修士論文

ケプラー衛星データの系統的解析による長周 期木星型惑星の発見

上原翔

指導教官: 石崎欣尚

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻

2016年1月

目次

第1章	序論	3
1.1	太陽系外惑星探査の歴史と長周期惑星	3
	1.1.1 高精度位置観測法 (アストロメトリ法)	6
	1.1.2 視線速度法	6
	1.1.3 トランジット法	8
1.2	ケプラー衛星	11
	1.2.1 軌道	11
	1.2.2 姿勢制御	12
	1.2.3 望遠鏡	12
	1.2.4 焦点面アレイ	
	1.2.5 時刻系	14
	1.2.6 検出されたイベントの分類	
1.3	ケプラーデータに埋もれた長周期惑星の発見	17
第 2 章 2.1 2.2	シングルトランジットの同定と軌道周期の推定シングルトランジットの視覚的探索シングルトランジットのパラメータ推定2.2.1 原理2.2.2 データセットの作成2.2.3 MCMC によるトランジットのモデルフィット	19 19 20
第3章	シングルトランジットの分類と各系の解説	2 5
3.1	長周期惑星と思われるシングルトランジット	25
3.2	エキセントリックプラネット候補	40
3.3	その他に発見された興味深い減光	43
第4章	discussion	49
4.1	内側の惑星と LPG の間に位置する惑星の観測的欠乏	
4.2	コンパクトマルチ系における LPG の存在頻度	
4.3	惑星1個の系と多重惑星系の違い	51

abstract

2016年1月現在、太陽系外惑星の発見数は2000個を超え、惑星検出を試みながら失敗続きであった20年前からは想像もできない進展をみている。惑星系の姿も太陽系と瓜二つの系から、彗星のような楕円軌道の惑星、水星軌道よりも内側に5個も惑星が密集する系など非常に多様であることがわかってきた。

惑星検出方法のうち、恒星の前を惑星が通過して影になる現象を観測するトランジット法は、0.1%程度の減光を検出できればよいのでアマチュアでも容易に惑星の検出が可能である。その反面、確率の低い事象を観測する制約から、多数の恒星を同時に見張る必要があり、それが太陽系外惑星発見の黎明期において、当時有力な手法だった視線速度法などと比較して大きな障害となっていた。しかし、2009年3月のケプラー衛星の打ち上げを境に、状況は大きく好転した。ケプラー衛星は主鏡の口径が1.4 m であり、地球や太陽が観測に及ぼす影響を避けるために、太陽を中心として地球の後を追いかける太陽周回軌道に投入されている。観測領域ははくちょう座のごく狭い一角で、一度に10万個の恒星を観測することができる。これにより惑星発見数は1005個と全体の半数を占めるまでに至った。

私は、ケプラー衛星の時系列測光観測データの中に、未確認の木星サイズの惑星候補天体に よるものと考えられる減光 (single transit) があることを発見した。そこで、ケプラーチームが 真贋問わず惑星候補を1個以上持っていると認定した Kepler Objects of Interest (KOI) に載っ ている天体 7557 個全ての天体のライトカーブに対し視覚的探索を行ったところ、合計 28 個の single transiting events (STEs) が存在することを確認した。通常、トランジットが1回しか観 測できない場合は公転周期を求めることは困難である。私は、既知惑星が1個以上ある場合に は、それらのパラメータを用いることで未知惑星の公転周期を推定可能であることを理論的に 示した。次に、全ての惑星が既知の多重惑星系のうち、STEと同程度の継続時間と深さのトラ ンジットを起こす惑星を含む系について、敢えて公転周期を未知であると仮定して同時フィット を行い、公転周期推定手法が妥当であることを確認した。既知惑星が1個以上ある場合はSTE との同時フィットを、既知惑星無しの場合は主星の密度を与えてフィッティングを行った結果、 7個が海王星サイズから木星サイズの長周期の惑星であり、周期は数年から20年であると見積 もることができた。また STE と内側の惑星との中間付近の公転周期の惑星が欠乏しているよ うに思われたが、シミュレーションの結果、これは観測バイアスに起因するものであることが 判った。さらに、695個の多重惑星系から長周期惑星が5個見つかった事実から、惑星間の相 対的な軌道傾斜角が小さいと仮定したときに、3 AU 以遠のガス惑星は 20%以上の確率で存在 していることが判った。このように本研究では、これまで未解明であった長周期の系外惑星を 少なくとも7個同定し、太陽系と類似した惑星系の形成や構造についての新たな知見を得るこ とができた。

第1章 序論

1.1 太陽系外惑星探査の歴史と長周期惑星

今日、太陽系外惑星は2000個以上が発見され、またその検出手法も多様化・高精度化し、当初は発見の難しかった太陽系の木星と類似した惑星の発見も少しずつ増えている。表 1.1 に各検出手法の特徴を示す。主星から離れた位置の木星型惑星の存在は、太陽系と同タイプの惑星系、すなわち内側を岩石を主成分とする地球型惑星が周回している系である可能性を示唆する。このような惑星系の探索は、私達と同じタイプの生命体が他の星の周りの惑星にどれだけ存在し得るのか、私達はどのようにして生まれたのかという根源的な問いに対する手がかりとして非常に意義がある。

私達と同じような生命が惑星系内において生存可能な領域、特に惑星表面に海洋を永続的に維持可能な領域を永続的ハビタブルゾーン (CHZ) と呼ぶ。CHZ の範囲は、惑星表面の温度、すなわち惑星が受け取る中心星放射の量により決まる。惑星の反射率や大気組成、大気圧が地球と同じであると仮定すると、CHZ と中心星の距離 d_{*} の古典的な定義は以下の式で与えられる。

$$d_* = \sqrt{\frac{L_*}{L_\odot}} \tag{1.1}$$

 L_* , L_\odot はそれぞれ恒星、太陽のボロメトリック光度である。太陽の周りの地球のような惑星の場合、CHZ の範囲は 0.95 - 1.37 AU の範囲となる (\ref{CHZ}) 。図 1.1 は CHZ 内に入っている可能性の高い太陽系外惑星の例である。しかし、これらの惑星が地球に似た環境にあるとは、必ずしも言えない要素がある。Gliese 667C, Gliese 581, HD40307 は全て 0.7 AU と、太陽系でいえば金星ま軌道よりも内側にスーパーアースサイズから海王星サイズの惑星がいくつもひしめき合っている惑星系であり、私達の太陽系とはまた異なる姿をしている。その形成過程には惑星の移動が大きく関わっているとされるが (ref...)、主星から離れた位置の木星型惑星がなぜ存在しないのかなど、依然としてよく分からない点も多い。このように、CHZ に入っている惑星は発見されつつあるものの、内側に地球型惑星、数 AU 辺りに木星型惑星という配置の古典的な描像の惑星系を探すという目標は未だ大きな地位を占めていると云える。

代表的な太陽系外惑星の検出方法は、アストロメトリ法、視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法、直接撮像、パルサータイミング法である。表 1.1 に各検出方法の大まかな特徴を示す。ここで太陽系に類似した惑星系を探すにあたり

- 1 AU 付近の地球サイズからスーパーアースサイズの惑星の探索
- 数 AU 付近の木星型惑星の探索

という2つのアプローチを挙げる。前者は短周期惑星の発見が得意な視線速度法やトランジット法が成果を出しつつある。では後者はどうか。アストロメトリ法は、未だ多くの惑星を検出する精度には至っていない。重力マイクロレンズ法により検出された惑星は報告が増えてきた

4 第 1. 序論

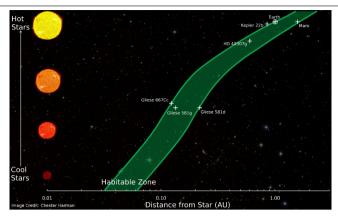


図 1.1: ハビタブル惑星の例。縦軸は中心星の質量 (M_{\odot}) 、横軸は軌道長半径 (AU) で、どちらも対数目盛りである。一番上の恒星が太陽で、比較として地球と火星を右上にプロットしてある。2013 年 11 月時点で、Kasting 1993 とはまた異なる CHZ の範囲の見積もりが使われている (太陽の周りにおいて内側と外側の境界がそれぞれ 0.99 AU, 1.67 AU、緑の領域、Kopparapu 2013)。Gliese 667Cc, Gliese 581d, g, HD 40307g, Kepler-22b はハビタブルゾーンに入っている可能性が高いと言われている。http://www.space.com/19522-alien-planet-habitable-zone-definition.html

が、ある恒星と惑星を持つ恒星が重力レンズ効果による増光を起こすような位置関係になる確率の比較的高い銀河系中心方向の非常に遠くの恒星の惑星しか見つかっておらず、追観測は事実上困難である。パルサータイミング法はパルサーの周囲の惑星を発見する手法であるが、超新星爆発に惑星が耐えられるかどうかについては判っておらず、現在見つかっている惑星についても超新星後に後天的に形成された惑星であろうと考えられているため (ref...)、古典的な所謂惑星とは厳密には少々定義を異にする。直接撮像では、主星のマスク技術の進歩や、特に地上観測の場合は補償光学系の進化により、さらなる惑星の発見が期待されている (e.g. Hagelberg 2010; Salter et al. 2014)数十 AUが、数 AU 付近の木星型惑星についてはこれからであろう。

	感度	惑星発見数
アストロメトリ法	長周期・大質量の惑星	1
視線速度法	短周期・大質量の惑星	630
トランジット法	短周期・主星に対し断面積比の大きい惑星	1279
重力マイクロレンズ法	アインシュタインリング付近 (~ 2.5 AU) の離角の惑星	43
直接撮像	年齢が若く高温で大質量であり、離角の大きい惑星	64
パルサータイミング法	長周期・大質量の惑星	23

表 1.1: 各手法の特徴まとめ

残る視線速度法とトランジット法はどちらも短周期の惑星に感度があり、一見木星アナログの検出には不向きであるように思われる。しかし、長期間の観測により、徐々に長周期惑星も発見され始めている。視線速度法の精度は 1ms^{-1} と、地球による太陽のふらつきを検出できるところにまで達し、木星アナログに手が届きつつある (e.g. Boisse et al. 2012; Marmier et al. 2013; Bedell et al. 2015)。

状況はトランジット法についても同様であるが、視線速度法には無い利点として、以下の 2 点を挙げることができる。

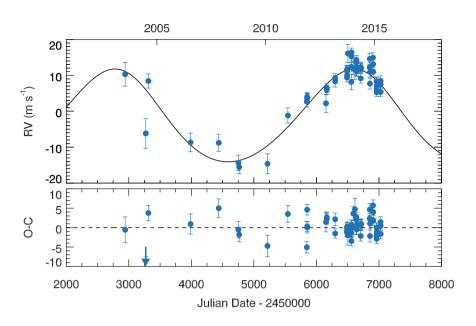


図 1.2: 視線速度法で発見された HIP11915b。質量の下限値 0.99M_iで、公転周期は 3830 日。

- あくまで断面積の大きい惑星に感度があるのであり、惑星半径が大きい必要は無い。
- トランジットの検出さえできれば (主星に対し惑星半径が大きければ)、公転周期によらず検出は可能である。

言わば、数を打てば地球アナログも木星アナログも検出可能なのである。そのためには多数の恒星を同時に長期間見張り続け、トランジットの検出確率を上げる必要があるが、他の手法よりも導入が簡単であることから、アマチュア天文家を含め世界中で観測が行われている。後述のケプラー衛星の観測も併せ、太陽系に類似した惑星系の発見の素地は整っていると云える。そこで、私は長周期の木星型惑星の発見手法としてトランジット法を選択した。以下では、太陽系外惑星の発見の歴史と、歴史的に使われてきたアストロメトリ法 (1.1.1 節)、視線速度法 (1.1.2 節)、トランジット法 (1.1.3 節) について概説する。また、2009 年の打ち上げから 1000 個以上のトランジット惑星を発見しており、私が惑星の検出にそのデータを用いたケプラー衛星についても (1.2 節) 今日のように 2000 個を超す太陽系外惑星を発見できるようになるまでの道のりは、決して平坦なものではなかった。

16世紀、ジョルダーノ・ブルーノは太陽以外の星の周りの惑星系の存在を初めて提唱した。 当時は地動説が出てきたばかりで未だ天動説が主流であり、地動説をもとにした彼の説は異端 との誹りを受けることとなった。人類が太陽系外惑星の存在を常識と考えるようになったのは、 17世紀にケプラーの法則が発見されてからさらに後、20世紀になってからであった。

1.1.1 高精度位置観測法 (アストロメトリ法)

太陽系外惑星の探索はアストロメトリ法から始まった。主星の周りを惑星が公転していると、主星も同じ周期でわずかにふらつく。このふらつきを天球面上での動きとして捉えるのがアストロメトリ法である。質量 m_* の主星の周りを質量 m_p の惑星が距離 a だけ離れて公転しているとき、距離 d においてアストロメトリ法により観測されるシグナルの大きさ θ は

$$\theta = \frac{m_p}{m_*} \frac{a}{d} = \left(\frac{G}{4\pi^2}\right)^{1/3} \frac{m_p}{m_*^{2/3}} \frac{P^{2/3}}{d}$$

$$= 3[\mu as] \frac{m_p}{m_{\oplus}} \left(\frac{m_*}{m_{\odot}}\right)^{-2/3} \left(\frac{P}{yr}\right)^{2/3} \left(\frac{d}{pc}\right)^{-1}$$
(1.2)

で与えられる。式 (1.2) から、質量の大きく公転周期の長い惑星の検出が容易であることがわかる。当時ホットジュピターのように主星に近接した木星型惑星の存在は知られておらず、惑星系は太陽系と同様に地球型惑星が系の内側に密集し、外側に木星型惑星が配置しているであろうという先入観があった。また、アストロメトリ法は不可視伴星の検出実績 (シリウス B など)が既にあったのに対し、同様に主星のふらつきから惑星の検出を行う視線速度法 (後述) は主星のごく近傍の伴星の方が検出し易いことから、アストロメトリ法の選択は最も主星をふらつかせるであろう太陽系の木星と類似した惑星を探すという目的に適っているといえた。1960 年代には、バーナード星に周期 24 年、木星の半分の質量を持つ惑星の存在が報告された。しかし、当時アストロメトリ法の精度は悪く、10pc離れた位置から太陽を観測した時の木星に起因するふらつき $(\sim 0.5[mas])$ さえ捉えることはできなかった。バーナード星の惑星と思われたシグナルも望遠鏡の誤差であると片付けられてしまい、今日に至るまで長らく日の目を見ることは無かった (注釈で VB10 の話?)。

アストロメトリ法の長所としては、上述の通り長周期惑星に感度がある点、位置観測のみを 行うため主星の種類を問わない点が挙げられる。さらに、惑星の軌道面の傾きに依らないため、 惑星の真の質量を決定することができる点は他の手法には無い利点である。視線速度法では短 周期の惑星が発見し易く、また主星が明るくなければ高精度の観測が困難となるなど、アスト ロメトリ法は視線速度法と相補的な関係にあるといえる。将来の更なる位置観測精度向上に加 え、地球大気の揺らぎの影響を受けない宇宙空間からの観測により、視線速度法やトランジッ ト法での発見が難しい長周期惑星の発見が期待される。

1.1.2 視線速度法

視線速度法は、アストロメトリ法とは異なり主星のふらつきの観測者から見た視線方向成分を観測し、間接的に惑星の存在を推定する手法である。質量 m_p 、離心率eの惑星を持つ質量

 m_* の恒星の視線速度の平均値 K は次のように書くことができる。

$$K = \frac{28.4329[ms^{-1}]}{\sqrt{1 - e^2}} \frac{m_p \sin i}{m_j} \left(\frac{m_* + m_p}{m_\odot}\right)^{-2/3} \left(\frac{P}{yr}\right)^{-1/3}$$
(1.3)

主星が観測者に対し近づく場合、ドップラー効果により主星の光の波長が短い方にずれ、逆に観測者から遠ざかる場合は波長が長い方にずれる。一方、barycentric 系においてドップラー効果により元の波長 λ_0 から変化した値の平均値を λ_B とすると、光速を c として主星の視線速度の平均値は

$$K = c \frac{\lambda_B - \lambda_0}{\lambda_0} \tag{1.4}$$

$$\lambda_B = \lambda_{obs} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_{obs} \right) [ms^{-1}]$$
 (1.5)

となる。連星系の場合は相対論的効果を無視できないが、惑星による主星のふらつきは小さいものとして非相対論的取り扱いを行っている。式 (1.3), (1.4), (1.5) より、主星の視線速度の観測から惑星の質量を、視線速度の時系列変化の形状から離心率を、変動周期から公転周期を求めることができる。また、式 (1.3) から惑星の質量が大きいほど、公転周期が短いほど検出が容易であることがわかる。ただし我々が観測しているのは主星のふらつきを我々の視線方向に射影した成分なので、実際に得られる観測量は $m_p \sin i$ であり、惑星質量の下限値のみが判ることに注意を要する (注釈で統計的には真の質量は観測地の 1.5 倍程度としてよいことが、最近の観測から明らかになっている?と書く?)。

主星の光のドップラー変位は、高分散分光して得られるスペクトル線の位置の変化として測定される。仮に太陽系の木星を視線速度法で検出しようとすると、木星が太陽を揺らすときの速度の振幅は12.4ms⁻¹であり、可視域(550nm)の波長変化にして2.0×10⁻⁴nmに相当し、この微小なスペクトル線の移動を測定しなければならないが、通常の分光観測では分光器の微小な温度変化や伸縮により測定精度は数100ms⁻¹となってしまい、木星の検出はできなくなってしまう。そこで、吸収線の位置がよく判っているガスを封入したガス吸収セルに恒星の光を通して分光するという手法が用いられる。こうすることで、恒星のスペクトルにガスの吸収線が分光器の状態をも反映した時々刻々の物差しとして重なり、機器的な誤差を除いた分光観測を行うことができる。現在広く用いられているヨウ素ガスは500-620nmに無数の細い吸収線を持ち、太陽型星の可視光観測に適している。

1980年代までにはこの手法により視線速度法の精度は 10ms⁻¹ までに向上し、木星アナログの検出は秒読みかと思われた。しかしながら、ここでも"木星アナログ"の検出という目的が仇となり、足下に転がっていたより短周期の木星型惑星という当時としては考えられないような惑星の発見はできなかった。また、カナダのチームは上述のガスセル法を用いた視線速度法で12年間かけて 21 個の恒星を観測し惑星の存在を否定するという結論に至ったが、現在の惑星検出確率 5%を考えると、当時は観測天体の少なさや不運も重なって見逃しの連続となってしまった面も否めない。

1995年10月、スイスの Michel Mayor と Didier Queloz のチームはペガサス座 51 番星に公転 周期 4日、木星の半分の質量を持つ惑星を視線速度法により発見した [10]。この惑星が主星を 揺らす速度の振幅は 70ms⁻¹ であり、十分に検出が可能であった。これを契機に先入観が崩壊し、見逃され続けてきた短周期惑星の発見ラッシュが始まるとともに、惑星の移動を含めた惑星系の形成理論の大幅な見直しが為された (注釈: PSR B1257+12 の惑星は 1992 年発見であることを併記)。

1.1.3 トランジット法

一方でこの数年で大きく台頭したのが、恒星の前面を惑星が通過し影になる様子を捉えることで惑星の検出を行うトランジット法である。トランジットの幾何学的構造を図 1.3 に示す。

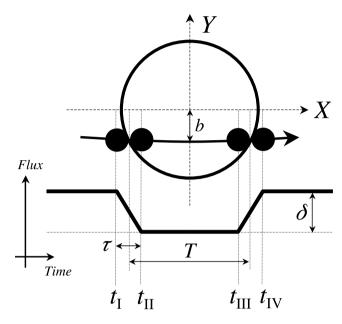


図 1.3: トランジットの幾何学的構造

トランジット法では、惑星の通過に伴う減光が大きければ大きい程検出が容易になる。惑星からの放射は一定であるとし、トランジットをトラペゾイドで近似すると、トランジット時の減光の深さδは

$$\delta \approx k^2 \left[1 - \frac{I_p(t_0)}{I_*} \right] \tag{1.6}$$

$$k = \frac{R_p}{R} \tag{1.7}$$

 I_* , I_p はそれぞれ主星及び惑星の放射、 t_0 はトランジット中心時刻を表す。 $I_p \ll I_*$ と近似すると

$$\delta \approx k^2 \tag{1.8}$$

と記述することができる。式 (1.8) より、惑星が主星と比較して相対的に大きければ δ が大きくなることがわかる。

inpact parameter b は、観測者から見て主星面に惑星を投影したときの、主星中心からの惑星中心の距離を主星の半径 R_* で規格化したものである。

$$b = \frac{a}{R_*} \cos i \tag{1.9}$$

i は軌道傾斜角であり、観測者の視線方向と軌道面が垂直な位置関係のときを $i=0\deg$ とし、そこからのずれを計量する。

惑星の縁が主星面内に少しでも入ればトランジットは必ず起きる。従って、トランジットが起きる条件は |b| < 1 + k となり、トランジットが起きる確率 $p_t ra$ は

$$p_{tra} = \left(\frac{R_* \pm R_p}{a}\right) \left(\frac{1 + e\sin\omega}{1 - e^2}\right) \tag{1.10}$$

と書ける。 R_* , R_p はそれぞれ主星及び惑星の半径、a は軌道長半径、e は離心率、 ω は近点の位相である。また、"-"は通常のトランジット、"+"は主星の縁をかすめるように通過する grazing transit を指す。 $R_p \ll R_*$ 、e=0 と近似すると

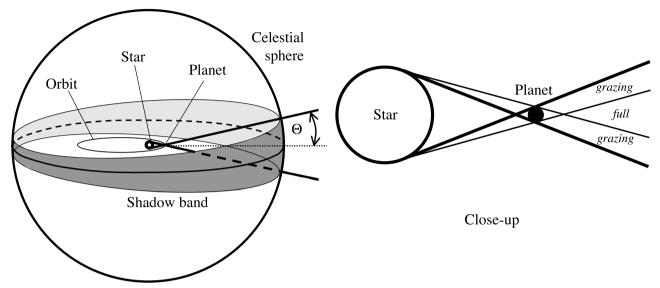


図 1.4: トランジットが観測できる領域

$$p_{tra} = \frac{R_*}{a} \tag{1.11}$$

と記述できる。 ω で marginalize すると、

$$p_{tra} = \left(\frac{R_* \pm R_p}{a}\right) \left(\frac{1}{1 - e^2}\right) \tag{1.12}$$

ここで、ある半径の主星の周りのある軌道半径にある惑星を検出することを考える。そのような惑星が割合 η で存在しているとき、トランジットを見つけるためには観測者は最低でも $N \approx (\eta p_{tra})^{-1}$ 個の恒星をサーベイする必要がある。例えば $1 \mathrm{AU}$ の位置にある太陽型星周りの惑星の場合、 $200\eta^{-1}$ 個以上の恒星を見張ることになる。 $0.05 \mathrm{AU}$ と非常に近接した惑星が 1% の確率で存在しているときは、1000 個に 1 個の割合でトランジットが観測できるだろう。

トランジット法で惑星を探索するとき、既に惑星が存在することが判っている系でトランジットが起きるかどうか確認するか、或は非常に多くの恒星をサーベイして惑星のトランジットを探すかの2通りの方針が考えられる。歴史的にトランジット法は視線速度法の後を追う形で発展したため、まずは前者の方針でトランジット惑星の探索が行われた。最初の探索では64個の既知の系に6個のトランジット惑星が発見された(Charbonneau2000; Henry2000; Mazeh2000、check bib.)。このときトランジットを起こす確率は式(1.10)で与えられる。

次に、サーベイによりトランジット惑星を検出するときのシグナルの要求水準を考えてみる。 先ほど議論したように、0.05AU の位置の惑星のトランジットを検出するためには太陽型星を 1000 個以上サーベイする必要がある。観測的には、1% の減光を捉えること、さらに 3 日 ($\sim P$) 以上の継続的観測が要請される。理想的な条件の近傍の恒星の観測に際しての制限が光子揺らぎ のみであるとき、トランジットに対する感度は $R_n^6/P^{5/3}$ で与えられる (Gaudi2005, check bib)。

このように、測光観測は視線速度法と併せた探索と比較して効率が悪い。しかしながら、視線速度法には大きな望遠鏡や複雑な分光装置が要求されるのに対し、測光観測は口径 10cm の

10 第 1. 序論

望遠鏡さえあれば十分に 1% の減光を検出し得るという手軽さが利点である。従って、多くの 天文学者がこぞって測光観測に注力し、10 を超すサーベイが行われた。

毎月10個から100個のホットジュピターが発見されるとの予想もあったが、2つの障害が立ち ふさがり、惑星発見数のボトルネックとなった。その1つは高頻度で見つかる食連星であった。 連星の相互食が直接受かるものや、不可視伴星の明るさにより本来非常に深いはずの連星による減光が過小評価される系などがあり、特に後者は減光が惑星サイズにまでなると惑星との判別が困難を極めた。あるサーベイではこれら"false positive"の数が惑星候補の10倍に上った。もう1つの障害は相関ノイズである。多くのライトカーブが都合良くきれいなはずもなく、こぶやくぼみ、脈動などがトランジットの検出の邪魔となる。これらはCCDの感度ムラや、恒星表面の活動など多様な原因により表れる。これらの障害をうまく克服できたのは少数のチームだったが、OGLE チームは口径1mの望遠鏡で14-16等級の恒星を、TrES, XO, HAT, SuperWASPの各チームは口径0.1mの望遠鏡で10-12等級の恒星をそれぞれサーベイし、多数のトランジット惑星を発見した。

以上の問題をうまく排除してなお、地上からの観測である限りは地球大気の揺らぎや昼夜サイクル、天候の影響からは逃れることはできない。そこで打ち上げられたのが CoRoT とケプラー衛星である。1.2 節ではケプラー衛星について詳説する。

1.2. ケプラー衛星 11

1.2 ケプラー衛星

ケプラー衛星は、トランジット法により銀河系内において地球サイズの惑星やハビタブルゾーンに位置する惑星の探索を目的として 2009 年 3 月 6 日に打ち上げられた、1.4m の反射鏡と 0.95m のレンズを持つシュミット式の反射屈折望遠鏡である。シュミット式望遠鏡としてはこれまでに作られた中で 9 番目の大きさであり、地球周回軌道の外側に投入されたものとしては最大である。当初のミッション期間は 3.5-6 年を想定していた。



図 1.5: ケプラー衛星の観測の想像図

観測軌道	Earth-trailing heliocentric
公転周期	371 日
外形寸法	高さ 4.7m
衛星質量	1052.4kg
発生電力	1100W
打ち上げ	2009年3月5日10時48分(EST)
ミッション期間	3.5 - 6年

表 1.2: ケプラー衛星の概要

1.2.1 軌道

ケプラー衛星の軌道は太陽を中心としており、周期 371 日で地球を追いかけるように運動している (図 1.7)。この軌道において衛星はゆっくりと地球から遠ざかり、3.5 年が経過した時点で地球からの距離は 0.5AU となる。この軌道のメリットは、非常に安定してある一方向を向か

12 第 1. 序論

*** *********************************	
口径	2.7 m
視野面積	$105 \mathrm{deg^2}$
CCD 枚数	42 array
CCDサイズ	$59 \times 28 \text{ mm}$
ピクセル数	2200×1024
観測帯域 (FWHM)	435 to 845 nm
暴露時間	6.019802903 sec
読み出し時間	0.5189485261 sec

表 13. ケプラー衛星の基本仕様

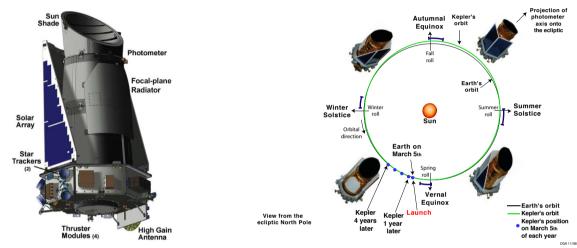


図 1.6: ケプラー衛星外観 図 1.7: ケプラー衛星の軌道 せ続けることができること、また、地球のヴァンアレン帯の放射線から衛星を守れることであ り、対してデメリットは、随時太陽フレアの影響を受け得る点を挙げられる。

1.2.2 姿勢制御

高精度な測光観測を行うためには、精密な姿勢制御が要求される。姿勢制御は3軸のリアクションホイールにより行われる。4個のホイールが存在したが、そのうち2個が2013年8月までに故障してしまい、従来の姿勢制御が困難になったため、メインミッションは終了した(注釈: 2014年8月からは太陽光圧を姿勢制御に取り入れた K2 ミッションが開始)。

1.2.3 望遠鏡

ケプラーは天体望遠鏡としては非常に広い、100 deg²以上の視野を持つ。光学系は古典的なシュミット式望遠鏡の構造をもとに設計されており、口径 0.95m の石英ガラス製のシュミット式集光面、従来と比べて 85% も軽量化された直径 1.4m の主鏡が採用されている。また、主鏡はハニカム構造となっている。鏡の表面は銀でコーティングされている。これにより、恒星からの入射光のうち 95%の焦点面の直径およそ 7 ピクセル分の領域内への集光を実現している。さらにフォーカスを良くするため、主鏡の各セルの傾斜角度の調節をピストンを用いて行っている。ただしこの調整機構には電力が必要とされるため、持続的な電源が確保できない場合は

1.2. ケプラー衛星

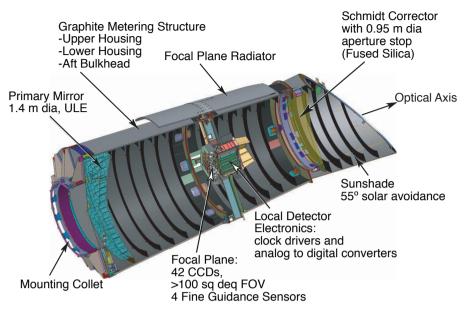


図 1.8: ケプラー衛星の構造

主鏡のポジションを固定する仕様となっている。精密測光を実現するため、望遠鏡開口部には太陽光の遮蔽板が配置されている(図 1.8)。



図 1.9: 衛星搭載前の 1.4m ミラー。クリーンルームにて。

1.2.4 焦点面アレイ

測光器の心臓部を為すのが焦点面アレイであり、CCD、サファイア製の焦点面平滑化レンズ、インバー基盤、ヒートパイプ、ラジエータで構成されている。各CCD素子のサイズは $59 \times 28 \text{mm}$ であり、ピクセル数は 2200×1024 である。CCDは薄型・裏面照射型であり、反射防止剤が塗布されている。出力は各素子にそれぞれ2 チャンネルずつあり、合計で84 チャンネルである。

14 第 1. 序論

また、このアレイはケプラーが観測を行う領域の状態に対応して、 $m_v=6$ よりも明るい恒星は CCD モジュールの間隙に入るようになっている (図 1.11)。焦点面平滑化レンズが 2 素子のペアを覆っている。ケプラーの光学系は測光精度向上のため、個々の CCD 素子の範囲内で敢えて恒星からの光が数ピクセルの領域に分散するよう設計されており、その代わり 1 ピクセル内での応答の変動やジッターの検出については感度が悪い。



図 1.10: 衛星搭載前の CCD アレイ。

焦点面はヒートパイプを通じてラジエータに排熱することにより-85度に冷却されている。ピクセルのサチュレーションを防ぐため、測光データは6秒毎に読み出され、インバー基盤に蓄積される。このとき、1つのターゲット天体につき平均32 pixel が読み出しに用いられる。インバー基盤では1分(short cadence)、または30分(long cadence)のいずれかの時間だけ測光データの積分を行われる。

1.2.5 時刻系

時系列測光観測を行う上で重要なデータの時刻付けは、次のようにして行われている。まず、30分、或は1分ごとに積分された測光観測データの読み出しが行われ、そのときの時刻が Vehicle Time Code (VTC) として記録される。タイムスタンプは最後の pixel の最後のフレームの最後の time slice の読み出しを終えて 4ms 以内に生成される。

地球にダウンロードされると、VTC は UTC に変換され、テレメトリ解析により時刻の飛びや衛星の時刻系のずれを修正される。さらに、衛星の太陽周回運動を差し引くため、時刻は UTC から Barycentric Dynamical Time (TDB) を経て BJD に変換される。得られた時刻から、2400000.0 (light curve files) または BJD-2454833.0 (target pixel files) のオフセットを差し引き、観測開始からの経過時刻として利用する。

1.2. ケプラー衛星 15

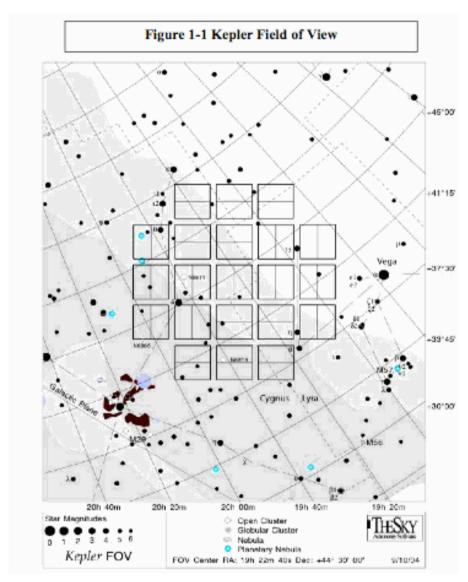


図 1.11: ケプラーの観測領域。中心座標は $l=76.32^\circ$, $b=+13.5^\circ$ (RA=19h 22m 40s, Dec=+44 $^\circ$ 30' 00'。黒の円が 6 等星以上の明るい恒星を示す。 4 等以上の恒星はケプラーフィールドから外れるようになっている。

16 第 1. 序論

時刻付の精度はどのbinningについても50ms以下である。この精度水準は、観測を想定している物理現象のイベントのSNRが大きい時、そこから得られる情報は飛翔体の構造よりもむしろイベントの時間構造により制限されることから設定されている。従って、あるイベントに対し1分未満の時間構造を把握したい場合は時刻の取り扱いを変えなければならない。

1.2.6 検出されたイベントの分類

ケプラーにより検出されたトランジットライクなイベントは、"CANDIDATE"または"FALSE POSITIVE"の2種類に分類される。CANDIDATEに分類されたイベントは惑星である可能性が高い。一方 FALSE POSITIVEは、減光の形が一般的なトランジットからずれてる、フィット結果が惑星と判断するには苦しい、外部からのコンタミネーションであるなど様々な要因により分類される。図1.12にイベント分類のフローチャートを示す。図の1,2,3はそれぞれおよそ前述の判断基準に対応する。

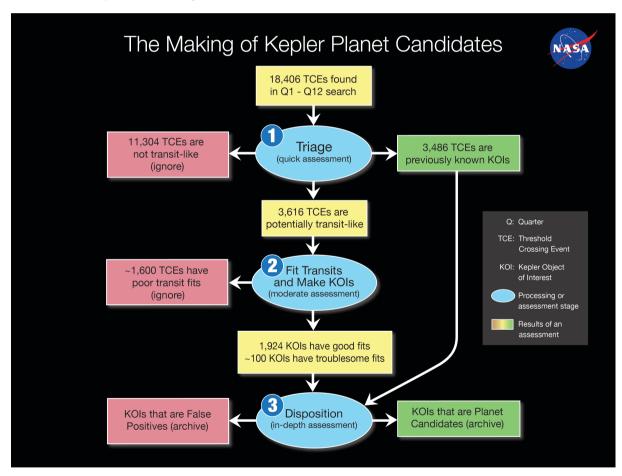


図 1.12: 検出されたイベントの分類フローチャート。ピンクの部分で FALSE POSITIVE に、最後の緑の部分で CANDIDATE に分類されている。

1.3 ケプラーデータに埋もれた長周期惑星の発見

初の太陽系外惑星発見から約20年が経過し、1000個を超える惑星がトランジット法により発見されている。これにより中心星付近に密集したコンパクトな多重惑星系の研究から軌道共鳴や軌道傾斜角の統計的性質についての詳細な情報が得られている([7], [2], [21])。一方で、トランジット法によりLPGsを発見することにより中心星から離れた位置、特に木星型惑星が形成されると考えられている、水を代表とする揮発性物質が凝縮して惑星の材料となる数AU以遠での惑星系の構造に関する重要な情報を得ることができる。仮にLPGsをトランジット法により発見することができれば、惑星系の内側の構造についての更なる情報と、惑星の大気を透過してくる光からLPGsの大気成分についての情報を得ることができる。これは太陽系の木星(ref)や土星([1])の観測から実証されており、メタンのような大気分子由来の特徴を示すと考えられている。

LPGs によるトランジットを検出できる確率は $\sim 0.1\%$ と小さく、10 年分以上の視線速度観測のデータが溜まっている数少ない恒星のなかから LPGs によるトランジットを探すのは非現実的である。ケプラー衛星をもってしても、LPGs の典型的な公転周期が衛星のミッション期間を超えている以上、従来のような周期解析では LPGs のトランジットを検出するのは容易ではない。しかし、たまたま約4年間の観測期間中に1回だけトランジット (single transit events, STEs) が起きていたにもかかわらず、私はケプラーチームの pipeline に漏れていた例を発見した。次章では、STEs の探索と同定について述べる。

第2章 シングルトランジットの同定と軌道 周期の推定

2.1 シングルトランジットの視覚的探索

私はケプラー衛星の時系列測光観測データのうち PDC(Pre-search Data Conditioning) データを用いた。これは、PDC データはある程度機器由来のノイズに対してスムージングが為されており、スムージング無しの Simple Aperture Photometry(SAP) と比較して全般にライトカーブが見やすいからである。解析天体は 2015 年 6 月 4 日現在の全 KOI(Kepler Object of Interest) 天体 7557 個を対象とし、全ての観測期間 (Q0-17)・long cadence/short cadence の双方について解析を行った。

探索にあたり、既知の惑星候補の transit と single transit を区別するため、既知惑星の transit 位置をマスクした PDC のライトカーブを作成した。これを全天体について視覚的に確認し、未知のトランジットが起きているかどうか、既知惑星についても transit が 2 回以上起きているかどうかを確認した。

見つかったイベントについて SAP のライトカーブを作成して視覚的に確認を行った。これは、PDC では減光があるものの SAP では存在しないという例が多数発見されたからである。 SAP では減光が無いということから、これは PDC データ作成時のスムージングが原因のシステマティックノイズであると考えるのが最も妥当であると思われる。

SAP で確認できない減光を除外し、残りを single transit イベントと判定した。

2.2 シングルトランジットのパラメータ推定

2.2.1 原理

我々は軌道要素の決定に Markov chain Monte Carlo methods(MCMC) を用いた。以下に、内側の惑星の公転周期と各トランジットの形状を表すパラメータから single transit の公転周期を解析的に決定する手法について記す。

円軌道を仮定すると、第 1 接触から第 4 接触までの時間 t_T 、第 2 接触から第 3 接触までの時間 t_F は Winn 2010 より

$$t_T = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{R_*}{a} \sqrt{\frac{(1+k)^2 - b^2}{\sin i}} \right), \tag{2.1}$$

$$t_F = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{R_*}{a} \sqrt{\frac{(1-k)^2 - b^2}{\sin i}} \right), \tag{2.2}$$

k は主星と惑星の半径比、b は impact parameter である。 $\sin \pi t_T/P \sim \pi t_T/P$ 、 $\sin \pi t_F/P \sim \pi t_F/P$ の近似を用いると、

$$\frac{R_*}{a} = \frac{\pi}{2\sqrt{k}} \frac{\sqrt{t_T^2 - t_F^2}}{P} \sin^3 i \tag{2.3}$$

ケプラーの第3法則より、式(2.3)は以下のように書き表される。

$$P = \frac{\pi G}{32} \frac{M_*}{R_*^3} \left(\frac{t_T^2 - t_F^2}{k}\right)^{\frac{3}{2}} \simeq \frac{\pi^2 G}{3} \rho_* \left(\frac{T\tau}{k}\right)^{3/2},\tag{2.4}$$

 $t_T = T + \tau$, $t_F = T - \tau$ とおくと、STE の公転周期は内側のパラメータ (k_i, T_i, τ_i) , 及び STE のパラメータ (k_s, T_s, τ_s) を用いて表すことができる。

$$P_s = \left(\frac{k_i T_s \tau_s}{k_s T_i \tau_i}\right)^{\frac{3}{2}} P_i \tag{2.5}$$

式 (2.5) から、内側の惑星の公転周期が既知かつ STE と内側の惑星のトランジットの形状が良く判っているならば、STE の公転周期を見積もることが可能であることがわかる。KOI 天体の中から見つかった STE は、この条件を満たしている。

2.2.2 データセットの作成

まず、フィット対象となるデータセットの作成を行った。このとき、既知惑星と STE とでは folding の有無により異なるデータ処理方法を選択した。

既知惑星の取り扱い

既知惑星の場合、トランジットが複数回観測されているため、folding により統計精度を上げることができる。精度良くfoldを行うため、私はライトカーブのdetrendを行った。まず、KOIカタログのパラメータをもとに既知の惑星のトランジットを全てマスクした。次に、以下の操作を各quarterの全データ点について行い、時刻に対応するトレンドを計算した。

- 与えたデータ点の時刻を中心として前後にある時定数の区間をとった。
- その区間について2次関数フィットを行いパラメータを決定した。
- 与えたデータ点の時刻においてフィットにより得られた2次関数の値を計算した。

ただし、マスクした部分のトレンドは、その区間の両端の2点間の線形補間により決定した。 決定したトレンドでflux/トレンド比を計算し、これをfoldingした。

ここで与える時定数は、fold するトランジットの継続時間の~2倍より小さいとトランジットを潰してしまう可能性がある。また、大きすぎてトランジット以外の変動 (黒点など)を取り去ることができなくては flux/トレンドの比が 1 から大きくずれてしまい、dtrend の体を失ってしまう。様々な系で時定数を色々に変化させて試行した結果、最適と思われる時定数の値は系のライトカーブの状態 (黒点による変動が大きい、既知惑星のトランジットが大きいなど) に左右され、一意に決まるものではないことも確認できた。

そこで、フィットを行う系のそれぞれについて時定数を 0.05 - 10 日 の間で変化させて detrend を行い、各時定数に対応して

- fold により得たライトカーブのトランジット以外の部分 (ベースライン) について、直線 y=1 をモデルとしたときの χ^2 の和
- トランジット部分の depth と KOI カタログに記載されている depth の値との残差の絶対値

をプロットした。時定数が小さく detrend によりトランジットが潰れてしまう状況では、depth は減少しほとんど 0 となることから、時定数が小さい領域の閾値の決定指標として depth を選択した。depth の計算は、トランジット中心から前後にある範囲のデータ点の平均値とベースラインの値の差から減光率を計算し、最もカタログ値に近い値を選んだ。以下に、depth の計算値とベースラインの χ^2 の和のプロット例を示す。この例では、時定数が duration を超えた直後にベースラインが大きく乱れ、 $\gtrsim 6.0$ 日 で乱れが収まっている。depth の計算値がカタログ値とおよそコンパラになるのもこのベースラインの乱れが収まったあたりであるから、最適な時定数の値を 8.1 日 と決定している。

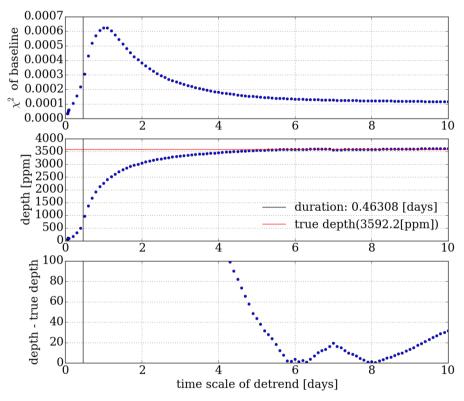


図 2.1: detrend の最適な時定数の判定に用いた図の一例。横軸: 時定数 $(0.05 - 10.0 \, \mathrm{H})$ 。上段: ベースラインの 1 からのずれを χ^2 で見積もった。中段: fold 結果から計算した depth の値 (青) とカタログ値 (赤の直線)。下段: depth の計算値とカタログ値の残差。鉛直方向の直線は fold した惑星のトランジットの継続時間 (duartion) [日]。タイムスケール $1.0 - 4.0 \, \mathrm{H}$ 付近のライトカーブの変動が大きい場合、時定数が大きくなるとこの変動をスムージングできなくなるため、時定数に上限がつく。

このとき、long cadence と同じ 1bin 30 分の時間分解能で fold を行うと、時間分解能 1 分の short cadence データが存在せず long cadence のみ利用可能な系ではデータ点の数が極端に少なくなってしまう。そこで、データの種類に拘らず fold 後の時間分解能が 1 分になるよう統一した。

STEの取り扱い

STE のライトカーブは fold することができないため、生のライトカーブから直接切り出した。その際、STE に既知惑星のトランジットが重なっている場合についてはその部分をマスクした。

さらに、STE の中心時刻と継続時間を推測してマスクし、ベースラインの detrend を既知惑星の fold 前の detrend と同じ手法において時定数を 0.1 日 として行った。ただし、ライトカーブの形状次第ではマスクした STE の部分の線形補間が適切に為されないことがある (図のようにベースライン区間の端点が飛び値になっていると、トレンドが引きずられる)。このようなときは、ベースライン区間の端点のトレンドの値を尤もらしい値に置き換えた上で、トランジット区間の両端の線形補間を行った。

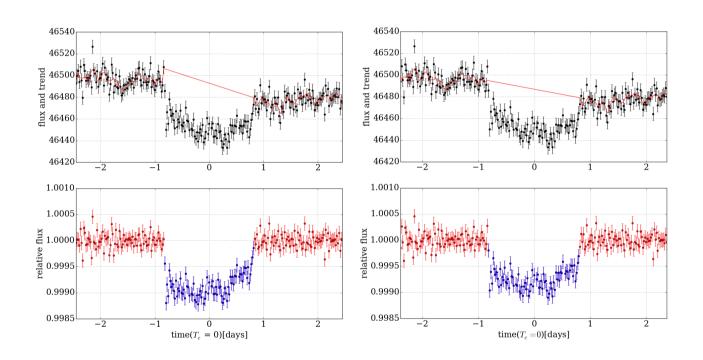


図 2.2: 横軸はトランジット中心時刻を 0 とした。上は flux とトレンド、下は相対 flux で、トランジット部分を青で示している。左図は bad interpolation の例。右図ではベースライン区間の端点のトレンドの値を尤もらしい値に置き換えた。

2.2.3 MCMC によるトランジットのモデルフィット

MCMCのツールとしては PyTransit を利用し、モデルは全て Mandel & Agol を使用した。時間分解能 1 分の short cadence data を使って fold をした既知惑星では binning は考慮しなかったが、時間分解能 30 分の long cadence data を使った既知惑星、及びライトカーブから直接切

り出した STE(STE の short cadence data は存在しなかった) については super sampling 機能を用いて binning の影響を考慮に入れた。

フリーパラメータは主星の平均密度 ρ_* , limb darkening coefficient u_1+u_2 , トランジット中心時刻 Tc, 軌道傾斜角 i, 主星と惑星の半径比 k, normalization factor c とした。公転周期は STE についてはフリーとし、それ以外は固定した。離心率は、特に STE については trend の取り方次第でいくらでもライトカーブの形状が変化し得ることから決まりにくいと考え、0 に固定した。limb darkening coefficient の初期値は [17] の Kepler stellar limb-darkening coefficients を元に線形補間を行い決定した。

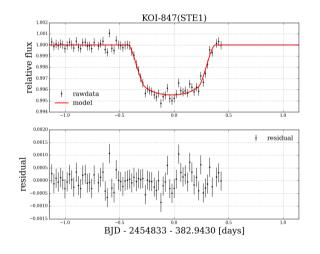
prior は $u_1 + u_2$, Tc, $\cos i$, c については線形で与え、 ρ_* , P, k は logarithmic prior とした (書き直します)。

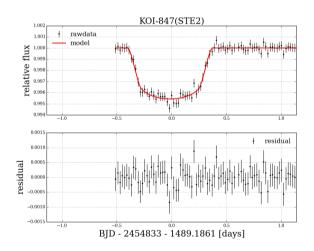
第**3**章 シングルトランジットの分類と各系 の解説

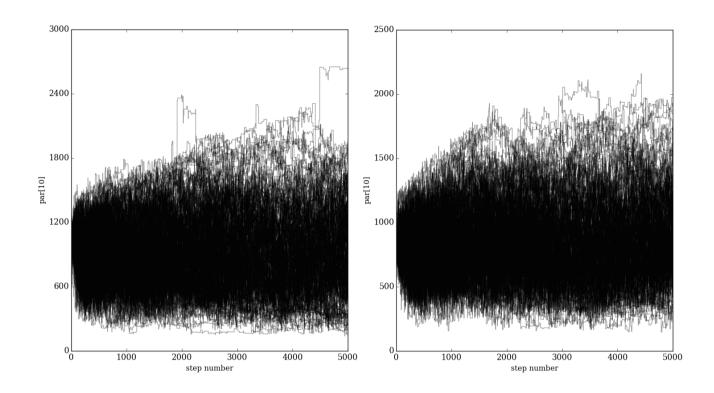
3.1 長周期惑星と思われるシングルトランジット

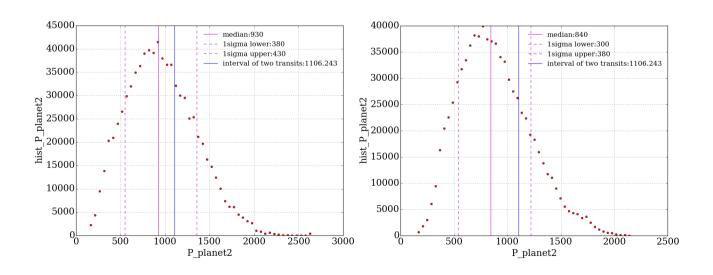
KOI-847 (KIC 6191521)

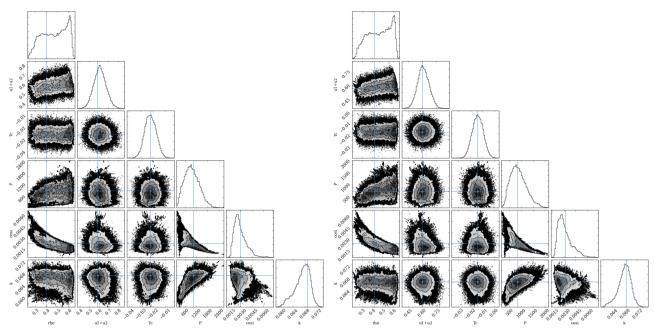
この系には周期 80.8720639 日の惑星候補が存在している。我々は $T_c(\mathrm{BJD}-2454833)=382.9430$ 日, 1489.1861 日付近にそれぞれ未知のトランジットと思われる減光を発見した。他にトランジットが存在しないならば、 $P\sim1106.243\pm0.007$ 日となる。各々のトランジットと fold した既知惑星のライトカーブとの同時フィットの結果、 $P_1=930^{+430}_{-380}$ 日, $P_2=840^{+380}_{-300}$ 日となり、観測事実と consistent である。したがって、本稿の公転周期推定方法は誤差の範囲で正しいと考えられる。











KOI-671 (Kepler-208, KIC 7040629)

スーパーアースサイズの既知惑星 4 個が水星軌道よりも遥か内側の領域に密集している。私は $T_c(\mathrm{BJD}-2454833)=786.7642$ 日の位置に STE を発見したが、周囲のノイズと見分けられる限界程度の S/N であり、自動での検出は非常に難しいと思われる。MCMC の結果、 $P=7700^{+2900}_{-2500}$ 日、 $R_p=3.9\pm2.5\,R_\oplus$ との推定値を得た。公転周期は太陽系の木星と土星の中間程度であり、私の発見した STE の中でも最長である。

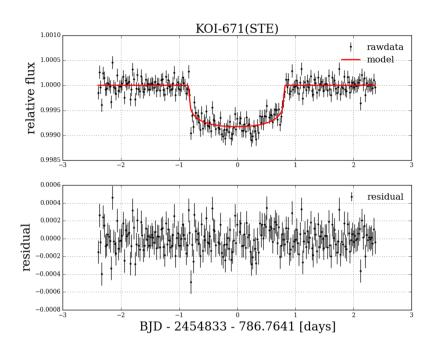


図 3.1: フィット結果。横軸は (BJD – 2454833 – T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

KOI-2525 (KIC 5942949)

スーパーアースサイズの既知惑星が1個存在している。私は $T_c(\mathrm{BJD}-2454833)=1326.16151$ 日の位置に STE を発見した。MCMC の結果、周期 $P=1190^{+540}_{-380}$ 日、半径が $R_p=12.3\pm1.3\,R_\oplus$ と推定された。

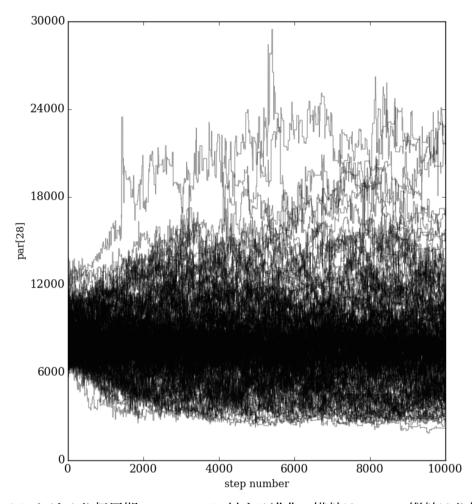


図 3.2: MCMC における公転周期 Pの chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 P[日]。

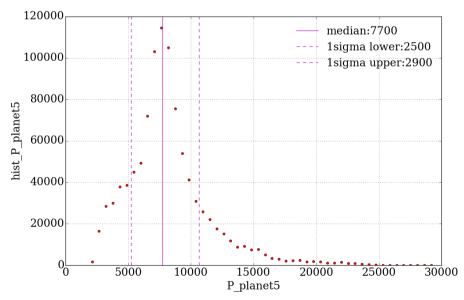


図 3.3: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

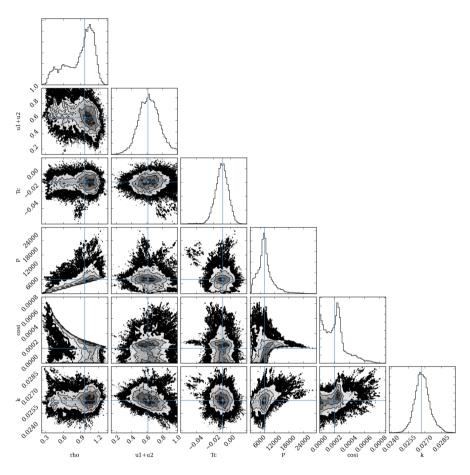


図 3.4: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[\mathbf{g}/\mathbf{cc}]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[\mathbf{H}]$, 公転周期 $P[\mathbf{H}]$, 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[\mathbf{H}], P[\mathbf{H}], \cos i, k)$ 。 対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

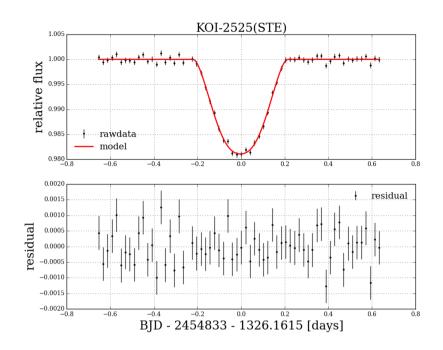


図 3.5: フィット結果。横軸は (BJD – 2454833 – T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

KOI-1108 (KIC 3218908)

KOI1108 系は周期 201 日 未満の惑星が 3 個あるコンパクトな多重惑星系である。私はさらに第 4 の惑星候補として、公転周期 $P=1160^{+760}_{-430}$ 日、半径 $R_p=5.4\pm1.8~R_\oplus$ という惑星によるものと考えられる STE を $T_c(\mathrm{BJD}-2454833)=766.6854$ 日 の位置に発見した。

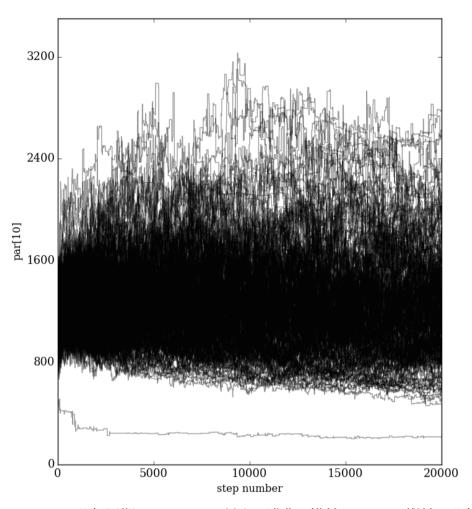


図 3.6: MCMC における公転周期 Pの chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 P[日]。

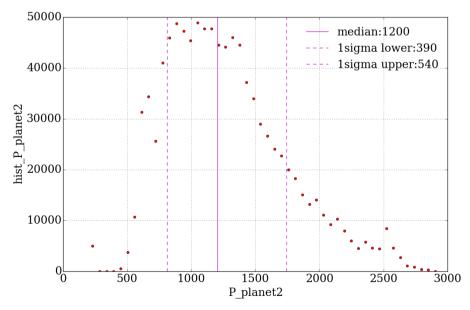


図 3.7: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

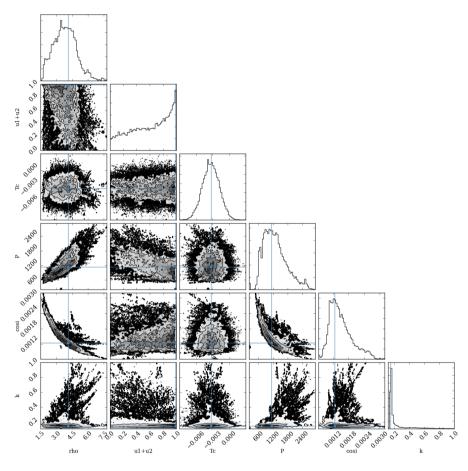


図 3.8: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[\mathbf{g}/\mathbf{cc}]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[\mathbf{H}]$, 公転周期 $P[\mathbf{H}]$, 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[\mathbf{H}], P[\mathbf{H}], \cos i, k)$ 。 対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

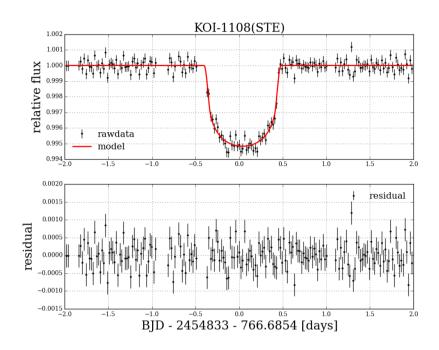


図 3.9: フィット結果。横軸は (BJD – 2454833 – T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

KOI-693 (Kepler-214, KIC 8738735)

この系にはスーパーアースサイズの惑星が 2 個存在している (Kepler-214 b, c)。追観測により confirm されているので、他の系の惑星"候補"と比較してパラメータの信頼性は高いと考えてもよいと思われる。私は $T_c(\mathrm{BJD}-2454833)=697.8591$ 日 の位置に STE を発見し、フィットの結果、半径は $R_p=3.5\pm1.5$ R_\oplus と海王星相当であり、公転周期は $P=980^{+520}_{-470}$ 日 であることが判った。

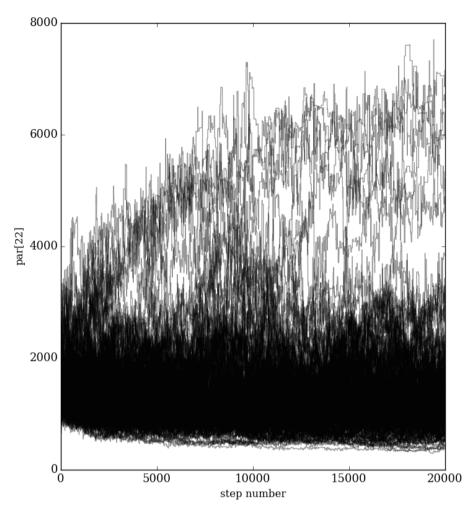


図 3.10: MCMC における公転周期 P の chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 $P[\Pi]$ 。

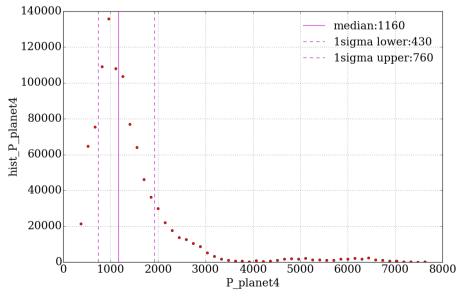


図 3.11: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

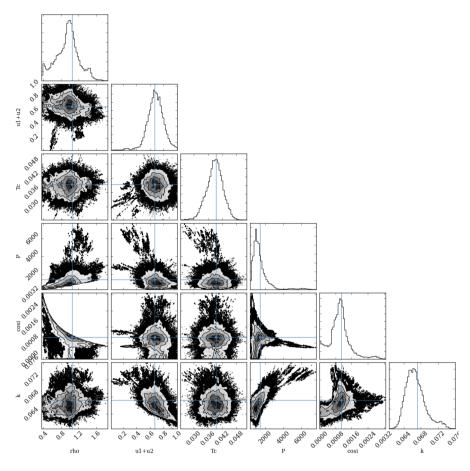


図 3.12: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[g/cc]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[H]$, 公転周期 P[H], 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比 k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[H], P[H], \cos i, k)$ 。対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

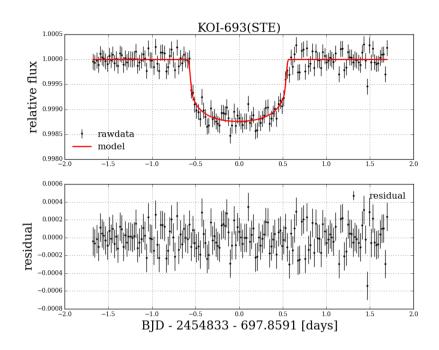


図 3.13: フィット結果。横軸は (BJD – 2454833 – T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

KOI-435 (Kepler-154, KIC 11709124)

今回 STE を発見した恒星の中でも最も多くの既知の惑星候補を持つ。私は T_c (BJD-2454833) = 657.2698 日に STE を発見したが、これは KOI435.02 としてアーカイブにも記載がある。MCMC の結果、公転周期 $P_2=910^{+210}_{-230}$ 日の土星サイズの惑星であることが判った。この推定値はアーカイブの値とも consistent である。他の STE と比較して公転周期が精度良く求まった要因としては、既知惑星の S/N が良いこと、惑星数が多いことからパラメータの制限が厳しいことが挙げられる。

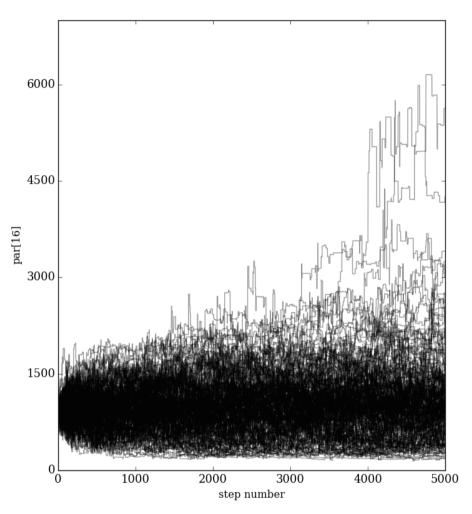


図 3.14: MCMC における公転周期 P の chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 $P[\Pi]$ 。

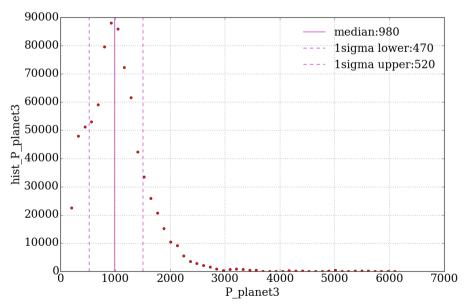


図 3.15: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

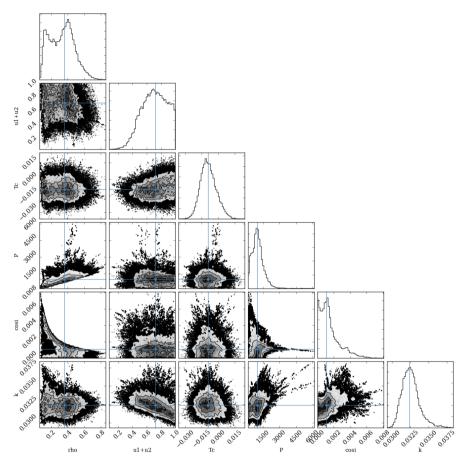


図 3.16: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[g/cc]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[H]$, 公転周期 P[H], 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比 k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[H], P[H], \cos i, k)$ 。対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

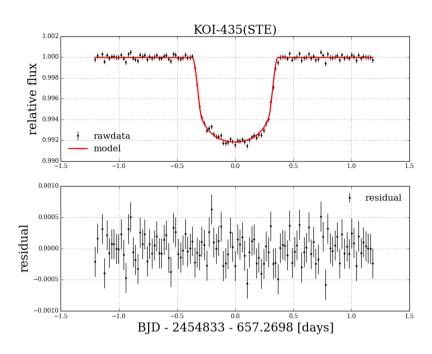


図 3.17: フィット結果。横軸は (BJD – 2454833 – T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

KOI-1421 (KIC 11342550)

トランジットが複数回観測されている既知惑星は存在しない。ただし、私の発見した STE は KOI カタログに KOI-1421.01 として記載がある。既知惑星の情報を用いて主星の密度 ρ_* を制限 することができないため、フィットに際しては CFOP のカタログから $\rho_*=1.403\pm0.3668\,\mathrm{g/cc}$ という値を採用し、Gaussian prior で制限してフリーとした。その結果、 $P=2230^{+960}_{-740}\,\mathrm{H}$ 、 $R_p=10.2\pm4.5\,R_\oplus$ との推定値を得た。

図3.25に見つかった長周期惑星の属する系の構造を、図3.26にケプラー衛星が今までに発見した惑星と今回見つけた惑星候補の公転周期と惑星半径のプロットを示す。

3.2 エキセントリックプラネット候補

太陽系でいう木星や土星のような惑星を仮定してSTEのパラメータを見積もってきたが、実際には異なるのではないかという結論を導かざるを得ないSTEの一群が存在する。これらはケプラー衛星の観測中に少なくともあと1回以上のトランジットが起きてしまう程、見積もりにより得られた公転周期が小さい。確率は小さいが、観測のギャップに見えている1回以外のトランジットが全て入り込んでしまっていると考えても公転周期が小さすぎる候補もある。このような場合、そもそもこの減光が観測対象の恒星をソースとしていないケースもあり得るが、私は惑星の離心率が大きいエキセントリックプラネットであるものと考えることで、これらの候補を惑星候補から外さなければならない事態を回避した。

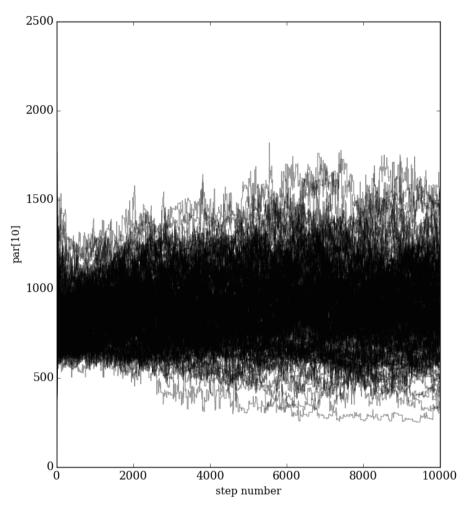


図 3.18: MCMC における公転周期 P の chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 P[日]。

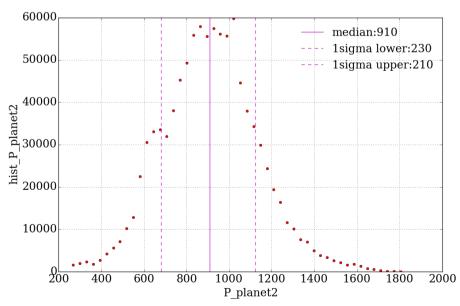


図 3.19: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

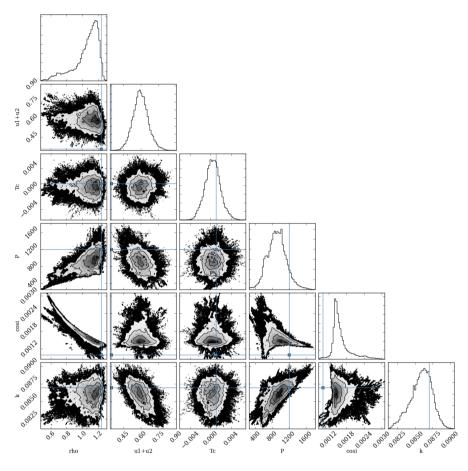


図 3.20: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[g/cc]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[H]$, 公転周期 P[H], 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比 k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[H], P[H], \cos i, k)$ 。対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

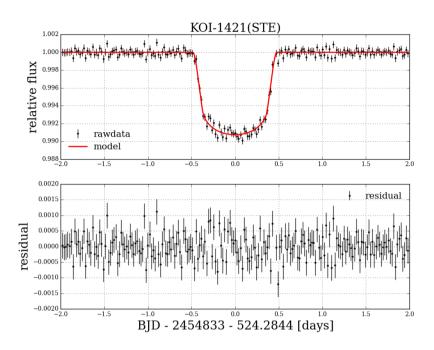


図 3.21: フィット結果。横軸は (BJD - 2454833 - T_c [日])。上段: 黒で相対可視光強度、赤でモデルを示す。下段: モデルの残差。

簡単のため、内側に惑星が存在する場合は円軌道であるものと仮定し、STE のみが大きな離心率をもつとする。このとき、式 (2.1), (2.2) の右辺に $\sqrt{1-e^2}/(1+e\sin\omega)$ がかかる。e は離心率、 ω は天球面から測った近日点の角度である。これを用いると、 ρ_* を共通として、離心率がある場合の公転周期は無い場合と比べて以下のファクターだけ変化する。

$$\alpha_{\text{ecc}} = \left(\frac{1 + e\sin\omega}{\sqrt{1 - e^2}}\right)^3 \le \left(\frac{1 + e}{1 - e}\right)^{3/2} \tag{3.1}$$

 $P_{\min, \text{Kepler}}$ よりは公転周期が大きいとすると $\alpha_{\text{ecc}} > P_{\min, \text{Kepler}}/P_s$ が成り立つので、観測事実を説明しようとしたときの離心率の下限値を式 (3.1) から得ることができる。

$$e_{\min} = \frac{(P_{\min, \text{Kepler}}/P_s)^{2/3} - 1}{(P_{\min, \text{Kepler}}/P_s)^{2/3} + 1}.$$
(3.2)

"misfit"候補それぞれについての e_{\min} や $P_{\min,Kepler}$ の値は表にまとめてある。

追観測によりこれらが離心率の大きい軌道をもつ惑星であると確認できれば、私達はホットジュピターや HD80606 のような極端な楕円軌道をもつ惑星の起源に迫ることができると考えられる。私の発見した惑星候補の中でも最も期待を寄せているのは KOI-1208 である。この系には伴星らしき天体が受かっており、その離心率は 0.9 を超えると見積もられている。

3.3 その他に発見された興味深い減光

今回のサーベイでは惑星由来のものだけでなく長周期の連星によるものと思われる減光も2個検出している。

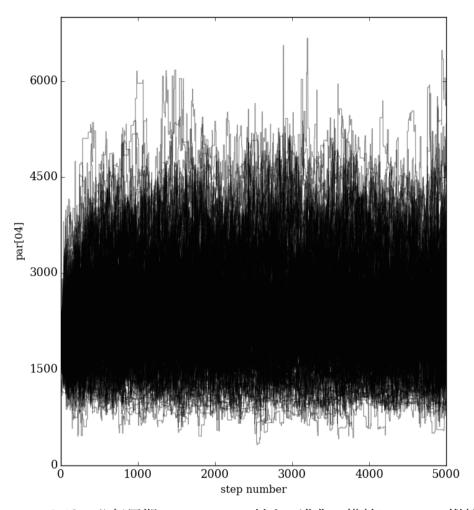


図 3.22: MCMC における公転周期 P の chain に対する進化。横軸は chain、縦軸は公転周期 $P[\Pi]$ 。

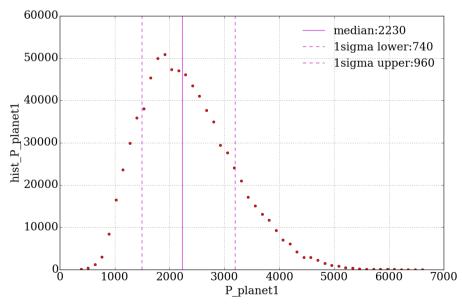


図 3.23: MCMC で得られた公転周期 P の分布。横軸は公転周期 P[日]、縦軸は頻度。

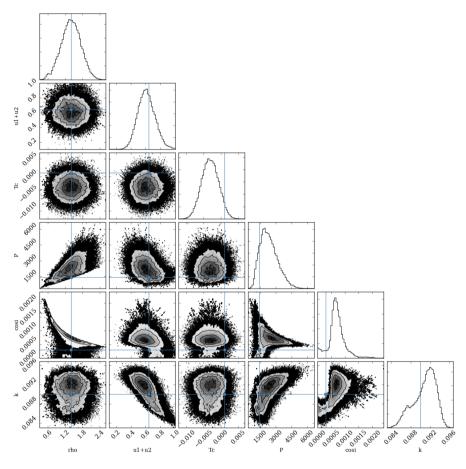


図 3.24: MCMC から得られたフリーパラメータの各組み合わせでの 2 次元ヒストグラム。横軸: 左から順に主星のパラメータ (主星の平均密度 $\rho_*[g/cc]$, 周縁減光係数 u_1+u_2)、STE のパラメータ (トランジット中心時刻 $T_c[H]$, 公転周期 P[H], 軌道傾斜角の余弦 $\cos i$, 主星と惑星の半径比 k)。縦軸: 上から順に主星のパラメータ (u_1+u_2) 、STE のパラメータ $(T_c[H], P[H], \cos i, k)$ 。対角線上のグラフは各パラメータのヒストグラム。青で示した直線は MCMC の結果の中央値。

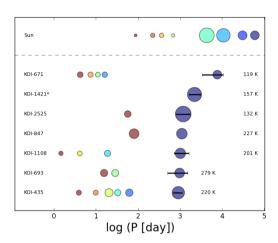


図 3.25: 発見した長周期惑星候補を含む系の模式図 (表 4.2 の上段の惑星候補)。円のサイズが惑星半径に対応する。1 段目は太陽系で、STE は 2 段目以下の右端である。エラーバーは推定した公転周期の誤差で、それぞれの STE の有効温度をそれぞれ示してある。KOI-847 の STE の公転周期は 2 回のトランジットの間隔から求まったので、その誤差は非常に小さい。また、KOI-1421 には既知惑星が無く主星の密度のカタログ値を利用して公転周期を推定したため、その信頼度は他と比べて 1 段落ちる。

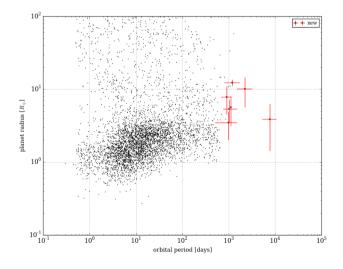


図 3.26: Properties of the seven STE candidates in 図??に示した 7 個の STE の公転周期と惑星半径をケプラーにより発見されている他の惑星と重ねてプロットしたもの。横軸は公転周期 [日]、縦軸は惑星半径 $R_p[R_{\oplus}]$ で、両方対数目盛りである。赤で誤差付きプロットされているのが STE、黒が既知の他の惑星である。

連星であるものと考えられる系: KOI-1168

2回見えているトランジットのそれぞれについてフィッティングを行ったところ、パラメータは $1-\sigma$ の範囲で一致していた。しかしその半径は地球の約 60 倍であり惑星というよりも恒星であることを示唆している。2回のトランジットの間隔から公転周期は $P_s=525.0216\pm0.0006$ 日と求まった。しかし、既知惑星との同時フィットでは公転周期が ~120 日となっており、この天体も前述の "misfit"と同様、高離心率の可能性がある。

連星系の周りの第3天体による複雑な相互食: KIC6543674

この系は周期 1.2 日 の惑星候補と認定されているが、実際はほとんど同じ大きさの 2 個の恒星からなる食連星である。私は時刻 (BJD -2454833) ~ 190 日 付近に、連星による減光とは異なる減光を 3 回発見した。

連星の質量をそれぞれ M_A , M_B 、A と第 3 天体 C の速度をそれぞれ V_A , V_C とすると、C によるトランジットの継続時間やタイミングは M_B/M_A , V_C/V_A に強く依存するため、3 体の質量比と半径比がケプラーの測光観測データのみから全て決まる。主星の温度情報などをカタログから与えると、 $M_A=1.2\pm0.3M_\odot$, $R_A=1.8\pm0.1R_\odot$, $M_B=1.1^{+0.3}_{-0.2}M_\odot$, $R_B=1.4\pm0.1R_\odot$, $M_C=0.50^{+0.07}_{-0.08}M_\odot$, $R_C=0.50\pm0.04R_\odot$, $T_C<5000\,\mathrm{K}$, $P_C\sim1100\,\mathrm{H}$ と求められている。このように内側の連星が近接している系は、元々互いにある程度離れた位置で形成され、外側の第3 天体の古在効果により軌道が楕円化し、近点付近でのみ潮汐力により減速を受け続けることにより形成される (ref: David2015)。この時第3 天体の軌道面は大きく傾くことが多いと考えられており、KIC6543674 のように3 体の軌道面が非常に良く揃っている例の存在は大きな驚きをもって受け止められた (ref: masuda2015)。

第4章 discussion

4.1 内側の惑星と LPG の間に位置する惑星の観測的欠乏

図1を見ると、内側に複数の惑星を持つ系 (KOI-671, 1108, 693, 435) について STE と内側惑星との中間的な距離に位置する惑星が欠乏しているように見える。丁度地球型惑星と木星型惑星の間に欠乏領域が存在していることから、惑星の形成過程を反映したギャップなのだろうか?サンプル数が少ないため実際にこのようなギャップが存在することは否定しきれないが、この領域の惑星の欠乏は観測的なバイアスとして説明が可能であると考えられる。

惑星半径が主星と比較して十分に小さく、また離心率が0であるとすると、観測者が惑星のトランジットを観測できる確率は次の式で与えられる。

$$p_{tra} \sim \frac{R_*}{a} \tag{4.1}$$

また、ケプラーの第3法則

$$a = \left(\frac{GM_*}{4\pi^2}\right)^{1/3} P^{2/3} \tag{4.2}$$

を用いて a を消去すると、

$$p_{tra} \propto P^{-2/3} \tag{4.3}$$

であることから、惑星の公転周期が大きくなるとトランジットを起こす確率は小さくなる。STE の公転周期を 1000 日として、それよりも内側ではトランジットの確率は大きくなるが、実際に惑星が欠乏しているように見える周期 ~ 100 日以上の領域においては確率がオーダーで大きくなるわけではなく $(p_{tra} \lesssim 10^{-2})$ 、この領域の惑星のトランジットは確率的に観測できていない可能性がある。

この観測バイアスが実際に存在するかを確かめるために行ったシミュレーションを以下に示す。まず、太陽と同じ質量、半径の主星の周りに惑星の公転周期が0.1 日から 1000 日の範囲で対数スケールで等間隔になるよう配置した (図の緑の円)。このとき、最外周の周期 1000 日の惑星は主星から 1.96 AU の距離、或は a/R_* にして 420、すなわち主星半径の 420 倍の距離に相当する。また、各惑星の相対的な軌道傾斜角は $\sigma=1.8^\circ$ のレイリー分布に従うものとした。この系に対し観測者の視線方向の角度の余弦を一様に分布させて観測をシミュレーションし、最外周の惑星のトランジットが観測できたサンプルを抽出した。図の右端、私の発見した STE に対応する周期 1000 日の惑星 (赤い円) と内側の惑星との間の惑星検出が少ないことが見て取れる。従って、この領域の惑星の欠乏は実際の惑星の分布を反映しているのではなく、観測バイアスによるものであることが判る。

4.2 コンパクトマルチ系における LPG の存在頻度

私がサーベイを行った KOI7557 天体のうち既知の惑星候補を 2 個以上持つ系は 695 個であり、そのうち 4 個に LPG 候補が存在しているという結果を得た。またこれらの惑星系の全てが、水

第 4. DISCUSSION

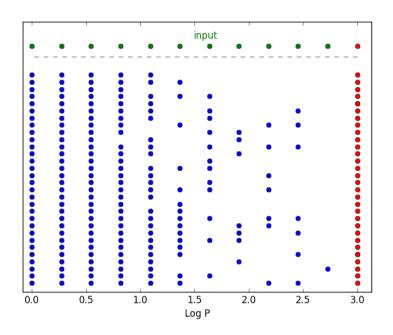


図 4.1: 惑星系のトランジット観測のシミュレーション。横軸は公転周期の対数 [日]。緑の円が入力した惑星。周期 1000 日 の惑星のトランジット (赤の円) が観測できる場合、内側の惑星 (青の円) も多数観測できるが、周期 100 - 1000 日 の惑星は確率的に観測できていないことが判る。

星軌道よりも内側に複数の惑星が密集するコンパクトな惑星系であった。このようなコンパクトマルチ系においては、LPGの軌道面が内側の惑星のそれとよく揃っているという前提のもとで、上述の統計量を用いてLPGの存在頻度を推定することが可能である。

複数の惑星がトランジットを起こしている系では、高頻度でそれらの軌道面が良く揃っている。これは、惑星が平べったい原始惑星系円盤から形成されることを示している。その外側に LPG が存在するならば、LPG も同様に原始惑星系円盤から形成されたと考えられ、その軌道面も内側の惑星と良く揃っているはずである。

コンパクトマルチ系を N_{cmulti} 個観測したとき、LPG のトランジットの発見数の期待値 n_{tLPG} は次の式で与えられる。

$$n_{\rm tLPG} \simeq \frac{T_{\rm obs}}{P_{\rm LPG}} p({\rm tra}|{\rm LPG, cmulti}) \, \overline{n}({\rm LPG|cmulti}) \, N_{\rm cmulti},$$
 (4.4)

それぞれコンパクトマルチ系であるという前提のもと、 $\overline{n}(LPG|cmulti)$ は1つの系に存在する LPG の平均個数、p(tra|LPG,cmulti)は発見したLPGがトランジットを起こす確率である。 T_{obs} はケプラーの観測期間、 P_{LPG} はLPGの公転周期であり、ケプラーのミッション期間中にLPGのトランジットが起きなければならないという制限を考慮に入れるため T_{obs}/P_{LPG} というファクターを乗じている。通常、p(tra|LPG,cmulti)は LPG と内側の惑星との相対的な軌道傾斜角 (mutual inclination) に依存するため、mutual inclination とLPGの存在頻度 \overline{n} は縮退する。

LPG と内側の惑星との mutual inclination が $\sim R_\star/a_{\rm in}$ とコンパラならば、近似として $p({\rm tra}|{\rm LPG,cmulti})$ = $a_{\rm in}/a_{\rm LPG}$ を用いることができる。ここで、 $a_{\rm in}$ 及び $a_{\rm LPG}$ はそれぞれ内側の惑星と LPG の軌道 長半径である。 $a_{\rm LPG}=2\,{\rm AU}$ (周期 1000 日に対応)、 $a_{\rm in}=0.07\,{\rm AU}$ (KOI の複数トランジット 系の軌道長半径の中央値) を採用すると、 $p({\rm tra}|{\rm LPG,cmulti})=0.035$ となる。 $T_{\rm obs}=4\,{\rm fm}$ 、 $P_{\rm LPG}=2200$ 日(発見した STE の公転周期の平均値)、 $N_{\rm cmulti}=695$ 、 $n_{\rm tLPG}=4\,{\rm fm}$ に代

入すると、LPG の存在頻度は π (LPG|cmulti) $\simeq 0.2$ と見積もることができる。LPG と内惑星の mutual inclination がここで仮定した値よりも大きい場合、上述の見積もりは正しくLPG の存在 頻度を与える。また上述の議論は、LPG のトランジットはケプラーの観測期間に引っかかりさえ すれば 100%検出できるとの前提に基づいている。従って、ここで推定した π (LPG|cmulti) $\simeq 0.2$ という値はラフな下限値であり、20%、あるいはそれ以上のコンパクトマルチが周期 1000 日を 超す LPG を擁すると考えられる。

4.3 惑星1個の系と多重惑星系の違い

LPG を発見した系の表を見ると、既知の惑星が1個しか知られていない系では、複数の既知惑星が知られている系より有意に LPG の発見数が少ないことがわかる。統計が良いとはいえないが、惑星 1 個の系では式 (4.4) の p(tra|LPG,cmulti) $\overline{n}(\text{LPG}|\text{cmulti})/P_{\text{LPG}}$ の項が小さいということが考えられる。これは意味するところとして

- 内側の惑星と LPG との mutual inclination がより大きい
- LPG の存在頻度が小さい
- 典型的な公転周期が大きい

という可能性が挙げられる(追記します)。

関連図書

- [Bedell et al.(2015)Bedell, Meléndez, Bean, Ramírez, Asplund, Alves-Brito, Casagrande, Dreizler, Monro Bedell, M., Meléndez, J., Bean, J. L., et al. 2015, A&A, 581, A34
- [Boisse et al.(2012)Boisse, Pepe, Perrier, Queloz, Bonfils, Bouchy, Santos, Arnold, Beuzit, Díaz, Delfosse, Boisse, I., Pepe, F., Perrier, C., et al. 2012, A&A, 545, A55
 - [1] Dalba, Muirhead, Fortney, Hedman, Nicholson, & Veyette 2015arXiv151003430D Dalba, P. A., Muirhead, P. S., Fortney, J. J., et al. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1510.03430
- [2] Fabrycky, Lissauer, Ragozzine, Rowe, Steffen, Agol, Barclay, Batalha, Borucki, Ciardi, Ford, Gautier, Geary, Holman, Jenkins, Li, Morehead, Morris, Shporer, Smith, Still, & Van Cleve 2014ApJ...790..146F Fabrycky, D. C., Lissauer, J. J., Ragozzine, D., et al. 2014, ApJ, 790, 146
- [3] Foreman-Mackey, Hogg, Lang, & Goodman 2013PASP..125..306F Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, PASP, 125, 306
- [4] Hagelberg 2010lyot.confE..22H Hagelberg, J. 2010, in In the Spirit of Lyot 2010, 22
- [5] http://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/Kepler-presskit-2-19-smfile.pdf
- [6] Kasting, Whitmire, & Reynolds(1993) 1993Icar..101..108K Kasting, J. F., Whitmire, D. P., Reynolds, R. T., 1993, Icarus, 101, 108K
- [7] Lissauer, Ragozzine, Fabrycky, Steffen, Ford, Jenkins, Shporer, Holman, Rowe, Quintana, Batalha, Borucki, Bryson, Caldwell, Carter, Ciardi, Dunham, Fortney, Gautier, Howell, Koch, Latham, Marcy, Morehead, & Sasselov 2011ApJS..197....8L Lissauer, J. J., Ragozzine, D., Fabrycky, D. C., et al. 2011, ApJS, 197, 8
- [8] Mandel & Agol (2002) 2002ApJ...580L.171M Mandel, K., & Agol, E. 2002, ApJ, 580, L171
- [9] Markwardt 2009ASPC..411..251M Markwardt, C. B. 2009, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 411, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII, ed. D. A. Bohlender, D. Durand, & P. Dowler, 251
- [Marmier et al.(2013)Marmier, Ségransan, Udry, Mayor, Pepe, Queloz, Lovis, Naef, Santos, Alonso, Alve Marmier, M., Ségransan, D., Udry, S., et al. 2013, A&A, 551, A90
- [10] Mayor & Queloz(1995) 1995Natur.378..355M

54 第 4. DISCUSSION

[Montañés-Rodríguez et al.(2015)Montañés-Rodríguez, González-Merino, Pallé, López-Puertas, & García-Montañés-Rodríguez, P., González-Merino, B., Pallé, E., López-Puertas, M., & García-Melendo, E. 2015, ApJ, 801, L8

- [11] Morton & Winn(2014) 2014ApJ...796...47M Morton, T. D., & Winn, J. N. 2014, ApJ, 796, 47
- [12] Parviainen 2015MNRAS.450.3233P Parviainen, H. 2015, MNRAS, 450, 3233
- [13] Ragozzine & Holman (2010) 2010arXiv1006.3727R Ragozzine, D., & Holman, M. J. 2010, ArXiv e-prints, arXiv:1006.3727
- [14] Rowan, Meschiari, Laughlin, Vogt, Butler, Burt, Wang, Holden, Hanson, Arriagada, Keiser, Teske, & Diaz 2015arXiv151200417R Rowan, D., Meschiari, S., Laughlin, G., et al. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1512.00417
- [15] Salter, Tinney, Wittenmyer, Jenkins, Jones, & O'Toole 2014IAUS..299...66S Salter, G. S., Tinney, C. G., Wittenmyer, R. A., et al. 2014, in IAU Symposium, Vol. 299, IAU Symposium, ed. M. Booth, B. C. Matthews, & J. R. Graham, 66–67
- [16] Seager & Mallén-Ornelas(2003) 2003ApJ...585.1038S Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. 2003, ApJ, 585, 1038
- [17] 2010A&A...510A...21S Sing, D. K. 2010, A&A, 510, A21
- [18] Tremaine, & Dong, 2012AJ....143...94T Tremaine, S., & Dong, S. 2012, AJ, 143, 94
- [19] Wang, Fischer, Barclay, Picard, Ma, Bowler, Schmitt, Boyajian, Jek, LaCourse, Baranec, Riddle, Law, Lintott, Schawinski, Simister, Gregoire, Babin, Poile, Jacobs, Jebson, Omohundro, Schwengeler, Sejpka, Terentev, Gagliano, Paakkonen, Otnes Berge, Winarski, Green, & Schmitt 2015arXiv151202559W, Wang, J., Fischer, D. A., Barclay, T., et al. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1512.02559
- [20] 2010arXiv1001.2010W Winn, J. N. 2010, ArXiv e-prints, arXiv:1001.2010
- [21] Winn, & Fabrycky 2015ARA&A..53..409W Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. 2015, ARA&A, 53, 409
- [22] Wu, & Murray(2003) 2003ApJ...589..605W Wu, Y., & Murray, N. 2003, ApJ, 589, 605

KOIa	architecture ^b	Kepler mag	T_c (KBJD)	depth (ppm) ^c	$T_{\rm eff}$ (K)	$P_{\text{Kep,min}} (\text{days})^{\text{d}}$
99.01	1CS+1F	13.0	140.0473	1874.2	4965	1450.9538
154(new)	1F+1S	13.2	139.7277	1500	6504	1451.2732
435.02	5C+1CS	14.5	657.2698	8709.6	5937	933.7415
671(new)	4C+1S	13.8	786.7641	1000	6220	804.2469
693(new)	2C+1S	13.9	697.8591	1000	6332	893.1428
$847^{\rm e}$	1C+2S	15.2	382.9430	5000	5665	•••
$847^{\rm e}$	•••	•••	1489.1861	5000	5665	•••
1032.01	1CS+2S	13.9	176.0986	4129.9	5009	1414.9127
1032(new)	•••	•••	992.3180	1500	5009	860.8054
1032(new)	•••	•••	1351.3427	1750	5009	1219.8301
1096.01	1CS	14.7	315.33083	9592.0	5606	1275.6733
1108(new)	3C+1S	14.6	766.6854	5000	5513	824.3164
$1168^{\rm e}$	1C+2S	14.0	525.02154	22000	6449	•••
$1168^{\rm e}$	•••	•••	1133.28366	22000	6449	•••
1174.01	1CS	13.5	393.5944	1474.9	4500	1197.4066
1208.01	1CS	13.6	249.4412	3245.9	6487	1341.5601
1421.01	1CS	15.3	524.2844	9515.3	5923	1066.7171
1870(new)	1C+1S	14.4	604.1071	6000	5185	986.8949
2525(new)	1C+1S	15.7	1326.1615	20000	4806	1179.4970
2824(new)	1F+1S	15.3	1263.4172	5000	5881	911.0409
$3145^{\rm e}$	2C+1S	15.7	1439.1972	20000	4812	1269.6764
3210(new)	1F+1S	11.9	740.72319	6000	7296	850.27786
3349^{e}	1C+1S	15.3	271.8920	1500	6247	1319.1091
3475(new)	1F+1S	13.0	789.1	1000	6517	•••
$4307^{\rm e}$	1C+1S	14.2	280	5000	6175	1311.0131
6378(new)	1F+2S	13.4	617.65	17500	6475	973.34652
6378(new)	•••	•••	661.74	4300	6475	929.2648
7194(new)	1F+1S	14.2	685.43	1000	5795	905.5850

表 4.1: 発見した 28 個のトランジットライクな減光イベント

a "architecture" の凡例: C=KOI カタログにおいて "CANDIDATE"認定されている; F=KOI カタログにおいて "FALSE POSITIVE"認定されている; S=今回発見した STE; CS=KOI カタログにおいて "CANDIDATE"認定されている STE).

^b "(new)": KOI カタログに記載の無いイベント

^c ライトカーブに対しおおまかにベースラインを引き、ラフに見積もった depth。既知のイベントについては、カタログ値を記載した。

 $^{^{}m d}$ $P_{
m Kep,min}$: 2回目のトランジットが観測期間中に起きていないという条件から得られる公転周期の下限値。ここでは、他のトランジット全てが観測のギャップに入っているケースは考慮しない。

e これらのイベントは KOI カタログには記載が無いが、直近の独立なサーベイにより報告されている ([?].

表 4.2: MCMCにより得られた STE のパラメータ

KOI	ρ_* (g/cc)	$u_1 + u_2$	$u_1 - u_2$	$T_c ext{ (KBJD)}$	P (day)	$i \cos i$	$k = R_p/R_*$	b^{\dagger}	$T \text{ (hr)}^{\dagger}$	$\tau (\mathrm{hr})^{\dagger}$	$R_p \; (R_\oplus)^\dagger$
(Uehara	$(Uehara\ Objects\ of\ Interest)$	terest)									
847(1)	0.45 ± 0.13	$0.633^{+0.063}_{-0.065}$	0.166	$382.9430^{+0.0047}_{-0.0049}$	$880^{+760\dagger\dagger}_{-430}$	$0.0028 {}^{+0.0012}_{-0.00074}$	$0.0677^{+0.0022}_{-0.0037}$	$0.80^{+0.047}_{-0.15}$	$15.73_{-0.37}^{+0.34}$	$3.0^{+0.91}_{-1.2}$	5.6 ± 2.5
847(2)	$0.44_{-0.12}^{+0.14}$	0.632 ± 0.062	0.166	$1489.1861_{-0.0049}^{+0.0045}$	$790^{+400\dagger\dagger}_{-320}$	$0.0031^{+0.0014}_{-0.00075}$	$0.0680^{+0.0020}_{-0.0022}$	$0.776^{+0.048}_{-0.082}$	$15.66_{-0.28}^{+0.27}$	$2.73_{-0.72}^{+0.75}$	5.7 ± 2.5
1108	$0.96^{+0.22}_{-0.29}$	0.68 ± 0.11	0.106	$766.6855^{+0.0031}_{-0.0035}$	1160^{+500}_{-270}	$0.00099^{+0.00039}_{-0.00060}$	$0.0652_{-0.0016}^{+0.0024}$	$0.38_{-0.26}^{+0.19}$	$19.48^{+0.30}_{-0.25}$	$1.48^{+0.48}_{-0.22}$	5.4 ± 1.8
671	$0.96_{-0.36}^{+0.15}$	$0.63_{-0.13}^{+0.14}$	0.0118	$786.7641^{+0.0071}_{-0.0074}$	7700^{+2900}_{-2500}	$0.00021^{+0.00012}_{-0.00015}$	$0.02675^{+0.00066}_{-0.00062}$	$0.29_{-0.22}^{+0.24}$	$39.03^{+0.41}_{-0.37}$	$1.13_{-0.096}^{+0.34}$	3.9 ± 2.5
693	$0.34_{-0.18}^{+0.14}$	0.71 ± 0.19	0.00304	$697.8591^{+0.0078}_{-0.0065}$	980^{+520}_{-470}	$0.0012_{-0.00082}^{+0.0014}$	$0.0325^{+0.0012}_{-0.0010}$	$0.32^{+0.28}_{-0.24}$	$26.58_{-0.46}^{+0.62}$	$0.96^{+0.42}_{-0.098}$	3.5 ± 1.5
435	$1.10^{+0.094}_{-0.20}$	$0.596_{-0.062}^{+0.064}$	0.21	$657.2698 ^{+0.0014}_{-0.0015}$	910^{+210}_{-230}	$0.00152^{+0.00033}_{-0.00012}$	$0.0860^{+0.0013}_{-0.0017}$	$0.579^{+0.061}_{-0.097}$	15.73 ± 0.15	$2.05^{+0.29}_{-0.30}$	7.8 ± 3.3
2525	$3.9^{+1.1}_{-1.2}$	$0.68_{-0.35}^{+0.25}$	0.467	1326.1615 ± 0.0015	1190^{+540}_{-380}	$0.00138^{+0.00063}_{-0.00034}$	$0.155^{+0.091}_{-0.0080}$	$0.87_{-0.040}^{+0.17}$	$5.3^{+1.1}_{-0.20}$	$5.1^{+0.20}_{-1.1}$	12.3 ± 1.3
1421^{*}	1.40 ± 0.34	$0.61_{-0.11}^{+0.12}$	0.0907	524.2844 ± 0.0025	2230^{+960}_{-740}	$0.00068^{+0.00025}_{-0.00019}$	$0.0913^{+0.0018}_{-0.0031}$	$0.54^{+0.092}_{-0.22}$	$20.14_{-0.28}^{+0.32}$	$2.63^{+0.54}_{-0.62}$	10.2 ± 4.5
("Misfit	"Wisfit" Singles)										
4307	$1.12^{+0.61}_{-0.64}$	$0.61 ^{+0.10}_{-0.099}$	0.0329	$279.9881_{-0.0023}^{+0.0022}$	750 ± 440	$0.0008^{+0.0011}_{-0.00056}$	$0.0642^{+0.0015}_{-0.0010}$	$0.24_{-0.18}^{+0.24}$	$16.83_{-0.17}^{+0.18}$	$1.15^{+0.28}_{-0.069}$	6.8 ± 2.6
3349	$0.72^{+0.23}_{-0.43}$	$0.67_{-0.26}^{+0.22}$	0.00906	$271.8920^{+0.0081}_{-0.0084}$	500^{+400}_{-280}	$0.0016^{+0.0022}_{-0.00097}$	$0.0363^{+0.0019}_{-0.0018}$	$0.37_{-0.28}^{+0.29}$	$16.49_{-0.47}^{+0.41}$	$0.69^{+0.43}_{-0.098}$	3.8 ± 1.4
1870	$0.46^{+0.13}_{-0.11}$	$0.77^{+0.11}_{-0.096}$	0.329	$604.1071^{+0.0016}_{-0.0015}$	84^{+31}_{-22}	$0.0037^{+0.0034}_{-0.0027}$	$0.0723^{+0.0017}_{-0.0014}$	$0.21^{+0.21}_{-0.16}$	$11.04_{-0.13}^{+0.16}$	$0.83 \begin{array}{c} +0.15 \\ -0.037 \end{array}$	7.2 ± 6.3
1208*	$0.65_{-0.30}^{+0.31}$	0.52 ± 0.16	-0.0243	$249.4412_{-0.0016}^{+0.0015}$	65^{+73}_{-36}	$0.0096^{+0.0078}_{-0.0040}$	$0.0570^{+0.0016}_{-0.0025}$	$0.66^{+0.12}_{-0.40}$	$7.29^{+0.14}_{-0.12}$	$0.75^{+0.38}_{-0.32}$	7.0 ± 3.8
1174^{*}	$2.63_{-0.42}^{+0.43}$	$0.79_{-0.21}^{+0.15}$	0.564	$393.5944^{+0.0038}_{-0.0032}$	310^{+370}_{-88}	$0.00152_{-0.00098}^{+0.00053}$	$0.0343^{+0.0029}_{-0.0016}$	$0.42^{+0.30}_{-0.31}$	$8.98^{+0.23}_{-0.28}$	$0.37^{+0.33}_{-0.069}$	2.72 ± 0.15
1096*	$2.68_{-0.35}^{+0.36}$	$0.43^{+0.40}_{-0.33}$	0.183	$315.3283^{+0.0016}_{-0.0017}$	700^{+190}_{-160}	$0.00268 ^{+0.00065}_{-0.00041}$	$0.20^{+0.26}_{-0.083}$	$1.06^{+0.29}_{-0.12}$	$3.66^{+0.14}_{-0.10}$	$3.66^{+0.13}_{-0.10}$	16.6 ± 5.9
(EB-like	$\overline{}$										
1168(1)	$0.561 ^{+0.036}_{-0.040}$	$0.973^{+0.022}_{-0.074}$	0.008801	$608.26212_{-0.00044}^{+0.00042}$	$126.7^{+9.3}_{-9.1}$	$0.0154^{+0.0021}_{-0.0015}$	$0.42^{+0.11}_{-0.083}$	$1.20^{+0.12}_{-0.10}$	$4.716_{-0.055}^{+0.032}$	$4.716_{-0.055}^{+0.032}$	60 ± 30
1168(2)	$0.549_{-0.061}^{+0.042}$	$0.982^{+0.014}_{-0.035}$	0.008801	$1133.28366 {}^{+0.00039}_{-0.00041}$	120^{+11}_{-13}	$0.0168^{+0.0031}_{-0.0022}$	$0.44^{+0.14}_{-0.089}$	$1.22 {}^{+0.15}_{-0.10}$	$4.700^{+0.026}_{-0.032}$	$4.700^{+0.026}_{-0.032}$	63 ± 31

 † 各パラメータの範囲はフィット結果から導出している。惑星半径 R_o の誤差は kの分布と CFOP カタログから得られた R_\star の誤差に基づく。 † 2 回の STE を同一天体によるものと仮定し、その間隔から公転周期 $P=1106.243\pm0.007$ 日 を得た。 *** これらの系は STE 以外に既知惑星を持たないため、主星の平均密度 ρ_* に Gaussian で制限を与えてフィットを行っている。

表 4.3: エキセントリックプラネット候補惑星

		fiducial values		most conservati	ve values
KOI	P_s (days)	$P_{\text{Kep,min}}$ (days)	e_{\min}	$P_{\text{Kep,min}}$ (days)	e_{\min}
4307	750 ± 440	1311	0.27	335	•••
3349	500^{+400}_{-280}	1319	0.45	532	•••
1870	84^{+31}_{-22}	987	0.84	494	0.71
1208*	65^{+73}_{-36}	1342	0.91	340	0.68
1174*	310^{+370}_{-88}	1197	0.59	411	0.14
1096*	700^{+190}_{-160}	1276	0.29	487	•••

⁰ Note — In the "most conservative values," $P_{\mathrm{Kep,min}}$ は、公転周期が短く観測期間中にトランジットが 2 回以上起きているにも拘らず、1 回を除く他全てが観測のギャッ プに入っているものとしたときの公転周期の下限値であるが、そのような確率は非常 に小さい。

表 4.4: トランジットを起こす LPGs の存在頻度

	# of transiting LPG candidates	total # of $KOIs^{\dagger}$	fraction of transiting LP
既知惑星が2個以上の系	4	695	6×10^{-3}
既知惑星が1個だけの系	2	2963	7×10^{-4}

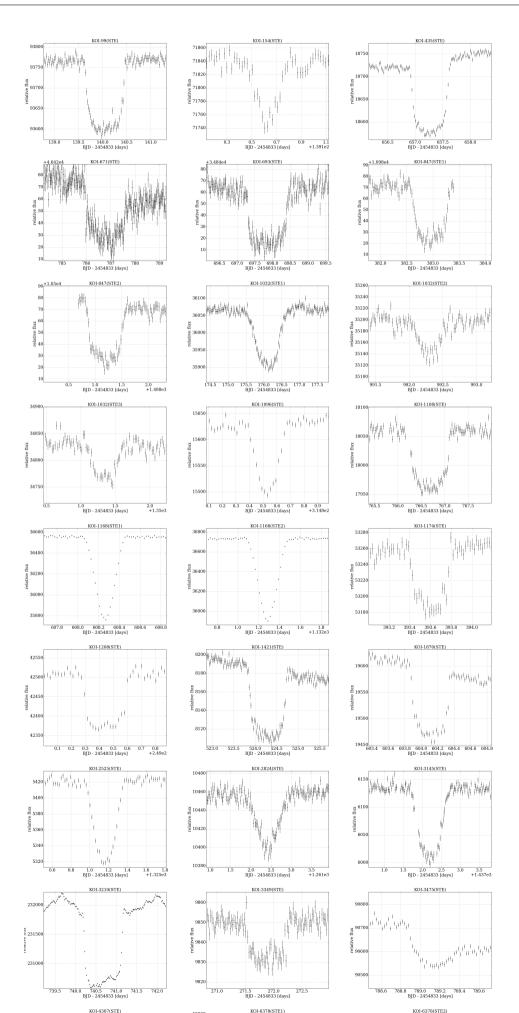
[†] false positive に認定されている候補は惑星候補に含めていない。

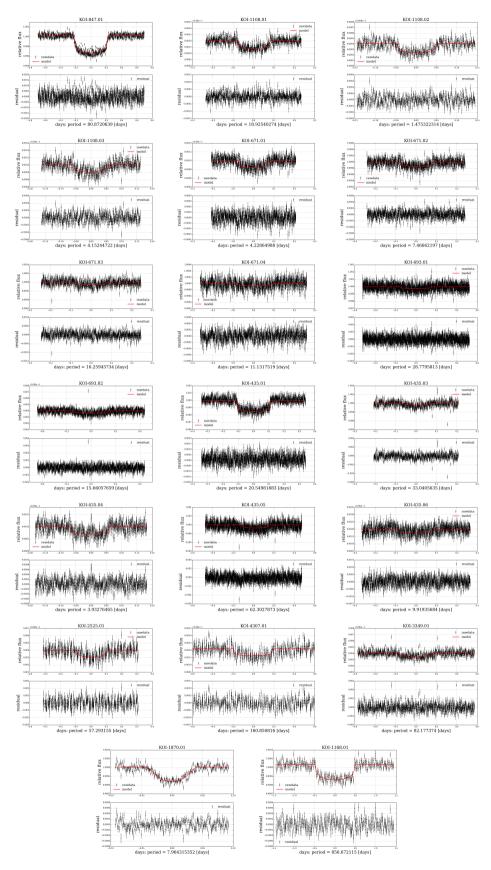
^{1 *} この1回のトランジットがケプラーチームにより惑星候補と認定されており、他に 既知の候補は存在しない。

appendix

Here we show the PDCSAP light curves of all the 28 STEs we found (Figure 2) and the phase-folded transit light curves of the inner candidates simultaneously fitted with the 16 STE light curves in Figure ?? (Figure 3).

第 4. DISCUSSION





⊠ 3: Fit to the phase-folded transits of the inner candidates for 10 of the systems without asterisks in Table 4.2. The black dots with error bars show the binned fluxes and the red solid line is the best-fit model obtained from the joint fit with the STE candidates.