

ケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット惑星の質量推定

仲谷 峻平 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

今回我々は、ケプラー宇宙望遠鏡で観測された 3 惑星系 (KOI-886) の測光データを解析し、トランジット惑星の質量を推定した。

各惑星の質量は、観測で得られたトランジット時刻 (t^{obs}) を最もよく再現する数値的に計算したトランジット時刻 (t^{sim}) を見つけることにより得ることができる。今回は、主星に近いところを周る 2 惑星のみをモデル化した場合と、3 惑星全てをモデル化した場合の 2 通りを Levenberg-Marquardt 法を用いて解析した。各惑星の質量は次のようになった。まず、 $N = 2$ のとき、KOI-886.01 : $M_{01} = 6.84M_{\oplus}$, KOI-886.02 : $M_{02} = 5.43M_{\oplus}$ 。また、exoplanet archive から引用した各惑星半径を用いると平均質量密度はそれぞれ、 $\rho_{01} = 4.13[\text{g}/\text{cm}^3]$, $\rho_{02} = 16.1[\text{g}/\text{cm}^3]$ となる。次に、 $N = 3$ のとき、KOI-886.01 : $M_{01} = 11.7M_{\oplus}$, KOI-886.02 : $M_{02} = 9.76M_{\oplus}$, KOI-886.03 : $M_{03} = 88.3M_{\oplus}$ 。平均質量密度は、 $\rho_{01} = 7.07[\text{g}/\text{cm}^3]$, $\rho_{02} = 28.9[\text{g}/\text{cm}^3]$, $\rho_{03} = 94.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ 。これらの値を用いると、KOI-886.01 は岩石・鉄惑星、KOI-886.02 は主成分が鉄の惑星、KOI-886.03 はほとんど純粋な鉄でできた惑星と結論づけられる。ただし、これらの値はまだ精査が必要である。

1 Introduction

2009 年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、太陽系外の惑星によるトランジット（主星に蝕を起こすこと）の際に引き起こされる主星の減光を観測するものである。減光が観測されると、太陽系外の星に惑星が存在するという間の接的な証拠となり、実際に 1000 近くの系外惑星がこのトランジット法により発見されてきた (Borucki et al. 2010)。

しかし、減光を観測した時点では、トランジット天体は系外惑星「候補」とされるに留まる。蝕を起こす連星系がトランジット惑星の減光シグナルを模している場合もあるからである。したがって、惑星候補が真に惑星であるという確証を得るためには、その質量が惑星質量程度であることを示す必要がある。

これまで、質量をはじめとした系外惑星のパラメータは、主に分光観測から求まる主星の視線速度により決定されてきた。しかし、ケプラーのターゲットには暗い星周りの惑星系が多く、このような系では各波長に分けて光子数を測定する分光観測は困難である。そこで近年、ケプラーによって発見されたトランジット惑星の質量推定法としてよく用いられるのが Transit Timing Variation (TTV) の解析であ

る。TTV とは、複数惑星系における惑星同士の重力相互作用に起因するトランジットの一定周期からのずれのことを指す。この TTV をモデル化することで、惑星の質量などのパラメータを精密に決定することができる (Holman et al. 2010)。TTV のデータは、トランジットの減光のみを解析して得られるため、視線速度とは異なり分光の必要がない。したがって、特に暗い星周りの惑星系において、TTV による質量推定法は大変有用なものとなる。

このような質量推定法により、ケプラーのデータから多くの惑星が発見されてきた一方で、まだ質量が決まっていない惑星も数多く残っている。今回はこれら未解析の系のひとつで、TTV が見られる KOI-886 を解析対象として選んだ。この系は 3 つのトランジット惑星を保有し、主星の質量は $(0.5140 \pm 0.033)M_{\odot}$ である。これらの惑星はすでに惑星として confirm 済み (Steffen, J.H. 2013) ではあるが、TTV のモデル化をして質量を決めるということは未だなされていない。本研究では、このデータを解析し、KOI-886 系のトランジット惑星を惑星と再度 confirm するとともに、惑星の性質を知る上で不可欠な質量というプロパティを明らかにすることを目的とした。

2 Methods

KOI-886 系の各惑星質量を決めるプロセスには数値計算を用いた。数値計算のコードは、ケプラーのデータから得られるトランジット時刻 t^{obs} (Mazeh, T., et al. 2013) を最もよく再現する数値的に導いたトランジット時刻 t^{sim} を与えるモデルパラメーターを探索するというものとなっている。ここで、モデルパラメーターとは、 N 惑星系モデルの運動方程式を解く際に必要となる $5N$ 個の自由度を持つパラメーターのことである。一般に惑星系の運動方程式を解くには、惑星ひとつあたり 7 個 (惑星質量と運動方程式の初期条件 6 つ) のモデルパラメーターが必要である。しかし本研究では、惑星系が共通の公転面を持つものと仮定するので、自由度が各惑星 2 ずつ減少する。したがって、モデルパラメーターは惑星ひとつあたり 5 個になる。

KOI-886 系の各惑星の t^{obs} は図 1 のようになっている。図 1 では、KOI-886.01 と KOI-886.02 が 2:3 の軌道共鳴に近いことからくるシグナルが見えている。したがって、今回我々はまず KOI-886.01 と KOI-886.02 の 2 惑星系モデルで t^{obs} をフィッティングし、その後 KOI-886.03 を加えた 3 惑星系のモデルで t^{obs} をフィッティングすることを考える。

フィッティングには Levenberg-Marquardt 法 (Marquardt, D.W. 1963) を用いる。まず始めに、適当な $5N$ ($N = 2, 3$) 個のパラメーターを入力し、 N 惑星系の運動方程式を数値的に解く。惑星系の運動方程式が解けると、その時の $5N$ 個のパラメーターに対応する t^{sim} が求まる。 t^{obs} と観測されたトランジット時刻の誤差 σ は図 1 のように与えられているので、 χ^2 が計算できる。 χ^2 は惑星 i ($i = 1, 2, 3$) の j 番目のトランジット時刻を $t_i(j)$ 、トランジット時刻の誤差を $\sigma_i(j)$ として、

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_j \left[\frac{t_i^{\text{obs}}(j) - t_i^{\text{sim}}(j)}{\sigma_i(j)} \right]^2 \quad (1)$$

で定義されるモデルパラメーターに依存した関数である。KOI-886 系の Best-fit パラメータはこの関数を最小化するものとして与えられる。今回、この χ^2 の最小化に LM 法を用いた。

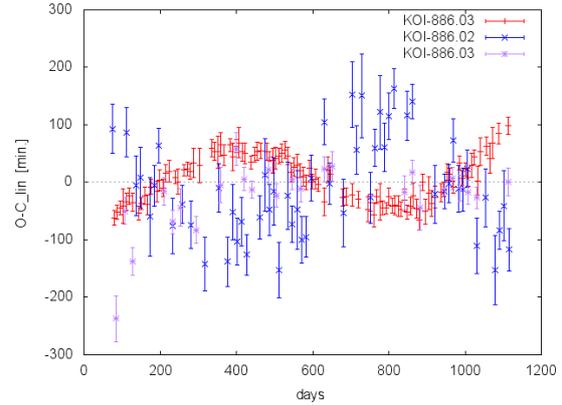


図 1: KOI-886.01, KOI-886.02, KOI-886.03 の t^{obs} (Mazeh, T., et al. 2013)。横軸は BJD-2454900[days]。縦軸 $O - C_{\text{lin}}$ は、 t^{obs} を線形フィッティングしたものと t^{obs} との差を表す。つまり、トランジットの一定周期からのずれである。

3 Results

上の方法で得たベストフィットパラメーターを表 1、表 2 に示す。 $5N$ 個のフィッティングパラメーターはそれぞれ惑星質量 (M_p)、軌道周期 (P : Period)、離心率 (e : eccentricity)、近点離角 (ω : longitude of periastron)、トランジット時刻 ($t_{c,0}^{\text{sim}}$) である。 P 、 e 、 ω といったこれらの軌道要素は基準時刻 BJD=245494 (運動方程式の時刻 $t = 0$) での各惑星の接触軌道要素を表す。また、 $t_{c,0}^{\text{sim}}$ は基準時刻から最も近いトランジット時刻である。

またこれらベストフィットパラメーターが与える TTV のベストフィットグラフを図 2~図 6 に示す。これらの図の上側は、 t^{obs} または t^{sim} と線形フィッティングとの差を表すグラフで、下側は t^{obs} と t^{sim} の残差 ($t^{\text{obs}} - t^{\text{sim}}$) のグラフになっている。

4 Conclusion and Discussion

まずは $N = 2$ のときについて述べる。表 1 より、KOI-886.01 と KOI-886.02 は共に惑星質量程度なので惑星と confirm できる。また、質量密度から、KOI-886.01 は主成分が岩石・水の地球型惑星と考えられ、KOI-886.02 はその密度から、鉄に富んだ核を持つ鉄

表 1: (上) $N = 2$ のときの、LM 法を用いて導いた Best-fit パラメーター。(下) 今回の TTV 解析で得た値と exoplanet archive の値から導かれるパラメーター。 R_p 、 ρ_p 、 a はそれぞれ惑星半径、平均密度、軌道長半径である。

	KOI-886.01	KOI-886.02
$M_p [M_\oplus]$	6.84	5.43
P [days]	8.009	12.077
$e \cos \omega$	0.27	0.23
$e \sin \omega$	-0.089	-0.091
$t_{c,0}^{\text{sim}}$ [days]	-2.135	1.536
$R_p [R_\oplus]$	2.09 ± 0.12	1.23 ± 0.08
$\rho_p [\text{g}/\text{cm}^3]$	4.13	16.1
a [AU]	0.063	0.083

表 2: (上) $N = 3$ のとき、LM 法を用いて導いた Best-fit パラメーター。(下) 今回の TTV 解析で得た値と exoplanet archive の値から導かれるパラメーター。単位は表 1 と同じ

	KOI-886.01	KOI-886.02	KOI-886.03
M_p	11.7	9.76	88.3
P	8.0126	12.07	21.00
$e \cos \omega$	0.078	0.072	0.085
$e \sin \omega$	-0.0032	-0.015	-0.026
$t_{c,0}^{\text{sim}}$	-2.1346	1.54	-4.788
R_p	2.09 ± 0.12	1.23 ± 0.08	1.73 ± 0.27
ρ_p	7.07	28.9	94.0
a	0.063	0.083	0.119

コア・岩石惑星と結論づけられる。ここで、二つの惑星のそれぞれの離心率に注目すると、KOI-886.01、KOI-886.02 の離心率はそれぞれ $e_{01} \sim 0.27, e_{02} \sim 0.23$ という比較的大きな値を持つことがわかる。この値と表 1 の軌道長半径を用いると、各惑星のおよその近点距離と遠点距離が計算できる。KOI-886.01 の遠点距離と KOI-886.02 の近点距離を概算すると、それぞれ 0.080[AU]、0.064[AU] となり KOI-886.01 の遠点距離が KOI-886.02 の近点距離を上回る。したがって、それぞれの惑星の軌道が互いに交わっている可能性が考えられる。しかし、それぞれの惑星

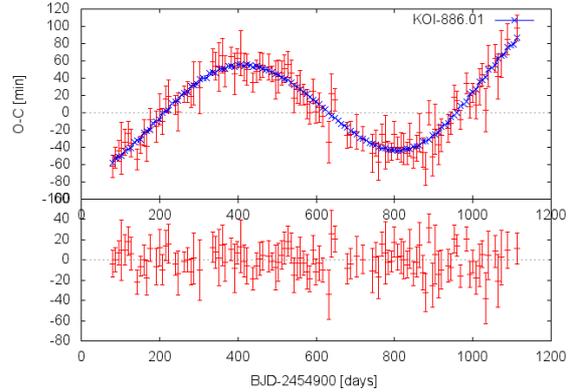


図 2: $N = 2$ のときの KOI-886.01 の TTV のベストフィット

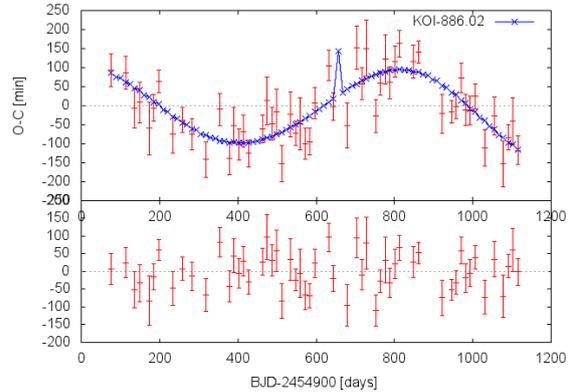


図 3: $N = 2$ のときの KOI-886.02 の TTV のベストフィット

の近点離角を表 1 から計算すると、 $\omega_{01} \sim -23^\circ$ 、 $\omega_{02} \sim -29^\circ$ となる。よって、実際はこれらの惑星軌道が交差しないことも十分に考えられる。これについての詳細の議論は今後の課題とする。次に $N = 3$ のときについて述べる。このときも各惑星は惑星質量程度であるので、惑星として confirm できる。表 2 から、KOI-886.01 は鉄・岩石惑星、KOI-886.02 はほとんど純粋な鉄でできた惑星、同じく KOI-886.03 もほとんど純粋な鉄でできた惑星と考えられる。しかし、表 2 の KOI-886.03 の質量と半径の関係については、現在見つかった系外惑星の中でも特異な値になっている (Howard, A.W. 2013)。したがって、KOI-886.03 の質量はまだ精査が必要である。推

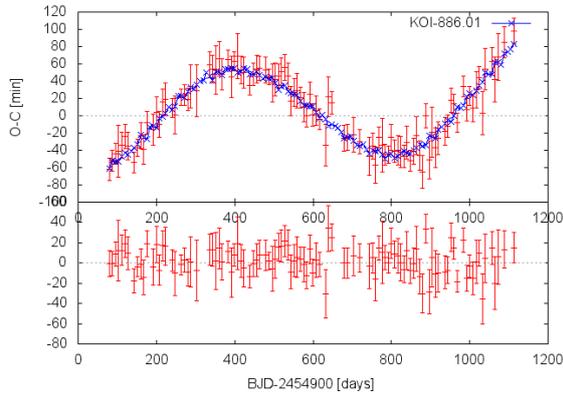


図 4: $N = 3$ のときの KOI-886.01 の TTV のベストフィット

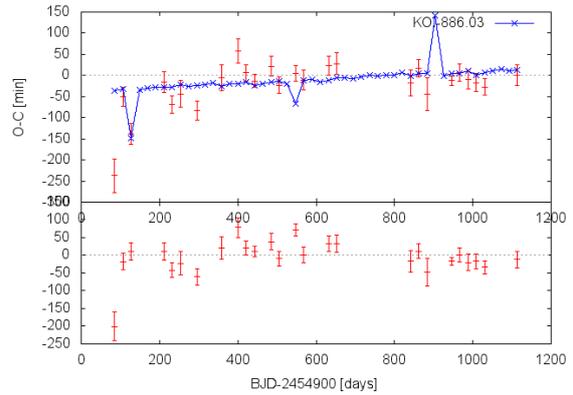


図 6: $N = 3$ のときの KOI-886.03 の TTV のベストフィット

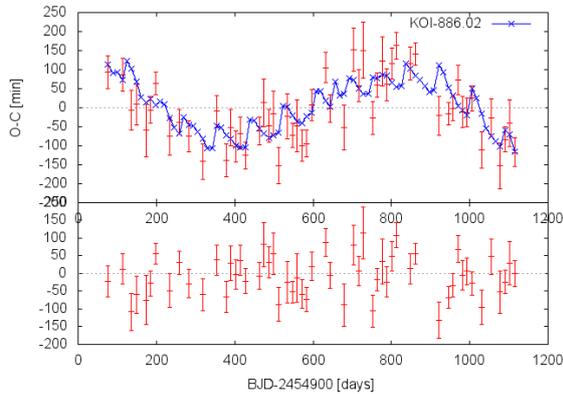


図 5: $N = 3$ のときの KOI-886.02 の TTV のベストフィット

定した質量の大きさと図 6 の残差が大きいため、系に他の惑星が存在する可能性も指摘できる。

また、今回は χ^2 の最小化する方法として LM 法を用いたが、LM 法で与えられた χ^2 の値は最小値ではなく極小値になっている場合もある。したがって、 χ^2 の最小値の探索は入力パラメータを変えて、複数回計算を繰り返さなければならないが、現時点でそれはまだ完了していない。今回、記載のベストフィットパラメータは暫定的なもので、今後変わる可能性が極めて高い。入力パラメータを変え繰り返し計算することで上のベストフィットパラメータの精査及びその誤差を決めることは今後の課題である。

Acknowledgement

この 4 ヶ月間を通し、本研究の指導にあたっていただいた東京大学理学系研究科宇宙理論研究室、増田賢人さん、千秋元さん、上赤翔也さんの 3 人の先輩方に深く御礼申し上げます。増田さんには、全期間にわたり懇切丁寧なご指導を賜り、相当量の貴重なお時間を割いていただきました。研究の方法だけではなく、文献の読み方などの今後研究していく者として必要と思われるスキルについても多く学ばせていただきました。千秋さん、上赤さんには毎週のセミナーでご指導をいただき、数値計算の初心者の方の私に対し、的確で汎用性の高いご助言を多くいただきました。また、アブストラクトはじめとした文章の添削など多くの時間を私のために割いていただきました。改めて、深く御礼申し上げます。

Reference

- Borucki, W.J., et al., Science 327, 977 (2010)
- Holman, M.J., et al., Science 330, 51 (2010)
- Steffen, J.H., et al., MNRAS 428, 1077 (2013)
- Marquardt, D.W., J. Soc. Ind. Appl. Math., vol 11, pp. 431-441.
- Mazeh, T., et al., Astrophysical J. Supplement Series 208:16, (2013)
- Howard, A.W., Science 340, 572 (2013)