#### Occulting Ozone Observatory Science Overview SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation

Dmitry Savransky<sup>a</sup>, David N. Spergel<sup>a</sup>, N. Jeremy Kasdin<sup>a</sup>, Eric J. Cady<sup>a</sup>, P. Douglas Lisman<sup>b</sup>, Steven H. Pravdo<sup>b</sup>, Stuart B. Shaklan<sup>b</sup>, Yuka Fujii<sup>c</sup>

 <sup>a</sup>Princeton University, Princeton, NJ USA
<sup>b</sup>Jet Propulsion Lab and California Institute of Technology, Pasadena, CA USA
<sup>c</sup>The University of Tokyo, Tokyo, Japan

July 2nd, 2010

(日) (周) (王) (王) (王)

# Why O<sub>3</sub>?

- There is great interest in directly imaging exoplanets down to Earth size.
- Previous mission concepts (TPF-C/I, THEIA, NWO, etc.) are mostly flagship class.
- These are very expensive, require completely new hardware, and in some cases, new launch systems.

Can a smaller/cheaper mission produce useful science data?

#### See:

- 7731-87 Shaklan et al., Error budgeting and tolerancing of starshades for exoplanet detection
- 7331-187 Pravdo et al., Orbiting starshade's performance in observations of potential Earth-like planets
- 7731-190 Sirbu et al., Performance verification for stationkeeping control of O3
- 7731-191 Thomson et al., Occulting Ozone Observatory starshade design and development

비로 시로에 시로에 시험에 시험에

#### Outline







三日 のへの

イロト イヨト イヨト イヨト

## O<sub>3</sub> Telescope

- 1 to 2 m aperture telescope, based on ITT 1.1 and 1.5 m NextView Telescopes
- 2 reflections in telescope + 4 reflections in instrument
- Al plus MgF<sub>2</sub> coating
- Most of repositioning done with telescope spacecraft
  - $\blacktriangleright$  Use pair of arcjet thrusters (600 s  $I_{\rm sp},$  500 mN thrust)
  - Average of 16 days to next target, 8 days to change occulter/telescope separation

	Bandpass (µ)		
Filter #	Blue	Red	
1	0.25 - 0.31	0.5 - 0.7	
2	0.31 - 0.4	0.7 - 0.9	
3	0.4 - 0.48	0.9 - 1.1	
4	0.48 - 0.55	Narrowband	

Гаb	le	ŝ	O3	fi	lters.
-----	----	---	----	----	--------

(日) (周) (王) (王) (王)

## O<sub>3</sub> Occulter





- 34 m diameter occulter with 6.5 m petals
- Geometric IWA of 90 mas 38960 km separation for Blue band, 19480 km separation for Red band
- Petals are wrapped about bus for launch unfurl and rigidize when deployed [Thomson and Lisman, 2010]
- Telescope and Occulter fit into existing 5 m fairings
- Provides  $1 \times 10^{-12}$  suppression at telescope image plane at IWA [Shaklan et al., 2010]

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

#### Outline

Observatory Design



Mission Simulations

イロン イヨン イヨン イヨン

## Time Resolved Photometry



• For nearest targets, can infer rotational period from photometric variation [Palle et al., 2008]

• Can produce binned light curves showing changes in photometry over one day [Fujii et al., 2010]

## Time Resolved Photometry (cont.)



• Light curves yield trajectories on color-color diagrams, indicating different ground cover types [Kawahara and Fujii, 2010]

< ロ > < 同 > < 三 > < 三

## Globally Averaged Photometry



- Photometric variations between bands allow for inferences about atmospheric composition and ground cover
- Even small amounts of ozone are detectable by contrasting first two blue bands [Anderson et al., 1969, Schachter, 1991]

< 🗇 🕨

→ Ξ →

## Other Science

- Orbit Determination
  - Will be able to determine whether planet is in HZ with 4 or more detections, and constrain orbital elements
  - See [Pravdo et al., 2010]
- General Astrophysics
  - ► At least 50% of mission time will be available for non-exoplanet observations
  - Perfect for wide field observations in the optical and near-UV

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

#### Outline

Observatory Design

2 O<sub>3</sub> Science

Mission Simulations

<ロ> <四> <豆> <豆> <豆> <豆> <豆> <豆> <豆> <豆> <豆</p>

# O<sub>3</sub> Configurations



Savransky et al. (Princeton, JPL, & Univ. of Tokyo)

2 July 2010 12 / 17

## Varying Burn Portions



 Higher burn portion decreases mission duration with a relatively small loss in number of detections

イロト イポト イヨト イヨ

#### Multi-planet Systems



#### Multi-planet Systems



#### Multi-planet Systems

## Solar System Analogues



Figure : If every target system with planets observed by  $O_3$  was a solar system copy: (a) Number of detections of each planet analogue scaled by total number of detections. (b) Number of detections of each planet analogue that could be in HZ, scaled by total number of detections.

< < >> < </p>

## Solar System Analogues (cont).



Figure : Average number of analogues classified by probabilistic algorithm as unique (40% error rate). The squares indicate the average number of each analogue type that was included in the simulations.

イロト イポト イヨト イヨ

#### Conclusions

- It is possible to design a direct-detection exoplanet observatory significantly smaller than a flagship mission scale
- $\bullet~O_3$  will be able to detect Earth-size planets and photometrically characterize them
- ullet We can expect to find on the order of 5 Earth-twins if  $\eta_\oplus=0.3$
- Over 50% of the mission time will still be available for general astrophysics
- We have demonstrated a method for assigning probabilities to whether repeat detections represent the same planet as was previously observed

▲□▶▲圖▶▲圖▶▲圖▶ ▲圖圖 釣ぬゆ

#### References



Anderson, R., Pipes, J., Broadfoot, A., and Wallace, L. (1969).

Spectra of Venus and Jupiter from 1800 to 3200 Å. Journal of Atmospheric Sciences, 26:874–888.



Fujii, Y., Kawahara, H., Suto, Y., Taruya, A., Fukuda, S., Nakajima, T., and Turner, E. L. (2010).

Colors of a Second Earth: Estimating the Fractional Areas of Ocean, Land, and Vegetation of Earth-like Exoplanets. The Astrophysical Journal, 715:866–880.



Kawahara, H. and Fujii, Y. (2010).

Global mapping of earth-like exoplanets from scattered light curves. Arxiv preprint arXiv:1004.5152.

Palle, E., E., Ford, E. B., Seager, S., MontAnes-Rodri'guez, P., and Vazquez, M. (2008).

Identifying the rotation rate and the presence of dynamic weather on extrasolar earth-like planets from photometric observations. *The Astrophysical journal*, 676(2):1319–1329.

Pravdo, S. H., Shaklan, S. B., and Lisman, P. D. (2010).

Orbiting starshade's performance in observations of potential earth-like planets. In *Proceedings of SPIE*, volume 7731.



Schachter, J. (1991).

Ozone absorption bands in the 3100 Å - 3400 Å region. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 103:457–460.

Shaklan, S. B., Noecker, M. C., Lo, A. S., Glassman, T., Dumont, P. J., Jordan, E. O., Kasdin, N. J., Webster C. Cash, J., Cady, E. J., and

Lawson, P. R. (2010). Error budgeting and tolerancing of starshades for exoplanet detection. In *Proceedings of SPIE*, volume 7731.



Thomson, M. W. and Lisman, P. D. (2010).

Occulting ozone observatory starshade design and development. In *Proceedings of SPIE*, volume 7731.

< ロ > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 < の < 0</li>

Target Lists



2 July 2010 19 / 17

◆□ > ◆□ > ◆目 > ◆目 > ● ● ● ● ●