Exo JASMINE

Version 1.07

Exo JASMINE 検討チーム: 河原　創 (東京大学)、増田賢人 (大阪大学)、小谷隆行 (ABC/NAOJ)
小玉貴則 (ボルドー大学)、平野照幸（東工大)、福井暁彦 (東京大学)、山田亨 (JAXA/ISAS)

2020 年 10 月 26 日

目次

1 Small JASMINE による晩期型星回りの地球型トランジット惑星探査 1
1.1 晩期 M 型星回りのハビタブルゾーン惑星 2
1.2 晩期 M 星回りの多重惑星系 3

2 Feasibility 4
2.1 Exo JASMINE のターゲット 4
2.2 ノイズ評価 7
2.3 考慮していない点 11

3 他ミッションとの関係 11

付録 A visibility 12

付録 B TCE ターゲット 12

付録 C ライトカーブシミュレーション 12
C.1 PSF モデル 12
C.2 検出器のピクセル間感度ムラ 13

1 Small JASMINE による晩期型星回りの地球型トランジット惑星探査

Exo JASMINE は、Small JASMINE 計画のバルジのアストロメトリサーベイを行えないフェーズ（3 年間につき約 1.5 年）の期間を利用し、太陽系近傍の晩期 M 型星周りのトランジット惑星サーベイ及び既知のトランジット惑星の詳細観測を行う計画である。特に前者ではハビタブルゾーン内の地球型惑星の検出を狙う（図1)。これは、口径 30 cm で 1.1–1.7 ミクロンの近赤外領域で PSF 高安定な測光観測が長期間行えるという Small JASMINE の特質を活かしたものである。

系外惑星そのものの性質を測定できる手法は直接撮像かトランジット惑星にほぼ限られている。とりわけトランジット惑星は、透過光分光により惑星大気の分子を調べることができるという利点を有する。2020 年代

図1　Exo Jasmine 計画で狙う惑星領域。横軸は恒星からの距離を示していて、太陽型星の回り（上）と晩期型星回りを（下）を示す。緑色の帯はハビタブルゾーン。

には、透過光分光観測に適した TMT のような大型地上望遠鏡や JWST (2022 予定)、Ariel (2026 予定) といったスペース望遠鏡が予定されていることから、系外惑星科学においてトランジット惑星の重要性は依然として高い。

Exo JASMINE の主要ターゲットとして想定するモデル恒星・惑星は以下のようなものである。

1. モデル星: 有効温度 3000 K、恒星半径 0.2 $R_\odot$（標準的な晩期 M 型矮星）
2. モデル惑星: 地球サイズ（0.23% のトランジット深さ）、公転周期 20 日 (ハビタブルゾーン内)

Exo JASMINE は系外惑星測光観測の専用に作られているわけではないが、上記のような半径の小さい晩期 M 型星周りでは地球サイズの惑星であっても比較的深い 0.2% 程度の減光が得られる点、もともとのメインサイエンスであるアストロメトリのために温度安定性の要求が高い点が、Small JASMINE がこの種の系外惑星観測に適している理由である。またすばる望遠鏡による視線速度探査も晩期 M 型星をメインサイエンスとしていて、共同研究しやすい対象となっている。

1.1　晩期 M 型星回りのハビタブルゾーン惑星

ハビタブルゾーンとは惑星が表面に海洋を保持することのできる軌道長半径、もしくは惑星の受けるフラックスの範囲のことである[*1]。Exo JASMINE の狙うことのできる最も大きいインパクトがあるターゲットは、ハビタブルゾーン内に存在する地球型トランジット惑星である。惑星の公転周期 P と惑星が受ける全放射フ

[*1] 古典的なハビタブルゾーンの計算は一次元鉛直大気モデルを用いて計算される。すなわち古典的ハビタブルゾーンは惑星球面上で大気が十分に均一であることを仮定している。しかし晩期型星まわりの惑星については潮汐ロックされているため、恒星直下点が常に恒星からの強い加熱を受けるのに対し、惑星反対側はまったく恒星光があたらない。このような状況で内側限界がどこになるかは GCM (Global Circulation Model) 等による三次元のシミュレーションが必要である。特に、晩期型星周りでは、惑星が構成に対して潮汐ロックすることから、恒星直下点に雲が形成されることによるアルベドの実質的な上昇により、ハビタブルゾーンが大幅に内側に移動することが示唆された [9]。しかし、Exo JASMINE の狙う晩期型星の中でも更に晩期である晩期 M 型星では、惑星の自転速度[*2]が速くなるため、super rotation による大気循環が卓越し、恒星直下点での雲形成が阻害され、結局 HZ は古典的な一次元モデルから計算されるハビタブルゾーン付近に位置することが示唆されている [6]

図2　晩期 M 型星まわりの多重惑星系の軌道の例 (TRAPPIST-1)。参考に水星の軌道 (Me) を示している。

ラックス S、恒星の光度 $L_\star$、恒星の質量 $M_\star$ の関係は、

$$P = 12\,\mathrm{d}\left(\frac{S}{S_\oplus}\right)^{-3/4}\left(\frac{L_\star}{0.003L_\odot}\right)^{3/4}\left(\frac{M_\star}{0.15M_\odot}\right)^{-1/2} \tag{1}$$

で与えられる。ここに $S_\oplus$ は地球が受ける全放射フラックスである。有効温度 3000 K の恒星の場合、古典的ハビタブルゾーンに対応する領域に存在する惑星が受ける全放射フラックスは $S_{\mathrm{HZ}} = 0.25S_\oplus$–$0.85\,S_\oplus$ であるから、そのような惑星の周期は $P_{\mathrm{HZ}} = 13$–$34\,\mathrm{d}$ ($a = 0.06$–$0.11\,\mathrm{au}$) となる。したがって、一ヶ月程度の観測期間があれば、モデル星のハビタブルゾーン内のトランジット惑星を検出可能である。

1.2　晩期 M 星回りの多重惑星系

M 型星のなかでもさらに低温である晩期 M 型星まわりの惑星について、現時点でわかっていることは少ない。近年発見された地球サイズの 7 個の惑星を持つ TRAPPIST-1 系 (図2) のような、非常にコンパクトで軌道面の揃った多重惑星系の存在は現在の惑星形成論では説明し難く、ホットトピックとなっている。このような系では一部の惑星が既知のものであっても、宇宙からのフォローアップ観測が新たなサイエンスにつながる。例えば TRAPPIST-1 では、元々の地上観測データに加え、*Spitzer* や *Kepler* といった宇宙望遠鏡によってより高精度あるいはベースラインの長い観測を行うことで、新たな惑星の発見や、惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの周期変動を用いた質量の測定がなされた [5, 8]。このように晩期型星まわりの多重惑星系に属する惑星は、質量と半径の両方を測定し、その物理的性質を議論することが可能な地球型惑星としても重要なターゲットである。Exo JASMINE による観測は、このような既知惑星系の特徴づけにも貢献できる。

1.2.1　TOI-700

TOI-700 is a three-planet system orbiting the nearby (31.1 pc, $T = 10.9$) M2 dwarf with $M_\star = 0.416 \pm 0.010\,M_\odot$ and $R_\star = 0.420 \pm 0.031\,R_\odot$. The star is in the continuous viewing zone and was observed during 11 sectors. The three planets have periods of 9.98, 16.1, and 36.4 days, and radii of 1.01, 2.63, and 1.19 $R_\oplus$. The outermost planet, TOI-700d, recieves 86% of the Earth's insolation and resides

in the conservative habitable zone. The transit depth of KOI-700d is $\approx 400\,\mathrm{ppm/hr}^{1/2}$ and is close to the photometric noise level for a 11th magnitude star . The long baseline was likely essential to detect this planet with *TESS*.

We can map TIC M dwarfs on the detectability plane (transit depth vs *TESS* magnitude) and count how many of them would allow for the detection of Earth-sized planet in the habitable zone. The transit signal may be scaled according to the expected observing duration (i.e., number of transits), taking into account the extended mission.

2 Feasibility

2.1 Exo JASMINE のターゲット

2.1.1 visibility

ターゲット選定には、まず Exo JASMINE 計画で観測可能な天球領域を考えねばならない。ある時刻にある星が Exo JASMINE のターゲット星となりうるためには、以下の 2 点を満たす必要がある。

1. ターゲット星方向と太陽の間の角度が 45 度から 135 度の間に入っていること (太陽角制限)
2. メインサイエンスのバルジ観測期間でないこと

探査恒星の条件をみたし、2 年で L 日以上、上記の条件を満たすもののをターゲットとする。ここで L は、ハビタブルゾーン惑星探査については1.1の議論にもとづいてで決定される期間 $L \sim P_{\mathrm{HZ}} \sim 10$–$30\,\mathrm{d}$ であり、RV あるいは TESS で発見された既知惑星のフォローアップのみを行う場合は予想されるトランジット時刻の周辺のみでよい。

2. について、メインサイエンス期間中にも地球の半周分はバルジ方向を向くことができないが、メインサイエンスの熱的安定性を保証する必要があるため、この期間を利用するターゲットは、熱的安定性を保てるか個別の議論が必要な予備ターゲットとしておく（今後の検討によっては観測が不可能である場合もありうる)。地球禁止角も存在するが、Small JASMINE の軌道は Sun-synchronous orbit (SOO) の dawn-dusk 軌道のため、どの天球位置でも地球周回一回のうち必ず半周期程度以上は地球禁止角から外に出るのでターゲット選定では考えないが、観測の実際のスケジューリングではよく考慮しないとならない。

結局、実質的にはバルジ観測期間中に観測できる場所が、Exo JASMINE では逆に観測できないということになる。厳密にはバルジ観測時に、バルジ方向と逆側は時間が空いているが、熱的要求から自由には観測できない。この反バルジ領域については現時点では弾いているがリストとしては残しておくことにする。

観測継続時間

図3に一年間での観測可能時間の積算を示す[*3]。いつでも観測できる ecliptic pole 方向の期間が半年になっていること、バルジ方向 (青丸が銀河中心) の継続時間が短いことがわかる[*4]。以上は大雑把な見積もりであるが全天の多くの領域を探査可能であることになる。

また、軌道一周につき約半分くらい地食で観測できないのでライトカーブとしては例えば 45 分連続し、45

[*3] 一周につき半分くらい観測できないので、その効果を考えて一年間あたりの積算としている

[*4] バルジ可視期間は、ここでは簡単に銀河中心 (青丸) が太陽禁止角に入っていないという条件で選んでいるので、厳密にはもう少し灰色の領域が広がるかもしれない。

図3　1 年間での可視日数の見積もりとターゲット候補分布 (白点)。青色の部分は十分観測できる領域である。20 日以下の部分は灰色に塗ってある。

分穴が開く、ということの繰り返しのようなものになる。これはターゲットのスケジューリングの際に考慮しないとならないが、トランジットの検出という意味では、食開始時、食終了時のどちらか、または両方がはいれば良くタイムスケールは２０分程度であり深刻な問題ではない。たとえ食開始時、終了時が両方観測ギャップに入った場合でも、タイミングの正確な蹴ってが難しくなるが、検出自体には問題がない。

観測可能な晩期 M 型星の個数

恒星は晩期 M 型の主系列星である。2700–3200 K で巨星を除いたもの ($R < 0.4R_\odot$)、光子ノイズとサチュレーションの観点から ($9.5 < H < 10.5$)[*5]の範囲にあるものを選ぶ。これらを満たす恒星は TESS CTLv7 によると 2000 個強、全天に存在する (図3 白点)。

2.1.2　TESS トランジット天体

探査ターゲットは、TESS 等でハビタブルゾーンの内側にトランジット惑星が発見されているものを優先する。これは惑星は通常、ディスク面にアラインしているため、内側にトランジット惑星が見つかっている場合、外側の惑星がトランジットする確率が、ランダムに選ぶより大幅に向上するからである（図4)。そもそも TESS は nominal 一ヶ月の観測を行っているが、口径 10.5cm であることと観測波長が 0.6–1.0 μm であることから、晩期 M 型のモデル恒星惑星系に対して、5 分ケーデンスで 7 sigma 検出をしようとすると検出限界距離は 6 pc 以内となってしまう。Small JASMINE は口径が約 3 倍、観測波長も赤側 (1.1–1.7 μm) によっているため、モデル恒星では TESS に対し 20 倍程度の集光力を有する。そのため TESS ではみつからないハビタブルゾーン近傍の地球型惑星を探索することができる。詳しくは第2.2章で述べるが、Exo JASMINE ではおおよそ 16–25 pc ($H = 9.5$–10.5) の範囲の探査が可能である。

TESS の TCE (Threshold Crossing Event) は 2019/3 現在、7 sector/24 sector 公開されている。このうち恒星の性質を満たすものは 14 個であるから、単純に考えて全天で 50 個程度のトランジット惑星が TESS で見つかるだろう。したがって、Exo Jasmine のターゲットとして、全天 2000 個程度の visibility のある晩

[*5] LHS3844 は $H = 9.47$ のため含んでも良いかもしれない

図4　内側の惑星がトランジットしているという条件付きでの外側惑星のトランジット確率。内側の惑星の軌道傾斜角は 90 deg と仮定し、外側惑星の内側惑星に対する軌道の傾斜角は幅 σ の Rayleigh 分布に従うとした。。“isotropic” は外側惑星の軌道傾斜角が内側と相関せず完全にランダムな場合で、これは通常の 1 惑星のトランジット確率 $(R_\star/a)$ と一致する。主星は $M_\star = 0.2\,M_\odot$, $R_\star = 0.2\,R_\odot$ を仮定。

期型ターゲット候補星 ($T_{\rm eff} = 2700$–3200 K, $R < 0.4R_\odot$, $9.5 < H < 10.5$) のうち、トランジットがある可能性の高い 20 個程度の TESS TCE を十分厳選できる。現時点でわかっている TCE のターゲット候補の性質については付録 Bに示す。これら晩期 M 型星の惑星が複数惑星系に属する確率、特にハビタブルゾーンに地球型惑星が存在する確率は現時点で不明であるが、ケプラーが発見した太陽型/早期 M 型星周りの惑星系では、短周期の惑星系の半分あるいはそれ以上が複数惑星系であり [1, 10]、かつその軌道面は数度以内で揃っている [4, 3] ことが示唆されている。図4で示した通り、このような系で内側惑星がトランジットしている場合の外側惑星のトランジットは数 10% 以上となるため、もし晩期 M 型星でもこれらの性質が大きく違わないとすると、 1 年半の観測で一個あたり一ヶ月弱観測するとして、約 20 個のターゲット中で数個程度は外側にトランジット惑星をもつと考えれられる。

また、最悪一つも新しいトランジットが受からなかった場合でも、発見済みの惑星についてより長いベースラインでトランジット時刻の情報が得られる。これらは将来のトランジット時刻の予測の精度を向上させることにつながるため、JWST での追観測にとって重要な情報となりうる。また多重惑星系であれば、トランジット周期変動の検出とモデル化による質量の推定にもつながる可能性がある。

Exo JASMINE 観測時には TESS のサーベイが完了している見込みであることから、TESS より候補を選ぶのがリーズナブルであるが、地上のトランジットサーベイで候補天体となっているものでも良いターゲットが存在すれば、それらを加えても良い。

2.1.3 RV 発見天体のフォローアップトランジット探査

TESS トランジット天体と並んで Exo JASMINE の利点が活かせるのが、晩期 M 型星まわりで視線速度法（RV 法) で発見された惑星がトランジットしていないか調べるフォローアップである。現在のところすばる IRD をはじめとしていくつかの晩期 M 型星まわりの惑星探査が行われている。このターゲットの利点は、トランジットする位相がわかっているために効率よく探査を進められる点である。観測を行う期間はトランジット前後の $T =$ 数時間でよい。ただし、トランジットしている確率は低く、ランダムな確率と同程度である。ターゲットとなる惑星の $R_\star/a$ によるが 11% から数% 程度である。すなわち収率は $N =$ 数十個から百個程度みて一個、トランジットが受かるという程度である。一個発見するのに要する時間は、どのようなターゲットが利用できるかに依存するが $NT = 1$ 週間から数週間といったところである。Exo JASMINE 利用時にどの程度の数の RV 惑星が発見されているかは、現時点では不明であるが、適宜観測スケジュールに埋め込むことで対応する。

2.2 ノイズ評価

2.2.1 Shot noise, read noise, dark noise

Shot noise, read Noise、dark current のみを考えた場合の、ある時間サンプリング T における S/N は以下のように定義される。

$$\mathrm{S/N} = \frac{N_\mathrm{s}}{\sqrt{\sigma_\mathrm{s}^2 + \sigma_\mathrm{read}^2 + \sigma_\mathrm{dark}^2}} \tag{2}$$

ここで時間サンプリング T はライトカーブとして解析する際のビニングの幅に対応する。1 frame の積分時間と紛らわしいので慣例に従って T を cadence とよぶ。cadence T は、ここでは 5 minutes を fiducial value として考える。N_s は cadence 内のシグナル光子数、σ_s、σ_read,σ_dark はそれぞれシグナル光子の shot noise、read noise、dark (shot) noise である。ここでは量子化誤差、ゲインは考えず、すべて光子数換算で議論する。

シグナルのショットノイズは Poisson 統計で

$$\sigma_\mathrm{s}^2 = N_\mathrm{s} = \eta n_\mathrm{s} T \tag{3}$$

となる。ここに η は全スループット (cts/cts)、$n_\mathrm{s} = Af_\star$ はシグナルの光子数率 (cts/s)、A は telescope の有効面積

$$A = \pi\left(D/2\right)^2 - \pi\left(\tilde{D}/2\right)^2 \tag{4}$$

(m^2)、ここに $D = 0.31$ m は望遠鏡直径、$\tilde{D} = 0.09$ m は副鏡直径であり、$f_\star$ は光子フラックスである。光子フラックスは、観測対象の恒星を半径 $R_\star$, 距離 d の黒体球として

$$f_\star = \pi\frac{R_\star^2}{d^2}\frac{B_\lambda(\lambda_c)}{hc/\lambda_c}\Delta\lambda \tag{5}$$

(cts/s/m^2) のように見積もった。恒星系としては温度 3000K、半径 0.2 太陽半径の黒体球を仮定した。

Read noise は

$$\sigma_\mathrm{read}^2 = N_\mathrm{read}^2 n_\mathrm{pix} n_\mathrm{frame} \tag{6}$$

で見積もられる。ここに $n_{\rm pix}$ は photometry aperture 内のピクセル数である。第一暗環まで 1.8pixel とのことで、面積は約 10 pix だが、aperture はそれより広めにとるとして 15pix としておく。$n_{\rm frame} = T/t_{\rm exp}$ は cadance あたりのフレーム数である。ピクセルあたり読み出しあたりの read noise $N_{\rm read}$ の項が自乗となっているのは、read noise はその RMS 値で与えられているので、単純に $\sigma_{\rm read}$ が $N_{\rm read}$ に比例するからで、$n_{\rm pix}n_{\rm frame}$ が一乗なのは、pixel 間・ frame 間の誤差が独立で、誤差総和が自乗和の平方根と見積もっていることに対応する。$N_{\rm read}$ は 30cts とする[*6]。

Dark は総ダーク光子数がショットノイズで効くとして

$$\sigma_{\rm dark}^2 = N_{\rm dark} n_{\rm pix} T \tag{7}$$

とみつもる[*7]。

全体として表1に今回仮定した small jasmine の仕様を示す。[*8] また第一暗環まで 1.8pix とすると、全体の光の 3 割程度が中心ピクセルに落ちるので、full well は 80,000cts とすると、サチュレーションリミットは H=9.5 程度にくると計算される。

	small Jasmine
λ_c	1.4 μm
D	0.31 m
$\tilde{D}$	0.09 m
$\Delta\lambda$	0.6 μm
throughput η	0.7
pixel number $n_{\rm pix}$	15
exposure	7.1 s/frame
dark current $N_{\rm dark}$	10.0 cts
read noise $N_{\rm read}$	30.0 cts
cadence T	5 min

表1　Small Jasmine 仕様。

図5（上）にそれぞれの cadence あたりのノイズ量を示す。わかりやすさのためシグナルに対する比率、すなわち

$$\sigma_{\rm s}/N_{\rm s}, \sigma_{\rm read}/N_{\rm s}, \sigma_{\rm dark}/N_{\rm s} \quad {\rm (ppm)} \tag{8}$$

で示してある。これから read noise は比較的大きいもののシグナル光子に由来する shot noise に比べ小さい。

[*6] 読み出しを Fowler/CDS として 1 frame 辺二回読み出しの場合は factor 2 がかかるのだが、これも含めて read noise として考えているとのことなので、上記の値としている。想定値が 30 cts/s/pix とのことで、ということは $\sqrt{2}N_{\rm read}$ が 30 cts ということも考えられるが、この場合、$N_{\rm read}$=21 cts となるが、厳し目に見て $N_{\rm read}$=30 cts としておく。

[*7] 読み出しを Fowler/CDS として factor 2 をかける必要があるが、dark は数 cts ということのなので、この factor 2 も合わせて 10cts とした。

[*8] 各ノイズの見積もりの妥当性チェックとしては、CHEOPS の red book (http://sci.esa.int/cosmic-vision/53541-cheops-definition-study-report-red-book/) p 68 からの Noise Budget、特に Table 10 の read, dark の項の計算結果を再現できることで確かめた。

図5　5 分間積分における Shot noise, Read noise, Dark noise 対シグナル比 (上)。5 分間積分での 7 sigma 限界を達成するトランジット深さ（良いライトカーブが取れることに対応する条件）。灰色領域は saturation limit。図内の距離は 3000K、0.2 太陽半径の恒星を考えた時に対応する距離。

下には cadence(5 分) あたりの 7 シグマに対応するトランジット深さ

$$d_7 = 7\frac{\sqrt{\sigma_{\rm s}^2 + \sigma_{\rm read}^2 + \sigma_{\rm dark}^2}}{N_{\rm s}} \tag{9}$$

を示す。このトランジット深さであれば 5 分 cadence で 7sigma で減光がみえるので、ライトカーブとしては良いものとなっていることに対応する（検出の意味で 7sigma の場合もっと甘い）。この結果からは 25pc 程度までならば 0.35% 減光（モデル恒星系では 1.2 地球半径に対応する）まで 7sigma/5min ライトカーブが取れる。ということで read noise、dark noise は 17-25pc の晩期型まわり地球型惑星のトランジット観測に対して大きい影響はない。

2.2.2　Photometry の安定性

統計ノイズ以外のライトカーブの系統誤差は、姿勢安定によるものや温度変化によるものなどがある。特に姿勢安定性に起因する系統誤差は、検出器ピクセル間 (interpixel) やピクセル内 (intrapixel) の感度のゆらぎにたいし、PSF 中心位置が動いてしまうことによる効果が大きい。これは原理的には Pixel Level Decorrelation 等のテクニックで復元できるが、通常の aperture photometry でどの程度の安定性があるかをまずは知ることが重要である。

interpixel の感度ムラは、IRD の Hawaii 2RG flat データを用いて調べた (詳細は Appendix B)。図6に示すように 1σ で 1% 程度のピクセル間感度ムラがあることがわかる。intrapixel の感度ムラについては測定値がないのでわからないが、CCD では [7] で、CMOS では [2] で特定のものについて調べられている。CMOS でも CCD も分布に大きな違いはなさそうなので、ここでは [7] のモデルを用いる。

ポインティングの精度と PSF 像については、以下の仮定を行う。

- 1 frame を取得する 7 秒の間の安定性は 300 mas (1 σ) である。

図6　IRD 搭載 Hawaii 2RG フラットデータからみつもったピクセル間感度ムラの分布関数。

- 光学系の PSF 自体は理想的な回折限界像とし、7 秒の 1frame では、これに 300 mas (1σ) の Gaussian convolution がかかったものを PSF とする。
- 次の frame の検出器上の位置精度は保障されない。最悪ケースはピクセルの場所がランダムに選ばれる場合である

Frame 間の検出器上の位置がランダムな場合

上述のように Small JASMINE では 1 frame 7 秒間の安定性については保障されるが、検出器面上での各 frame の中心位置の決定精度については要求がない。そこで frame ごとの中心座標が完全にランダムな場合についてまず考える。フラットについては検出器面の大局的な分布については補正できるとし、ピクセルごとにランダムに $1\sigma = 1$ % のガウシアンに従う interpixel の揺らぎがあるとする。1 frame ごとにランダムな位置をあたえ、PSF の回折限界像を Gaussian でなまして、ピクセル値を計算し 1 frame の光量を計算した。ここで厳密にはガウシアンでなます部分が完全になまる極限と、それほど鈍らない場合があり、これは 7 秒間の安定性がどれくらいきくのかによるが、ここでは 7 秒間のうち、256 点ガウシアンからサンプリングしたゆらぎを積算して計算した。図7(左）が単純な aperture photometry の結果である。ただし、ここでは光子ノイズ等の他のノイズは考慮していない。このときのノイズレベルは 5 分ケーデンスで 370ppm であり、7 シグマに若干及ばない値であるもののり、光度な補正をしなくても 0.23% の減光自体は受かることがわかる。

一方、事前に interpixel のゆらぎを測定しておき、完全に補正できた場合はノイズは 2 ppm まで低下する。interpixel 由来のノイズは残るものの、psf がピクセルに対してそこそこ広いことから、interpixel のゆらぎの影響のほうが大きいことがわかる。

もうすこし現実的に考えて interpixel の感度を 0.1% (1σ) で推定できたとした場合のライトカーブを図7(右) に示す。検出器の感度むらは 1% (1σ) であるので、ゆらぎの 1/10 程度の誤差の推定ができたことに対応する。この場合、35 ppm まで低下し shot noise や read noise よりかなり小さい値となる。

まとめると単純な aperture photometry では、検出器由来のノイズは、他のノイズの最大値と同程度くら

図7　(左) 単純な aperture photometry をした場合のライトカーブシミュレーション。中心に 0.23% 程度のトランジットを付加している。intrapixel, interpixel のむらに起因するノイズが見られる。(右) flat 補正により interpixel のゆらぎが補正できた場合。ただし、interpixel の感度の値は 0.1% (1σ) で推定できたとする。intrapixel によるノイズが残るものの、ノイズとしては他のものに比べ無視できる。いずれも frame ごとにポインティング箇所が、完全ランダムなケース。その他のノイズは付加していない。

いの寄与がある。しかし、検出器のピクセル感度を 0.1% のレベルで補正できれば、他のノイズに比べて無視できるようになると言える。

2.3　考慮していない点

- フラットと恒星スペクトルの違いによる sensitivity のエラー
- フラットの Linearity 依存
- フラットの global な補正
- バックグラウンド。TESS ではバックグラウンドの時間変化がかなりあるため、周辺の dark な領域の情報が必要。JASMINE ではどうか？
- persistence of IR detector (Persisitence については現在 H2RG on IRD の解析中)

3　他ミッションとの関係

- CHEOPS – Exo Jasmine と同じく一個一個の天体を個別に観測する（PIT 観測）衛星。可視光で口径も 30 cm 程度である。2019 打ち上げ予定。CHEOPS は TESS 等の発見した他トランジットの超高精度測光 (0.01% のトランジット深さ) をするため、かなりデフォーカスしたイメージングを行う。また TESS よりも可視側によったバンドになっている。M 型周りの惑星に対しては $V < 13$ を想定している。これはモデル恒星系の晩期 M 型星では $H < 9.5$ に相当し、exo Jasmine のターゲットとは重ならない。
- JWST　– トランジット惑星の透過光分光をおこなうことのできるフラグシップ機。特に主力の分光器 NIRSPEC ($R = 2700$) は $H = 10$ 以下だとサチュレーションを起こす[*9]。Exo JASMINE の想定するターゲットはこれより若干、暗いものが多いため NIRSPEC によるキャラクタリゼーションに最適で

[*9] NIRISS ($R = 700$) のサチュレーションリミットは $J = 8.5$。

ある。

- Speculoos 1m の望遠鏡群。Trappist のグループによる。(チリ 4 台、テネリフェ 1 台) による地上晩期 M 型から L 型矮星まわりの惑星探査。

スペース観測の利点としては、シンチレーションによる限界や天候、昼夜の窓等はない。

付録 A　visibility

太陽の天球面での $\mathrm{RA}_\odot$ (degree), $\mathrm{DEC}_\odot$ (degree) は

$$\mathrm{DEC}_\odot = \zeta \sin\left(\frac{\pi}{180}\mathrm{RA}_\odot\right) \tag{10}$$

の関係にある。ここに $\zeta = 23.4$ degree は赤道傾斜角である。

付録 B　TCE ターゲット

図8に ($T_{\mathrm{eff}} = 2700$–3200 K, $R < 0.4R_\odot$, $9.5 < H < 10.5$) をみたす Sector1–7 までの TCE の周期と半径を示す。短周期で小さい半径のものが 3 個で（つまり全天で期待値１０個程度）Neptue サイズから木星サイズのものは 11 個（つまり全天で期待値３８こ程度）程度である。

付録 C　ライトカーブシミュレーション

C.1　PSF モデル

Small JASMINE の PSF モデルとしては、ドーナツ状の開口の回折限界像に 7 sec の間の姿勢乱れによる blur が加わったものが、1 shot の PSF となる。開口直径が D、副鏡直径が S のドーナツ開口の焦点面での場は

$$A(\theta) = 2\pi \int_{S/2\lambda}^{D/2\lambda} drrJ_0(2\pi r\theta) \propto \frac{J_1(\pi\chi)}{\chi} - \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \frac{J_1(\pi\chi')}{\chi'} \tag{11}$$

$\chi = \theta/(\lambda/D)$, $\chi' = \theta/(\lambda/S)$ となる。ここで、

$$\alpha = \frac{\lambda/D}{\theta_{\mathrm{pix}}} = \frac{\lambda/D}{w/l} = 1.82 \tag{12}$$

$$\beta = \frac{\lambda/S}{\theta_{\mathrm{pix}}} = \frac{\lambda/S}{w/l} = 0.59 \tag{13}$$

を定義し、$w = 10\mu$m(ピクセルサイズ)、$l = 3.9$m(焦点距離)、$\theta_{\mathrm{pix}} = w/l = 530$ mas はピクセルあたりの角度とすると

$$A(R) \propto \frac{J_1(\pi R/\alpha)}{R/\alpha} - \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \frac{J_1(\pi R/\beta)}{R/\beta} \tag{14}$$

となる。ここに $R = \theta/\theta_{\mathrm{pix}}$ はピクセル単位の距離である。したがって強度分布は

$$I(R) = \left| \frac{J_1(\pi R/\alpha)}{R/\alpha} - \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \frac{J_1(\pi R/\beta)}{R/\beta} \right|^2 \tag{15}$$

図8　恒星の条件 ($T_{\rm eff} = 2700$–3200 K, $R < 0.4R_\odot$, $9.5 < H < 10.5$) を満たす TESS TCE の半径 (地球半径) と周期 (sector1 から sector 7 までの TCE)。線で繋いであるものは複数惑星系。

となる。これにピクセルスケールで $\sigma = 300\,{\rm mas}/\theta_{\rm pix} = 0.57$ の二次元ガウシアンコンボリューションがかかったものを 7 秒間 1 frame の PSF と見なす。

C.2　検出器のピクセル間感度ムラ

Small JASMINE では Hawaii 4RG を検出器として想定している。Hawaii 4RG のフラットの入手が現在のところ難しいため、Hawaii 4RG の前世代 (2K バージョン) の Hawaii 2RG を用いて、ピクセル間の感度ムラを推定する。Hawaii 2RG のデータとしてはすばる望遠鏡に搭載されている IRD の Hawaii 2RG のフラットを用いる。IRD は分光器のためフラットと言っても、検出器に一様に光が当たるわけではなく、各オーダー内に線上に光が当たっている。そこでオーダーの直線上のあるピクセルの前後ピクセルとの違いを計算することで、感度ムラを見積もった (図9)。若干、システマチックなパターンも見られるが、大まかに感度ムラに起因すると思われるランダムなゆらぎの存在が見て取れる。図6はこのムラの分布ヒストグラムをとったものである。これよりピクセル間の感度ムラとして $\sigma = 0.01$ の正規分布で近似を行えば良さそうであることがわかる。

C.2.1　検出器のピクセル内感度ムラ

一方、ピクセル内の感度ムラを調べるためには特殊なテストが必要であり、現時点で Hawaii 4RG/2RG に対するデータは見つからない。参考になる情報として CCD では [7] で、CMOS では [2] で調べられている。

図9　IRD Hawaii 2RG のフラットデータの感度ムラ（あるオーダーを拡大したもの）。

参考文献

[1] S. Ballard and J. A. Johnson. The Kepler Dichotomy among the M Dwarfs: Half of Systems Contain Five or More Coplanar Planets. *Apj*, 816:66, January 2016.

[2] Swaraj Bandhu Mahato, Joris De Ridder, Guy Meynants, Gert Raskin, and Hans Van Winckel. Measuring Intra-pixel Sensitivity Variations of a CMOS Image Sensor. *arXiv e-prints*, page arXiv:1805.01843, May 2018.

[3] F. Dai, K. Masuda, and J. N. Winn. Larger Mutual Inclinations for the Shortest-period Planets. *ApJL*, 864:L38, September 2018.

[4] D. C. Fabrycky, J. J. Lissauer, D. Ragozzine, J. F. Rowe, J. H. Steffen, E. Agol, T. Barclay, N. Batalha, W. Borucki, D. R. Ciardi, E. B. Ford, T. N. Gautier, J. C. Geary, M. J. Holman, J. M. Jenkins, J. Li, R. C. Morehead, R. L. Morris, A. Shporer, J. C. Smith, M. Still, and J. Van Cleve. Architecture of Kepler's Multi-transiting Systems. II. New Investigations with Twice as Many Candidates. *ApJ*, 790:146, August 2014.

[5] M. Gillon, A. H. M. J. Triaud, B.-O. Demory, E. Jehin, E. Agol, K. M. Deck, S. M. Lederer, J. de Wit, A. Burdanov, J. G. Ingalls, E. Bolmont, J. Leconte, S. N. Raymond, F. Selsis, M. Turbet, K. Barkaoui, A. Burgasser, M. R. Burleigh, S. J. Carey, A. Chaushev, C. M. Copperwheat, L. Delrez, C. S. Fernandes, D. L. Holdsworth, E. J. Kotze, V. Van Grootel, Y. Almleaky, Z. Benkhaldoun, P. Magain, and D. Queloz. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542:456–460, February 2017.

[6] R. k. Kopparapu, E. T. Wolf, J. Haqq-Misra, J. Yang, J. F. Kasting, V. Meadows, R. Terrien, and S. Mahadevan. The Inner Edge of the Habitable Zone for Synchronously Rotating Planets around Low-mass Stars Using General Circulation Models. *ApJ*, 819:84, March 2016.

[7] H. Toyozumi and M. C. B. Ashley. Intra-Pixel Sensitivity Variation and Charge Transfer Inefficiency - Results of CCD Scans. *PASA*, 22:257–266, August 2005.

[8] Songhu Wang, Dong-Hong Wu, Thomas Barclay, and Gregory P. Laughlin. Updated Masses for the TRAPPIST-1 Planets. *arXiv e-prints*, page arXiv:1704.04290, Apr 2017.

[9] J. Yang, N. B. Cowan, and D. S. Abbot. Stabilizing Cloud Feedback Dramatically Expands the Habitable Zone of Tidally Locked Planets. *ApJL*, 771:L45, July 2013.

[10] W. Zhu, C. Petrovich, Y. Wu, S. Dong, and J. Xie. About 30% of Sun-like Stars Have Kepler-like Planetary Systems: A Study of Their Intrinsic Architecture. *ApJ*, 860:101, June 2018.