

Direct Imaging Constraints on the Tidally Heated Exomoons

鵜山太智 (東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 M1)

Abstract

系外惑星を直接撮像する方法は、惑星についての情報を直接的に得られる事から大きなメリットがあるが、主星から離れた若いガス惑星しか見つけられないとされていた。しかし最近になって、理論上では潮汐力によって暖められた衛星 (Tidally Heated Exomoons、通称 THEMs) は直接撮像で検出できる可能性があるという論文 (Peters & Turner 2013) が発表された。この論文を基に、実際の天体について THEMs について議論していく。今回は、近傍の τ Cet、 ϵ Eri という二つの天体についてすばる望遠鏡を用いて撮像し、データ解析を行った。その結果、主星回りに伴星と思われる点状天体は検出できなかったが、すばる望遠鏡 HiCIAO の検出限界から THEMs の存在範囲に制限をつけることができた。もし系外衛星を直接撮像できるようになれば、地球型惑星を検出するよりも容易に地球型の天体を検出することができるかもしれない。そうなれば地球外生命についての議論も活発になり、これまで以上に系外惑星天文学の発展に繋がるだろう。

1 Introduction

1.1 Direct Imaging of Exoplanets

系外惑星が初めて確認されてから 20 年ほどで、現在では候補天体を含め 4000 以上の系外惑星が報告されている。系外惑星の検出方法はいくつかあり、現在見つかっているものは主に視線速度法、トランジット法という間接的に惑星を検出する方法によるものである。特に、これらの方法を採用しているケプラー衛星の観測によって検出数は一気に増加した。間接的な検出方法だけでなく、直接惑星を観測するという方法もある。直接撮像では、間接的な方法では得られない情報が得られる上に、間接的な方法と相補的な関係を築く事ができている。

1.2 Direct Imaging of Tidally Heated Exomoons

現在のところ、直接撮像で検出されるためには、主星から離れた所で明るいことが要求されるので、若くて主星から離れたガス惑星しか見つからないだろうとされている。ここに一石を投じる論文 (Peters & Turner 2013) が発表された。この論文では、潮汐力によって暖められた衛星 (Tidally Heated Exomoons: THEMs) は直接撮像で検出されるくらい明るい可能

性があるというのである。もしこういった天体が実際に存在すれば、直接撮像によるターゲットを増やすことができる上に、地球型の天体、ひいては地球外生命体についての議論もできるだろう。

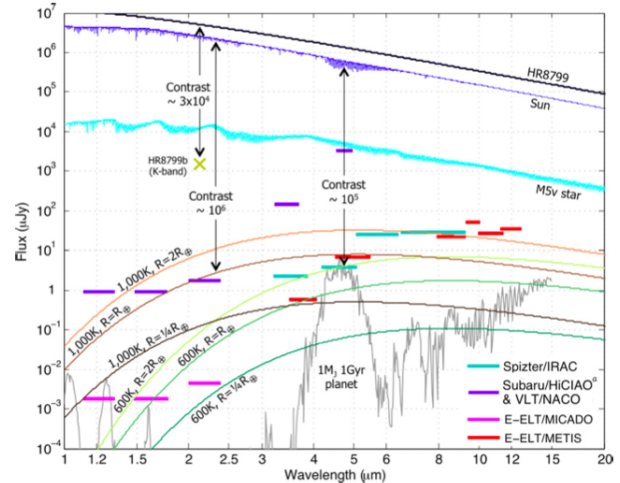


図 1: 上の三本の線は 5pc 離れた位置を仮定した恒星のフラックス、下の数色の曲線は温度、半径を変化させた THEMs のフラックス、グレーの線は $1M_J$ 、1Gyr、太陽系と同じ金属量、雲の無い惑星のフラックスを示している。カラーバーは各検出装置において 1 時間、 5σ での検出限界を示す。

上の図は各検出装置の検出限界を表している。今回

の HiCIAO による観測は H バンドなので、そこに着目してもらおうと 1000K で地球より大きな THEMIs は HiCIAO の検出限界を超えており、検出できる可能性がある。今回解析した 2 天体の光度は太陽の 30% ~ 50% なので、この図から判断すると HiCIAO を用いて H バンドで観測すると 10^6 のコントラストまで観測できるということがわかる。しかし、この論文では理論的な議論だけだったので、今回は実際の解析データと照らし合わせた議論を進めていく。

2 Observations and Analysis

今回解析した天体は τ Cet、 ϵ Eri という天体で太陽系に近く更に系外惑星が確認されている事から、様々なプロジェクトの観測対象となっている。観測データは、すばる望遠鏡において高コントラスト撮像装置 HiCIAO と補償光学装置 AO188 を用いて太陽系外惑星と円盤を探索する戦略枠 SEEDS によって行われたものを用いた。

2.1 τ Cet

τ Cet はくじら座にある天体で太陽に似ている恒星で、既に間接的な方法で系外惑星が確認されている。今回、二つの観測日におけるそれぞれの観測結果について解析した。

L[L _☉]	0.52±0.03
M[M _☉]	0.783±0.012
R[R _☉]	0.793±0.004
T _{eff} [K]	5444±50
Age[Gyr]	5.8
Distance[pc]	3.650±0.002

観測日: 2012 年 11 月 6 日、2013 年 1 月 1 日
波長:H バンド (1.65 μ m)

2.2 ϵ Eri

ϵ Eri はエリダヌス座にある恒星で、こちらも系外惑星が確認されており、更に現在のところ系外惑星

の存在する惑星系では二番目に太陽系に近い。

L[L _☉]	0.34
M[M _☉]	0.82±0.02
R[R _☉]	0.735±0.005
T _{eff} [K]	5084±5.9
Age[Gyr]	0.2-0.8
Distance[pc]	3.216±0.002

観測日: 2013 年 11 月 23 日

波長:H バンド (1.65 μ m)

2.3 Data reduction

恒星からの光やスペckルを取り除く為に、LOCI という角度差分解析システムを用いる。生データにはストライプパターンが存在しており、まずストライプを取り除く。次に、dark, flat, distortioin を補正し、最後に主星からの光を差し引いて画像を重ね合わせることで、最終的な画像を得ることができる。

3 Results

3.1 τ Cet

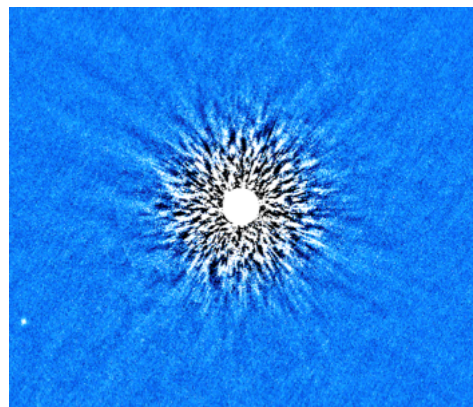


図 2: τ Cet の解析結果

上の画像は、2012 年 11 月 6 日に観測されたデータを LOCI システムで解析した結果である。左下に点状天体が見つかったが、固有運動を解析したところ、背景星の可能性が高いので THEMs についての議論は行わない。他に点状天体と思われるシグナルは見つからなかったため次に THEMs の存在範囲について制限をつけるための議論を行う。

3.2 ϵ Eri

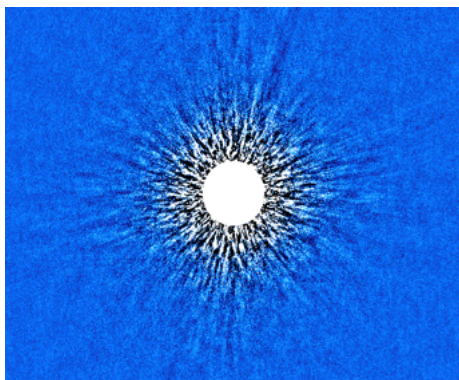


図 3: ϵ Eri の解析結果

同様に解析した結果、点状天体と思われるシグナルは見つからなかった。これより、THEMs の存在範囲についての制限をつけるための議論を行う。

4 Discussion

4.1 Constraints

次の二つのグラフは τ Cet、 ϵ Eri それぞれの系において、 5σ で検出できるフラックスを主星からのコントラストにしたものを主星からの距離の関数にして表したものである。言い換えると、これらのプロットより上にあれば 5σ 以上の精度で検出する事が可能であるという事になる。しかし、観測機器にも検出限界があるのでそれを考慮に入れる必要がある。H バンドにおける HiCIAO の検出限界は主星とのコントラストで 10^{-6} なので、青い線で引かれた部分になる。これを考慮に入れた結果、影のついた部分が検出

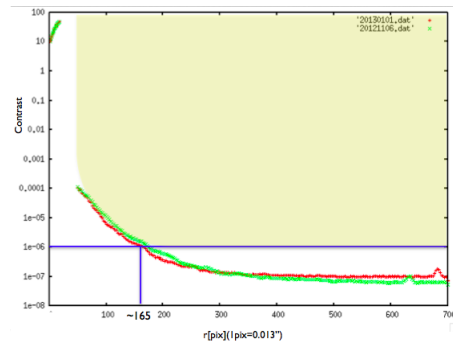


図 4: τ Cet におけるコントラスト

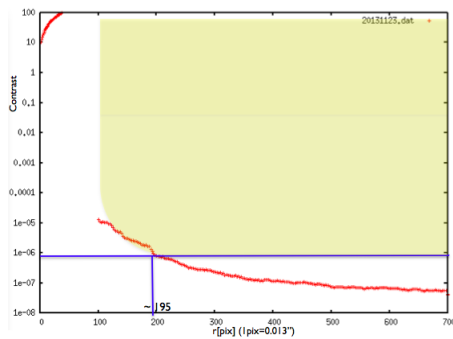


図 5: ϵ Eri におけるコントラスト

できる範囲ということになる。1000K の THEMs は青い線をほんの少し上回る程度なので、フラックスは基本的には青い線と同じとして考える。今回解析して THEMs と思われる点状天体が見つからなかったことから、この検出限界より、 τ Cet では 165[pix]、 ϵ Eri では 195[pix] より遠方では 1000K 以上、 $1R_{\oplus}$ 以上の THEMs は存在しないということになる。今回の解析結果、HiCIAO において $1\text{pix}=0.013''$ であることと、それぞれの天体までの距離から計算すると、どちらも主星から約 8AU より遠方においては 1000K 以上、 $1R_{\oplus}$ 以上の THEMs は存在しない、と言い換えることができる。

4.2 Assumptions and uncertainty

今回の議論の前提となる THEMs のフラックスは、この概念が提唱されたばかりで詳しい議論がなされておらず、現在は天体の表面から均等に黒体放射が出

ているという非常に簡単なものを想定してある。更に、潮汐力による加熱に関する様々なパラメータがあるのが、依存性の小さいものに関してはイオや地球の物理的パラメータを適用し、特に依存性の高い温度と半径の二つを変化させてフラックスを考えている。仮定が多い分不定性は大きいということを考慮しておかねばならない。

次に今回の解析結果において、 5σ での検出限界はノイズを全方向に対して平均を取り、そこから計算されている。しかしノイズは全方向に均質になっていないわけではなく、主星に近いほどノイズのばらつきも大きい。そのため、不定性が残っており実際は主星から更に離れた部分までしか制限できていないと考えるのが妥当である。これらの仮定に対する不定性を改善するには、系外衛星の物理的パラメータ、軌道パラメータをきちんと把握した上で観測、解析において生じるノイズを減らす必要がある。

4.3 Contrast

直接撮像において一番問題となっているのはどう高コントラストを得るか、ということである。HiCIAOではコントラストの限界から極端で理想的な THEMs しか写らないとされている。従って、解析手法をどう改善するというよりは、観測機器の検出限界を改善するという事に期待するところが大きい。今回は HiCIAO を用いて H バンドで撮像されたものだが、違う波長帯で観測すると現存する観測機器でも必要なコントラストを減らす事ができる。例えば図 1 において、スピッツァーの IRAC を用いて $4.5\mu\text{m}$ で観測すれば、600K 程度の THEMs も観測できる可能性があることがわかる。将来的な観測機器では更なる高コントラストが得られると期待される。実際に JWST や SPICA が運用されれば、300K から 500K で地球と同じ大きさの天体も検出可能と考えられている。

5 Conclusion

直接撮像によって潮汐力で暖められた系外衛星 (THEMs) の検出は可能であるという論文 (Peters &

Turner 2013) に基づいて、系外惑星の存在が既に確認されている近傍天体 η Cet と ϵ Eri を直接撮像したデータを解析する事で、THEMs について議論する。解析した結果、THEMs と思われる点状天体は見つからなかったが、見つからなかった事から今回の検出装置 HiCIAO の検出限界を元に THEMs の存在について制限をつけることはできる。ノイズを計算することで、どちらの惑星系においても 8AU より離れた所に 1000K 以上、 $1R_{\oplus}$ 以上の THEMs は存在しない、という制限をつけることができた。しかし、今回の議論において THEMs のフラックスは単純な黒体放射とする、ノイズは主星からの距離のみで考えるなど多数の仮定を設けており、不定性があるので本当に制限をつけられているのは 8AU より遠方にあるということを留意しておかなければいけない。直接撮像においてコントラストの改善が重要課題だが、今日稼働している観測機器で考えると、H バンドにおいて Subaru/HiCIAO で観測するより $4.5\mu\text{m}$ において Spitzer/IRAC で観測する方が検出に必要な主星と THEMs のコントラストは 1 桁ほど小さいため、こちらで観測するとまた違う結果が得られるかもしれない。また、将来的な観測装置では 300K~500K の THEMs でも検出可能と推定されている。

Acknowledgement

今回の解析を進めるにあたり、指導教官である田村教授を始め、SEEDS プロジェクトメンバーの日下部さんには LOCI の解析方法を教えて頂き、更に解析がうまくいかない時に様々なアドバイスを頂きました。また、東京工業大学佐藤研究室博士研究員の葛原さんにはコントラストを導出するプログラム、その使い方をご指導頂きました。本当にありがとうございました。

Reference

1. Peters & Turner (2013) 769:98 (8pp)
2. SEEDS project
http://seeds.mtk.nao.ac.jp/seeds/SEEDS_Project/TOP.html