

太陽系外惑星 TrES-2b の transit 観測

ー軌道傾斜角決定の試みー

池田 考蔵 神崎 志穂子 中川 裕聖 藤野 純平 藤原 慎太郎

兵庫県立神戸高等学校 総合理学科 2 年

私たちは2015年9月18日に兵庫県立大学自然・環境科学研究所、天文科学センター西はりま天文台60cm望遠鏡を用いて太陽系外惑星TrES-2bのtransit観測を行った。観測にはRフィルターを用いた。私たちはこの観測で光度曲線を得ることに成功し、得られた光度曲線からtransit継続時間を109.7分、軌道傾斜角を 84.02° と割り出した。

1. はじめに

transit法とは太陽系外惑星が恒星面通過を起こすときにその減光をとらえる太陽系外惑星の観測方法である。transit法は太陽系外惑星の発見、またその性質を突き止めるうえで最も強力な方法の一つである。恒星面通過を起こす天体は非常にまれであるがtransit法による観測からはほかの観測では得られないデータを得ることができる。そのため、ケプラーミッションなども太陽系外惑星の調査にtransit法を用いている。transit観測で得られた光度曲線からは惑星半径や軌道傾斜角などの重要な物理量のデータが得られる。それゆえ、正確な光度曲線は非常に価値の大きいものである。私たちはその中でも軌道傾斜角に注目して研究を行った。なぜ軌道傾斜角に注目したのかというと軌道傾斜角の変化を捉えることで「第三の」天体の存在を示すことができるからである。軌道傾斜角の変化は「第三の」天体の重力の影響によって引き起こされる。これは月や人工衛星の軌道傾斜角の変化についても同じである。

また、TrES-2bについて、D. Mislis et al (2009) [1] は軌道傾斜角が同じ方向に一年に約 0.076° ずつ変化していき、2035年ごろにはtransit現象を起こさなくなる可能性があると述べ、Laird M. Close et al (2010) [3] は軌道傾斜角は変化していないと述べた。ここで、これらの論文に出されている光度曲線はいずれも2006年から2009年の間の観測から得られたものであり、もし軌道傾斜角が変化し続けているとすれば2015年の私たちの観測で得た光度曲線にはより顕著な変化が現れるはずである。また、これらの論文に出されている光度曲線をあわせて、わずか11個でありひとつひとつのデータのもつ意味は大きい。

以上のことから今回私たちが観測を行うことは非常に有意義であると考え観測を行った。

D. Mislis et al. や Laird M. Close et al. によると、TrES-2b は 2006 年に TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey) プロジェクトでtransit法による観測で発見された太陽系外惑星であり、主星であるTrES-2は半径、質量ともほぼ太陽と同じである。また、TrES-2bの軌道長半径は0.037AU、惑星質量は木星質量の1.198倍、惑星半径は木星半径の1.222倍である。さらに、TrES-2bは主星のふちをかすめるような恒星面通過を起こすため、軌道傾斜角の変化がそのtransit継続時間に大きく影響し、その変化をとらえることが容易である。

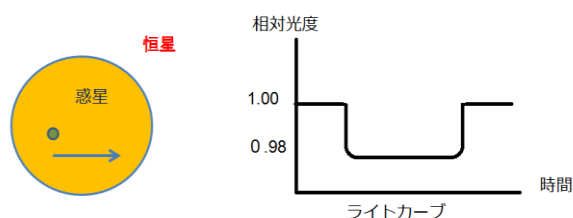


図1: 恒星面通過のモデル 図2: 光度曲線のモデル

2. 軌道傾斜角の求め方

D. Mislis et al (2009) [1] に軌道傾斜角の求め方として軌道傾斜角とtransit継続時間の関係式があげられていたが、その導入方法は示されていなかったため、独自にその導入方法を調べた。

恒星と惑星及びその公転軌道をすべて円とみなし、恒星を地球方向から見た図を考える(図3)。その際、惑星の公転軌道は楕円となる。ここで、恒星半径を R_s 、惑星半径を R_p 、惑星の公転軌道の半径を a 、軌道傾斜角を i 、惑星の公転周期を P 、transit継続時間を D とおく。すると、恒星の中心を原点としたとき、原点中心で半径が $R_s + R_p$ である円と惑星の公転

軌道について以下の2式を導くことができる。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (R_s + R_p)^2 \\ \left(\frac{x}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{y}{\alpha \cos i}\right)^2 = 1 \end{cases}$$

この2式の連立方程式を x について解き交点の x 座標を求めると、

$$x = \frac{\pm \sqrt{(R_s + R_p)^2 - \alpha^2 \cos^2 i}}{\sin i}$$

となる。よって図5において

$$\alpha \sin \left(180^\circ \times \frac{D}{P} \right) = \frac{\sqrt{(R_s + R_p)^2 - \alpha^2 \cos^2 i}}{\sin i}$$

が成り立つ。

よってこの式の R_s 、 R_p 、 α 、 P に既知の値を代入し、 D に観測で得られた t_{sansit} 継続時間を代入することで軌道傾斜角 i を求めることができる。

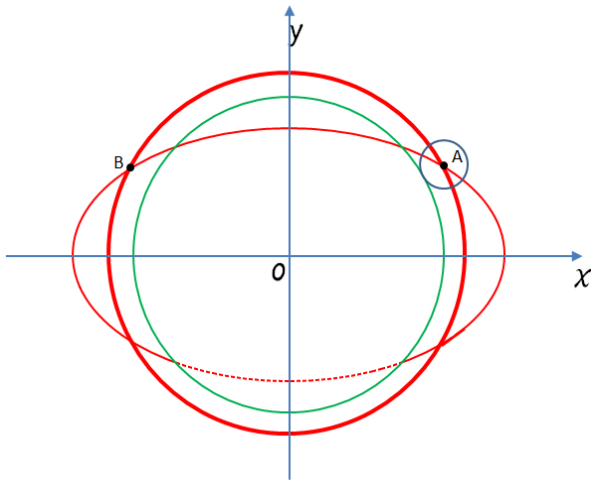


図3: 恒星を地球方向から見た図。緑の円が恒星、赤の円が半径 $R_s + R_p$ の円、赤い楕円が惑星の公転軌道。

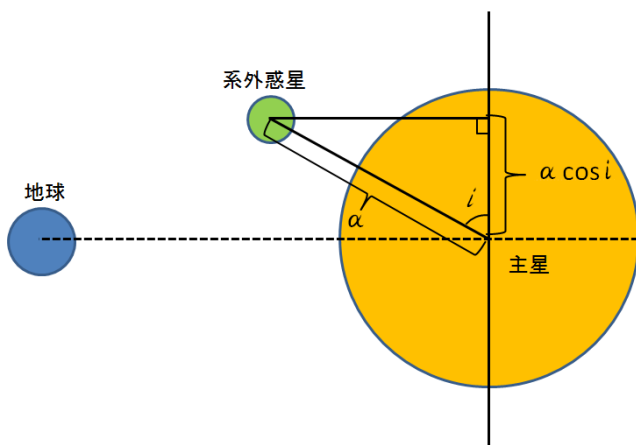


図4: transit中央時間に惑星、恒星、地球の中心を通る平面で切断した図

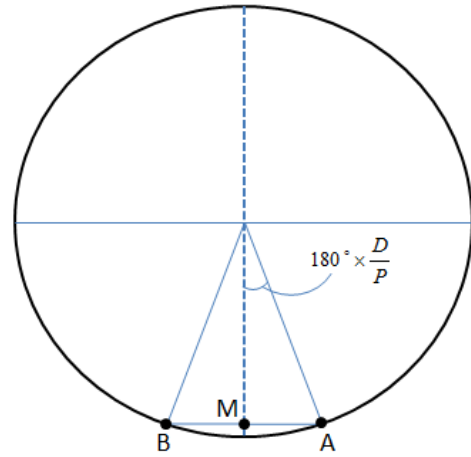


図5: 惑星の公転面に垂直な方向から惑星の公転軌道を見た図

3. 観測方法

観測は2015年9月18日に兵庫県立大学自然・環境科学研究所、天文科学センター西はりま天文台60cm望遠鏡(図6)を用いて行った。観測にはRフィルターを用いた。

主星 TrES-2 と以下の3つの比較星*、あわせて4つの星について測光観測を行った。

比較星*: 変光しないで、主星の明るさの変化を知るための基準となる星のこと。

比較星1: 2MASSJ19070093+4917323

比較星2: 2MASSJ19065809+2916315

比較星3: TYC 3550-1224-1

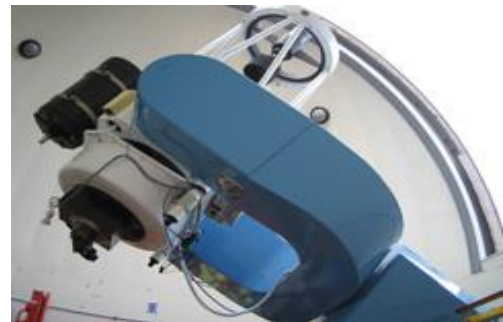


図6: 兵庫県立大学天文科学センター西はりま天文台60cm望遠鏡

観測装置: SBIG ST-L (視野: 11.6" x 11.6"), フィルター: B, V, R) 4K 冷却 CCD カメラ

4. 解析方法

解析にはすばる画像処理ソフト Makalii ver2.0c(国立天文台作成)を用いた。解析方法は以下のとおりである。

1. あらかじめ撮影しておいたダーク画像やフラット画像を重ね合わせ、加算平均をとり、補正用画像を作成した。

2. 作成した補正用画像を用いて天体画像のダーク処理*、フラット処理*を行った。
3. 雲がかかるなどして画像が不鮮明だった箇所について、画像を5枚ごとに重ね合せ、加算平均をとった。

4. 補正した天体画像でTrES-2と3つの比較星について開口測光を行った。このときスカイ処理*も同時に自動で行った。

ダーク処理*: CCDに起因する電荷を取り除くための処理。シャッターを閉じたままダーク画像を撮影し、天体画像から減算する。

フラット処理*: CCDの感度むらを取り除くための処理。一様光源を撮影し、天体画像を除算する。

スカイ処理*: 地球大気に起因する誤差をなくすための処理。

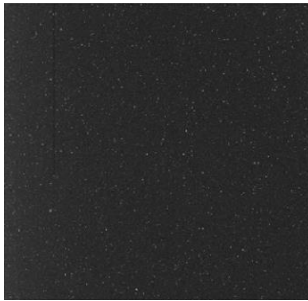


図 7: ダーク画像

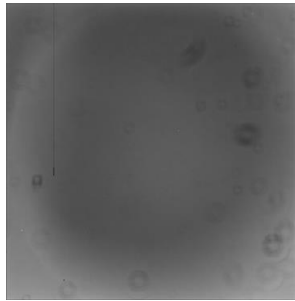


図 8: フラット画像

5. 結果

解析の結果図 9 を得た。また、図 11 (次頁に掲載) に示した光度曲線を得た。77 枚目からは露出時間を 60 秒から 30 秒に変更したためプロットの間隔が広がっている。また、136-180 枚目の画像は不鮮明だったために 5 枚ずつ重ね合わせをして加算平均をとった。また、平均値から標準偏差の 2 倍以上ずれているものは外れ値として取り除いた。

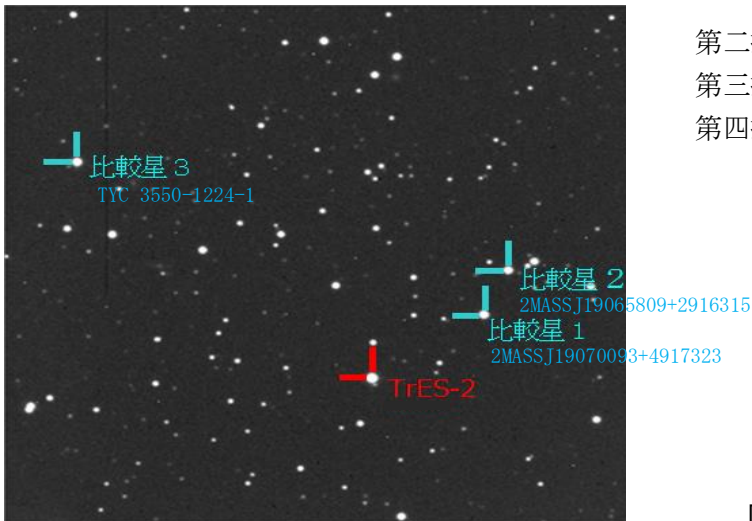


図 9: 処理後天体画像の例

6. 考察及び結論

図 11 の赤色の枠で囲んだ部分を第一接触*から第二接触*、緑色で囲んだ部分を第三接触*から第四接触*と判断した。第一接触から第二接触についてはグラフの形状及び ETD(exoplanet transit database)に示されていた in の予測時間に近いことから判断した。第三接触から第四接触についてはグラフに明確に表れていると判断した。しかし、第一接触付近より前のグラフが乱れてしまっている。これは 77 枚目まで写真の露出時間を 60 秒と長くとり過ぎていたために光子が CCD のセルからあふれてしまったためと考えられる。そこで第一接触から第二接触にかけての部分延長し、第四接触後の主星が減光していないと考えられる状態の相対光度に達する時刻を調べ、そこを正確な in の時刻と仮定して transit 継続時間を求め、軌道傾斜角を求めた。その結果 transit 継続時間は 109.7 分、軌道傾斜角は 84.02° と求められた。

Laird M. Close et al (2010) [3] であげられていた過去の transit 観測の結果得られた軌道傾斜角は図 12 (次頁に掲載) のとおりである。また、軌道傾斜角が変化し続けていると仮定した場合、私たちが観測を行った時刻における軌道傾斜角の予測値は 82.89° である。

軌道傾斜角が 82.89° だった場合 transit 継続時間は約 80 分であり私たちの割り出した transit 継続時間よりも約 30 分短い。私たちの得た transit 継続時間はある程度の誤差を含んでいると考えられるが、30 分もの誤差を含んでいる可能性は低い。

以上より、私たちは軌道傾斜角が一定の方向に変化し続けている可能性は低いと結論づけた。

第一接触*: 恒星面通過が起こるとき、地球方向から見て惑星が恒星にはじめて外接する時刻。

第二接触*: 惑星が恒星にはじめて内接する時刻。

第三接触*: 惑星が恒星に二度目に内接する時刻。

第四接触*: 惑星が恒星に二度目に外接する時刻。

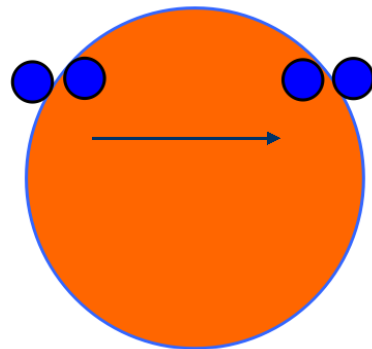


図 10: 左から第一接触、第二接触、第三接触、第四接触

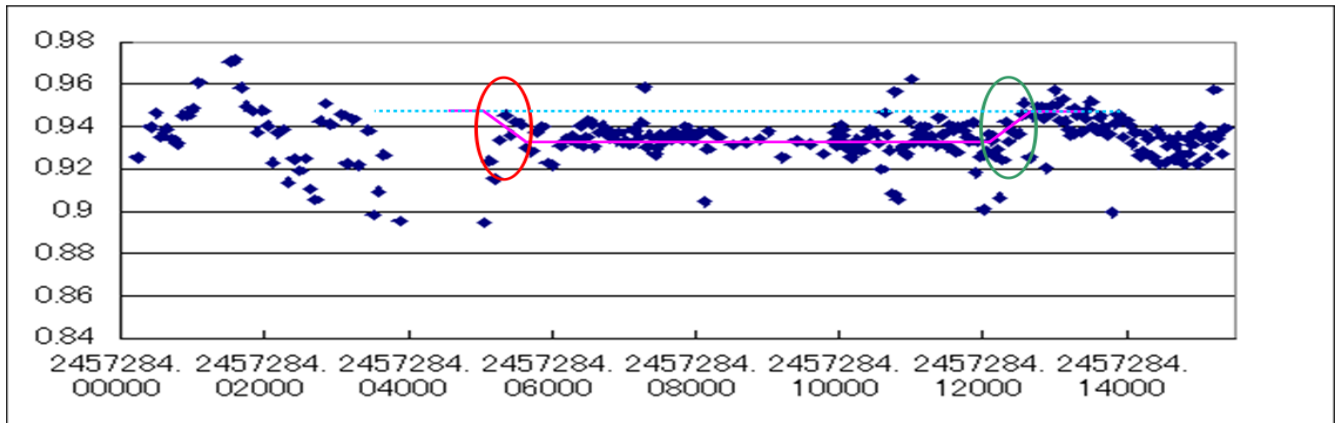


図 11: 縦軸に比較星と主星の等級差の平均値、横軸にユリウス日をとった光度曲線のグラフ。
青い点線は減光していないときの主星の明るさ。

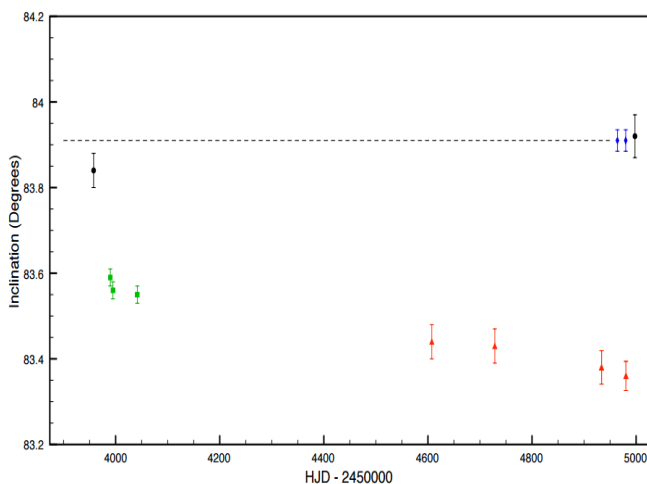


図 12: 縦軸に軌道傾斜角、横軸にユリウス日がある。軌道傾斜角が変化している根拠とされた値は緑の点および赤い点で示された値である。緑の点は Holman et al による観測で、赤い点は Mislis et al による観測で得られた値である。また、変化していない根拠とされた値は黒い点および青い点示された値である。黒い点は O'Donovan et al による観測で得られた値であり、青い点は Gilliland et al によるケプラー望遠鏡を用いた観測で得られた値である。また、点線は Gilliland et al による観測で得られた値に基づくものである。Laird M. Close et al (2010) [3] より引用。

7. おわりに

本研究は 60cm 望遠鏡と CCD カメラのみの簡単な実験系で学生でも科学の最先端に触れることができるという点において非常に価値の大きい研究であったが、その難易度はとても高かった。私たちも 4 度観測に挑戦したが天気などの影響で実際に観測ができたのは 1 度だけだった。得られた光度曲線についてもはじめの部分が乱れていたり、最後の部分でな

ぜ減光しているのかがわからなかったりと、あまり正確と言えるものではなかった。しかし、そのような厳しい状況の中で試行錯誤を繰り返したことはとても良い経験となった。

最後に、本研究を進めるにあたり、観測にご協力下さった西はりま天文台のみなさん、プログレスレポートや中間発表等で研究に対する助言をいただいた方々、そして担当教諭の杉木勝彦先生にこの場をかりて感謝を申し上げます。

[参考文献・参考 URL]

- [1] D. Mislis et al. 2009 “Detection of orbital parameter in the TrES-2 exoplanet?” A&A, 500
- [2] D. Mislis et al. 2010 “Multi-band transit observations of the TrES-2b exoplanet” A&A, 510
- [3] Laird M. Close et al. 2010 “ON THE APPARENT ORBITAL INCLINATION CHANGE OF THE EXTRASOLAR TRANSITING PLANET TrES-2b” ApJ, 714
- [4] S. Faigler and T. Mazeh. 2015 “BEER analysis of Kepler and CoRoT light curves: II. Evidence for superrotation in the phase curves of three Kepler hot Jupiters” ApJ, 771
- [5] S. SEAGER AND G. MALLEN-ORNELAS. 2002 “A UNIQUE SPLITTING OF PLANET-BAND STAR PARAMETERS FROM AN EXTRASOLAR PLANET TRANSIT LIGHT CURVE” ApJ, 585
- [6] 平野 照幸, 2012, トランジット惑星を用いた惑星の軌道傾斜角の測定と惑星移動理論, 天文月報
- [7] 成田 憲保, 2012, トランジット惑星探しの歴史, 天文月報
- [5] 西はりま天文台 HP
www.nhao.jp (cited 12/28)
- [6] Exoplanet Transit Database
var2.astro.cz/ETD/pred (cited 9/19)