagraph mask

By Matsuo



Baseline coronagraph for LUV0IR-a:
Apodized Pupil Lyot Coronagraph (APLC)
(Soummer et al. 2003; N'Diaye et al. 2016)



What is high-performance coronagraph?

1. Contrast
2. Inner working angle (IWA)
3. Sensitivity to tip/tilt
4. Work for on-axis
5. Bandwidth
6. Throughput
- ...

HabEx(SS):

IWA of $\sim 2.4 \lambda/D$

Throughput, $\sim 20\%$

SS: OWA \sim 数秒

	VVC, (HabEx)	VVC (LUV0IR-b)	APLC (LUV0IR-a)	New mask (Itoh & Matsuo AJ 2020)
Contrast	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
IWA (λ/D)	~ 2.4	~ 2.2	~ 3.7	~ 1
Sensitivity to star, tip/tilt	6-th order	6-th order	not sensitive	8-th order
On-axis tele.	not	not	working	working
Bandwidth	10 %	10 %	10 %	10 % $\sim 100\text{nm}$
Throughput	$\sim 20\%$	$\sim 20\%$	$\sim 20\%$	$\sim 20\%$

LUV0IRの科学成果を大幅に向上可能

Summary

- LUVOIR/HabExは、大口径、高空間分解能をもち
- 生命居住可能惑星、地球外生命探査、宇宙物理、地球物理全般を網羅する、究極のミッション。
- 日本の参加によりこれらミッションをより強化し、科学成果を確かなものにする
- キーコンポーネントを担当することで、日本の技術レベルを高める。

ファイナルレポート : <https://www.greatobservatories.org/>