

# 系外衛星の観測に向けて

東北大学理学研究科天文学専攻博士課程前期2年 塚本淳

## ABSTRACT

ハビタブルゾーン内の巨大ガス惑星の周りに岩石惑星が存在すればハビタブルムーンと呼べるのではないだろうか？

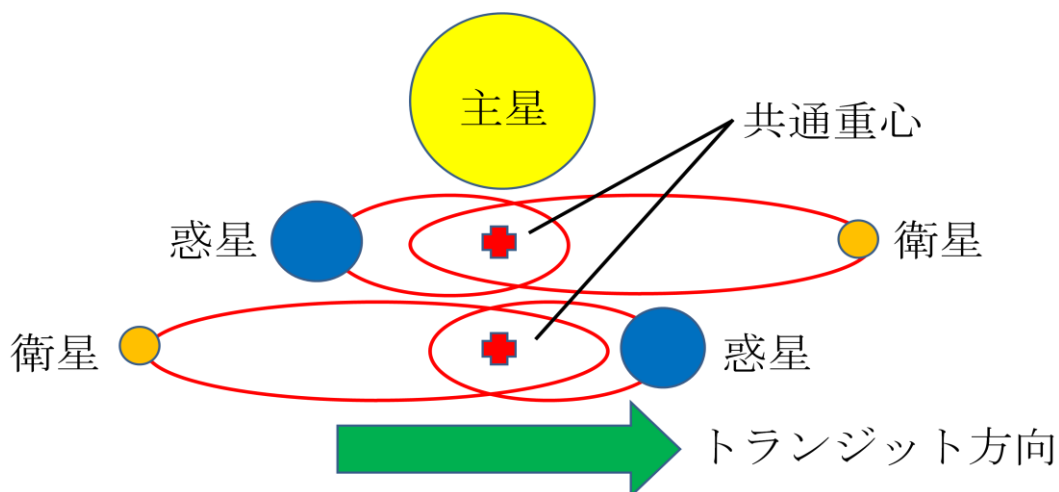
現在多くの系外惑星が観測されているが未だに系外衛星は観測されていない。しかし太陽系の中だけでも数多くの衛星が存在している。系外惑星の周りに衛星がないと考えるほうが難しいだろう。また木星の数倍の惑星の周りには地球サイズの天体が衛星になっていてもおかしくはない。母惑星がハビタブルゾーンにあればその周りの衛星もハビタブルな環境にあり「ハビタブルムーン」と呼べるはずである。

まずはハビタブルゾーンにこだわることなく系外衛星検出の可能性について考えてみたい。その方法として母惑星のトランジット曲線のTTV、TDVを観測する方法を紹介する。TTV、TDV観測には複数回のトランジットを観測する必要があるのであまりにも公転周期が長い惑星や主星が大きく変光してしまうようなターゲットは選べない。

太陽系や代表的な系外惑星に対してTTV、TDVの計算を行った。またその値が宇宙望遠鏡で観測可能であるかの評価を行った。結果次世代の宇宙望遠鏡を用いれば十分系外衛星を検出できる結果となった。

<系外衛星の検出法>

TTV(Transit Time Variation)



惑星-衛星系の共通重心の周りで惑星の位置が周期的に振動する。その結果トランジット中心時間が訪れるタイミングに変化が生じる。惑星が上の位置の場合トランジット中心時

間は少し遅れ、下の位置の場合少し早まる。

惑星の運動が円軌道でない場合 TTV は単純な sin 曲線にはならない。そのため振幅の定義として rms amplitude を用いる。この振幅を  $\delta_{TTV}$  とすると

$$\delta_{TTV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{a_p^{1/2} a_s M_s M_{PRV}^{-1}}{\sqrt{G(M_* + M_{PRV})}} \cdot \frac{\zeta_T(e_s, \varpi_s)}{\Upsilon(e_p, \varpi_p)}$$

ここで

$$\zeta_T = \frac{(1 - e_s^2)^{1/4}}{e_s} \sqrt{e_s^2 + \cos(2\varpi_s)(2(1 - e_s^2)^{3/2} - 2 + 3e_s^2)}$$

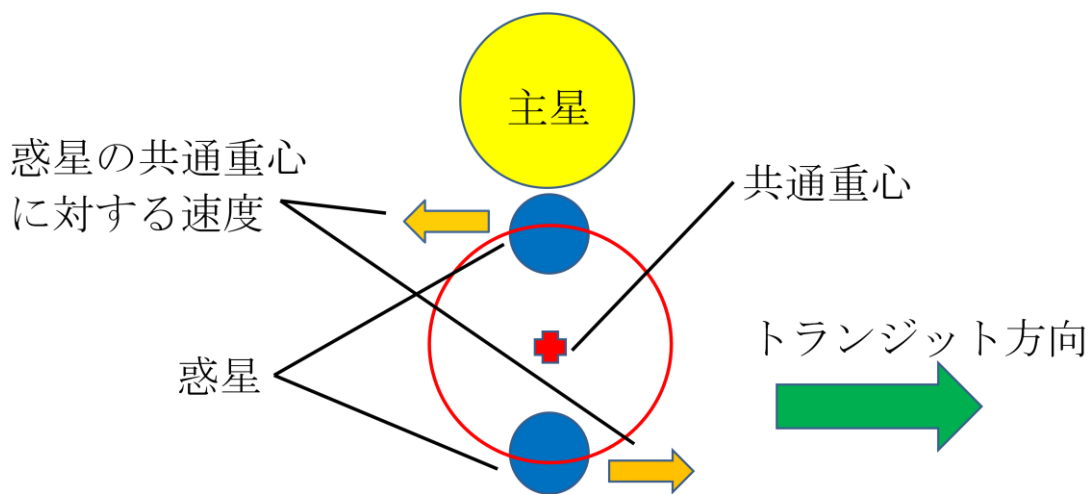
$$\Upsilon = \cos \left[ \arctan \left( \frac{-e_p \cos \varpi_p}{1 + e_p \sin \varpi_p} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{2(1 + e_p \sin \varpi_p)}{(1 - e_p^2)}} - 1$$

Kipping.2009

- |                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| $a_p$ :惑星の主星周りの公転長半径 | $a_s$ :衛星の公転長半径              |
| $M_s$ :衛星質量          | $M_{PRV}$ :惑星の質量と衛星の質量の合計    |
| $G$ :重力定数            | $M_*$ :主星質量                  |
| $e_s$ :衛星離心率         | $\varpi_s$ :座標平面に対する衛星の近点の位置 |
| $e_p$ :惑星離心率         | $\varpi_p$ :座標平面に対する惑星の近点の位置 |

ここで重要なのは  $\delta_{TTV}$  が  $a_s$  と  $M_s$  に比例している点である。しかしここからでは衛星のモーメント  $a_s M_s$  しか求めることができない。衛星の公転周期がわかればケプラーの第3法則より  $a_s$  を求めることができるが、一般に惑星が1回トランジットを起こす間に衛星は惑星を何周もしてしまうため正確に衛星の公転周期を求めることができない。そこでもう一つの検出法を用いる。

### TDV(Transit Duration Variation)



惑星-衛星系の共通重心の周りで惑星の速度が周期的に変化する。その結果トランジット継続時間に変化が生じる。惑星が共通重心に対してトランジット方向に移動していれば主

星を横切る速度は速くなりトランジット継続時間は短くなる。当然逆の場合は長くなる。  
 振幅の定義として TTV と同様に rms amplitude を用いる。この振幅を  $\delta_{TDV}$  とすると

$$\delta_{TDV} = \sqrt{\frac{a_P}{a_S}} \cdot \sqrt{\frac{M_S^2}{M_{PRV}(M_{PRV} + M_*)}} \cdot \frac{T}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\zeta_D(e_S, \omega_P)}{\Upsilon(e_P, \omega_P)}$$

ここで

$$\zeta_D(e_S, \omega_S) = \sqrt{\frac{1 + e_S^2 - e_S^2 \cos(2\omega_S)}{1 - e_S^2}} \quad \text{Kipping.2009}$$

T: トランジット継続時間

$\delta_{TDV}$  は  $a_S^{-1/2}$  と  $M_S$  に比例している。よって  $\delta_{TTV}$  と  $\delta_{TDV}$  の比をとることで  $a_S$  と  $M_S$  を別々に決めることができる。ただしこの  $\delta_{TTV}$  と  $\delta_{TDV}$  は以下の仮定をしている。

- ・ 惑星の周りに衛星は1つ
- ・ 惑星-衛星の軌道面と主星-惑星の軌道面は同一
- ・ 軌道傾斜角  $i=90^\circ$

<不確定性評価>

TTV、TDV を正確に求めるためにはそれぞれトランジット中心時間  $t_c$  と継続時間 T を正確に決める必要がある。 $t_c$  と T の不確定性は Fisher information analysis によって次のように表せる(Carter et al. 2008 Kipping et al. 2009)

$$\sigma_{t_c} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{\Gamma_{ph}T} + I^2 + S^2} \sqrt{\frac{T\tau}{2}}$$

$$\sigma_T = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{\Gamma_{ph}T} + I^2 + S^2} \sqrt{2T\tau}$$

$\tau$ : 惑星が主星の前に進入する時間

$\Gamma_{ph}$ : photon collection rate

d: トランジットの深さ

I: instrument noise

S: stellar variability

stellar variability は 10ppm とした。

この TTV と TDV を用いた観測によって太陽系の衛星や代表的な系外惑星の衛星が宇宙望遠鏡を用いた場合、どの程度検出の可能性があるかを考察してみる。

<太陽系の衛星を系外から見た場合>

$e_p=0$ 、 $e_s=0$ 、 $i=90^\circ$ 、主星-惑星-衛星は同一平面と仮定して太陽系を 10pc 離れたところから見た場合を考える。不確定性は Kepler 宇宙望遠鏡を用いた場合で計算した。

	$\delta_{TTV}(s)$	$\delta_{TDV}(s)$	$\sigma_{tc}(s)$	$\sigma_T(s)$	$(S/N)_{TTV}$	$(S/N)_{TDV}$
地球-月	110.9	13.8	376.8	753.6	0.29	0.02
木星-ガニメデ	4.5	4.9	22.8	45.7	0.20	0.11
土星-タイタン	21.2	13.9	40.0	80.0	0.53	0.17
海王星-トリトン	9.7	30.5	267.7	535.3	0.04	0.06

いずれも検出は不可能である。しかし結果をよく見ると巨大な惑星ほどトランジットが深くなるためエラーは減少するが、惑星自体が重く衛星の影響をあまり受けなくなってしまうことがわかる。そのため土星のような半径は大きく質量が小さい低密度な惑星が観測しやすいといえる。

<代表的な系外惑星の値>

$i=90^\circ$ 、 $e_s=0$ 、それぞれの惑星に 1 地球質量の衛星が 1 つ存在していると仮定して計算した。衛星の軌道半径はヒル半径の 1/3 としている。他のパラメーターはそれぞれの惑星系のものを用いた。不確定性は同じく Kepler 宇宙望遠鏡を用いた場合。

	$\delta_{TTV}(s)$	$\delta_{TDV}(s)$	$\sigma_{tc}(s)$	$\sigma_T(s)$	$(S/N)_{TTV}$	$(S/N)_{TDV}$
HD189733b	1.5	3.2	0.9	1.9	1.67	1.68
HD209458b	3.3	62	1.9	3.7	1.74	1.68
TrES-1b	2.7	4.6	2.9	5.9	0.93	0.78
HAT-P-1b	4.6	7.7	3.2	6.3	1.44	1.22
GJ436b	13.4	18.2	3.4	6.8	3.91	2.70

GJ436b が比較的検出の可能性が高いことがわかった。GJ436b はいわゆるホットネプチューンであり、地球サイズの衛星との質量比が小さいためであると考えられる。また GJ436 のような M 型星はハビタブルゾーンがかなり内側になるため、トランジット法でハビタブルゾーン内の惑星をみつけやすい。

そこで次に GJ436b を性質はまったく変えずに GJ436 のハビタブルゾーン(公転周期を 35.7 日とする)に置き、1 地球質量の衛星を持つと仮定した場合を考える。 $e_s=0$ 、衛星の軌道半径はヒル半径の 1/4 として考える。

この系の各パラメーターは

GJ436		GJ436b	
距離	10.2pc	質量	0.0737 木星質量
スペクトルタイプ	M2.5	半径	0.365 木星半径
視等級	10.68	離心率	0.15
質量	0.452 太陽質量	$\omega_p$	351°
半径	0.464 太陽半径	公転周期	35.7 日(ハビタブル)
		T	13000 秒
		$\tau$	1050 秒

TTV、TDV を計算すると

$$\delta_{\text{TTV}}=138 \text{ 秒} \quad \delta_{\text{TDV}}=57 \text{ 秒} \quad (\text{Kipping et al.2009})$$

今度は Kepler だけでなく次世代の宇宙望遠鏡 WISH と JWST についても不確定性を評価してみる。それぞれの望遠鏡の性能を簡単にまとめておく。

	口径(m)	観測波長	リードノイズ(e <sup>-</sup> )	口径内ピクセル数
Kepler	0.95	V	120	20
WISH	1.5	K	15	16
JWST	6.5	K	15	18

これらの値を用いて不確定性を計算すると

	Kepler	WISH	JWST
$\sigma_{\text{tc}}(\text{s})$	6.1	4.1	4.0
$\sigma_{\text{T}}(\text{s})$	12.2	8.2	8.0

このように衛星検出に理想的な惑星系であれば現在の宇宙望遠鏡でも観測可能であることがわかる。また次世代の望遠鏡であればもっと条件が悪い系でも観測の可能性が高まる。WISH と JWST では不確定性にそれほど差がないがこれはある程度視等級が明るい恒星系 ( $m < 10$ ) では不確定性はほとんど主星の stellar variability で決まってしまうため口径はあまり関係なくなってしまう。

将来ハビタブルゾーン内の衛星を見つけるにあたってターゲット天体を M 型星としたほうがハビタブルゾーンが内側になるためトランジット法で見つけやすいというメリットがあった。しかし可視光では M 型星は暗すぎるというデメリットがある。しかし WISH や JWST などは M 型星が比較的明るい K バンドでの観測が可能であるためこの点でも系外衛星観測のアドバンテージがあるといえる。

<参考文献>

Kipping D. M et al., 2009, MINRAS, 400, 398

ALLEN'S ASTROPHYSICAL QUANTITIES

Kipping D. M.,2009, MNRAS, 392, 181

GALACTIC ASTRONOMY

Carter J. A et al., 2008,Apj, 689, 499

<http://kepler.nasa.gov/>

<http://www.jwst.nasa.gov/>

<http://exoplanet.eu/>

<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

理科年表