

## Article Analysis: "The First Habitable Zone Earth-sized Planet from TESS"

### ABSTRACT

#### Özet

- TOI-700 yıldız sistemi keşfedildi (31.1 pc uzaklıkta M2 cüce yıldız).
- Üç gezegen: 1-2.6  $R_{\oplus}$  yarıçap aralığında, 9.98-37.43 günlük yörüngeler.
- Dış gezegen TOI-700d, yaşanabilir bölgede (Dünya insolasyonunun %86'sı).
- Yıldız düşük aktiviteli; atmosferik çalışmalar için ideal.

#### Abstract

- The TOI-700 star system was discovered (an M2 dwarf at 31.1 pc).
- Three planets: radii between 1 and 2.6  $R_{\oplus}$ , orbital periods 9.98 to 37.43 days.
- Outer planet TOI-700d lies in the Habitable Zone (86% of Earth's insolation).
- The star exhibits low activity, ideal for atmospheric studies.

## 1. INTRODUCTION

### Giriş

- Kepler misyonu, M-cücelerinde küçük gezegenlerin yaygınlığını ortaya koydu.
- TRAPPIST-1 gibi sistemler çoklu gezegen araştırmalarında öncü oldu.
- TESS, yakın ve parlak M-cücelerini hedefleyerek takip çalışmalarına uygun adaylar sağlıyor.
- TOI-700, üç küçük gezegenle (biri HZ'de) keşfedilen parlak bir M-cücesidir.

### Introduction

- The Kepler mission revealed the prevalence of small planets around M dwarfs.
- Systems like TRAPPIST-1 have pioneered multi-planet studies.
- TESS targets nearby bright M dwarfs, providing promising follow-up candidates.
- TOI-700 is a bright M dwarf hosting three small planets, one in the Habitable Zone.

## 2. TESS OBSERVATIONS AND INITIAL VETTING

### Gözlemler ve İlk Eleme

- TOI-700, TESS tarafından 11 sektörde gözlemlendi (Southern CVZ).
- SPOC pipeline, 3 gezegen adayı belirledi: 9.98, 16.05, 37.42 günlük periyotlar.
- DAVE ve DV analizleri sahte pozitif senaryoları eliyor.
- Yıldızın M-cücesi olduğu renk verileriyle doğrulandı.

## TESS Observations and Initial Vetting

- TOI-700 was observed in 11 TESS sectors (Southern Continuous Viewing Zone).
- SPOC pipeline identified 3 planet candidates with periods of 9.98, 16.05, and 37.42 days.
- DAVE and DV analyses ruled out false positives.
- The star's M dwarf nature confirmed by color data.

## 3. DETERMINING THE PROPERTIES OF TOI-700

### TOI-700 Özelliklerinin Belirlenmesi

- Empirik parametreler: MKs-boyut ilişkisiyle yıldız kütlesi ( $0.416 M_{\odot}$ ), yarıçap ( $0.42 R_{\odot}$ ), sıcaklık (3480 K).
- Spektroskopi (SOAR/Goodman) M2 tayf tipini doğruladı.
- Yaş tahmini: düşük aktivite, 54 günlük dönüş, kinematik veriler  $>1.5$  Gyr yaş gösteriyor.

### Determining TOI-700 Properties

- Empirical parameters: mass ( $0.416 M_{\odot}$ ), radius ( $0.42 R_{\odot}$ ), temperature (3480 K) via MKs-radius relations.
- Spectroscopy (SOAR/Goodman) confirmed M2 spectral type.
- Age estimate: low activity, 54-day rotation, kinematics indicate  $>1.5$  billion years.

## 4. MEASURING THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE PLANETS

### Gezegenlerin Fiziksel Özelliklerinin Ölçümü

- Fotometrik modelleme: TESS verileri + exoplanet yazılımı.
- Yarıçaplar: TOI-700b ( $1.01 R_{\oplus}$ ), c ( $2.63 R_{\oplus}$ ), d ( $1.19 R_{\oplus}$ ).
- TOI-700d: HZ'de, 0.86 Dünya insolasyonu, yüksek kayalık potansiyel.

### Measuring Physical Properties of the Planets

- Photometric modeling using TESS data + exoplanet software.
- Radii: TOI-700b ( $1.01 R_{\oplus}$ ), c ( $2.63 R_{\oplus}$ ), d ( $1.19 R_{\oplus}$ ).
- TOI-700d in HZ, receiving 0.86 Earth insolation, likely rocky.

## 5. SYSTEM VALIDATION

### Sistemin Doğrulanması

- Yüksek çözünürlüklü görüntüleme (Gemini/Zorro) ile yakın yoldaş yıldız yok.
- Spektroskopi (CHIRON): düşük RV değişimi, büyük gezegen olmadığını gösteriyor.

- VESPA analizi: sahte pozitif olasılığı <1%.

### **System Validation**

- High-resolution imaging (Gemini/Zorro) shows no nearby companion stars.
- Spectroscopy (CHIRON) reveals low RV variation, no large planets.
- VESPA analysis: false positive probability <1%.

## **6. GRAVITATIONAL DYNAMICS**

### **Gravitasyonel Dinamikler**

- Mercury6 simülasyonları, sistemin >1 milyar yıl kararlı olduğunu gösterdi.
- TTV analizi gezegen kütlelerine zayıf kısıtlar koydu (TOI-700c:  $\rho < 1.9 \text{ g/cm}^3$ ).
- QATS algoritması, başka geçiş sinyali bulamadı.

### **Gravitational Dynamics**

- Mercury6 simulations show system stable for over 1 billion years.
- TTV analysis weakly constrains planet masses (TOI-700c density  $<1.9 \text{ g/cm}^3$ ).
- QATS algorithm finds no additional transit signals.

## **7. DISCUSSION**

### **Tartışma**

- Sistem mimarisi: 2 kayalık + 1 sub-Neptün gezegen.
- Düşük yıldız aktivitesi, TOI-700d atmosfer stabilitesini artırıyor.
- JWST ile TOI-700c atmosferi incelenebilir, TOI-700d ise daha zor.

### **Discussion**

- System architecture: unusual with 2 rocky and 1 sub-Neptune planets.
- Low stellar activity enhances TOI-700d's atmospheric retention chances.
- JWST can characterize TOI-700c atmosphere; TOI-700d is challenging.

## **8. CONCLUSIONS**

### **Sonuçlar**

- TOI-700d, TESS tarafından keşfedilen ilk HZ'deki Dünya boyutunda gezegendir.
- Sistem çoklu gezegen yapısı ve düşük yıldız aktivitesi ile dikkat çekiyor.
- TESS genişletilmiş görev kapsamında 11 sektör daha gözlem yapacak.

## Conclusions

- TOI-700d is the first Earth-sized planet discovered in the HZ by TESS.
- The system stands out due to its multi-planet architecture and low stellar activity.
- TESS will observe 11 more sectors during its extended mission.

## GENEL SORULAR / NOTES

### 1. TOI-700d'nin kütlesi neden RV ile ölçülemiyor?

Yıldız aktivitesi (54 günlük dönüş) 0.5-1 m/s'lik RV sinyallerini maskeleyebilir. Yüksek hassasiyetli ESPRESSO gibi cihazlar gerek.

### Why can't TOI-700d's mass be measured by RV?

Stellar activity (54-day rotation) masks RV signals of 0.5–1 m/s. High-precision instruments like ESPRESSO required.

### 2. JWST ile TOI-700d atmosferi gözlemlenebilir mi?

Zorlu, 100+ geçiş gerekebilir. TOI-700c daha uygun (TSM=73.64).

### Can JWST observe TOI-700d's atmosphere?

Challenging, requiring 100+ transits. TOI-700c is more feasible (TSM=73.64).

### 3. Kayalık gezegenler (b/d) neden farklı evrimleşti?

Muhtemel hipotez: TOI-700c dış diskte oluşup içe göç etti; b ve d yerinde oluştu.

### Why did rocky planets (b/d) evolve differently?

Likely hypothesis: TOI-700c formed farther out and migrated inward; b and d formed in place.

## Analiz Sonucu:

Makale, sistematik keşif ve doğrulama metodolojisi sunar. TOI-700d, HZ'de Dünya boyutunda gezegen arayışında dönüm noktasıdır. Okur, SPOC, DAVE, VESPA uygulamaları ve fotometri, spektroskopi, dinamik veri entegrasyonuna odaklanmalıdır.

## Analysis Summary:

The paper presents a systematic discovery and validation methodology. TOI-700d is a milestone in the search for Earth-sized planets in the HZ. Readers should focus on SPOC, DAVE, VESPA applications and integration of photometric, spectroscopic, and dynamical data.

## ABSTRACT

### Özet

- TOI-700 yıldız sistemi keşfedildi (31.1 pc uzaklıkta M2 cüce yıldız).
- Üç gezegen: 1-2.6  $R_{\oplus}$  yarıçap aralığında, 9.98-37.43 günlük yörüngeler.
- Dış gezegen TOI-700d, yaşanabilir bölgede (Dünya insolasyonunun %86'sı).
- Yıldız düşük aktiviteli; atmosferik çalışmalar için ideal.

## Abstract

- The TOI-700 star system was discovered (an M2 dwarf at 31.1 pc).
- Three planets: radii between 1 and 2.6  $R_{\oplus}$ , orbital periods 9.98 to 37.43 days.
- Outer planet TOI-700d lies in the Habitable Zone (86% of Earth's insolation).
- The star exhibits low activity, ideal for atmospheric studies.

## 1. INTRODUCTION

### Giriş

- Kepler misyonu, M-cücelerinde küçük gezegenlerin yaygınlığını ortaya koydu.
- TRAPPIST-1 gibi sistemler çoklu gezegen araştırmalarında öncü oldu.
- TESS, yakın ve parlak M-cücelerini hedefleyerek takip çalışmalarına uygun adaylar sağlıyor.
- TOI-700, üç küçük gezegenle (biri HZ'de) keşfedilen parlak bir M-cücesidir.

### Introduction

- The Kepler mission revealed the prevalence of small planets around M dwarfs.
- Systems like TRAPPIST-1 have pioneered multi-planet studies.
- TESS targets nearby bright M dwarfs, providing promising follow-up candidates.
- TOI-700 is a bright M dwarf hosting three small planets, one in the Habitable Zone.

## 2. TESS OBSERVATIONS AND INITIAL VETTING

### Gözlemler ve İlk Eleme

- TOI-700, TESS tarafından 11 sektörde gözlemlendi (Southern CVZ).
- SPOC pipeline, 3 gezegen adayı belirledi: 9.98, 16.05, 37.42 günlük periyotlar.
- DAVE ve DV analizleri sahte pozitif senaryoları eliyor.
- Yıldızın M-cücesi olduğu renk verileriyle doğrulandı.

### TESS Observations and Initial Vetting

- TOI-700 was observed in 11 TESS sectors (Southern Continuous Viewing Zone).
- SPOC pipeline identified 3 planet candidates with periods of 9.98, 16.05, and 37.42 days.
- DAVE and DV analyses ruled out false positives.
- The star's M dwarf nature confirmed by color data.

## 3. DETERMINING THE PROPERTIES OF TOI-700

### TOI-700 Özelliklerinin Belirlenmesi

- Empirik parametreler: MKs-boyut ilişkisiyle yıldız kütlesi ( $0.416 M_{\odot}$ ), yarıçap ( $0.42 R_{\odot}$ ), sıcaklık (3480 K).
- Spektroskopi (SOAR/Goodman) M2 tayf tipini doğruladı.
- Yaş tahmini: düşük aktivite, 54 günlük dönüş, kinematik veriler  $>1.5$  Gyr yaş gösteriyor.

#### **Determining TOI-700 Properties**

- Empirical parameters: mass ( $0.416 M_{\odot}$ ), radius ( $0.42 R_{\odot}$ ), temperature (3480 K) via MKs-radius relations.
- Spectroscopy (SOAR/Goodman) confirmed M2 spectral type.
- Age estimate: low activity, 54-day rotation, kinematics indicate  $>1.5$  billion years.

### **4. MEASURING THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE PLANETS**

#### **Gezegenlerin Fiziksel Özelliklerinin Ölçümü**

- Fotometrik modelleme: TESS verileri + exoplanet yazılımı.
- Yarıçaplar: TOI-700b ( $1.01 R_{\oplus}$ ), c ( $2.63 R_{\oplus}$ ), d ( $1.19 R_{\oplus}$ ).
- TOI-700d: HZ'de, 0.86 Dünya insolasyonu, yüksek kayalık potansiyel.

#### **Measuring Physical Properties of the Planets**

- Photometric modeling using TESS data + exoplanet software.
- Radii: TOI-700b ( $1.01 R_{\oplus}$ ), c ( $2.63 R_{\oplus}$ ), d ( $1.19 R_{\oplus}$ ).
- TOI-700d in HZ, receiving 0.86 Earth insolation, likely rocky.

### **5. SYSTEM VALIDATION**

#### **Sistemin Doğrulanması**

- Yüksek çözünürlüklü görüntüleme (Gemini/Zorro) ile yakın yoldaş yıldız yok.
- Spektroskopi (CHIRON): düşük RV değişimi, büyük gezegen olmadığını gösteriyor.
- VESPA analizi: sahte pozitif olasılığı  $<1\%$ .

#### **System Validation**

- High-resolution imaging (Gemini/Zorro) shows no nearby companion stars.
- Spectroscopy (CHIRON) reveals low RV variation, no large planets.
- VESPA analysis: false positive probability  $<1\%$ .

### **6. GRAVITATIONAL DYNAMICS**

#### **Gravitasyonel Dinamikler**

- Mercury6 simülasyonları, sistemin >1 milyar yıl kararlı olduğunu gösterdi.
- TTV analizi gezegen kütlelerine zayıf kısıtlar koydu (TOI-700c:  $\rho < 1.9 \text{ g/cm}^3$ ).
- QATS algoritması, başka geçiş sinyali bulamadı.

### Gravitational Dynamics

- Mercury6 simulations show system stable for over 1 billion years.
- TTV analysis weakly constrains planet masses (TOI-700c density  $< 1.9 \text{ g/cm}^3$ ).
- QATS algorithm finds no additional transit signals.

## 7. DISCUSSION

### Tartışma

- Sistem mimarisi: 2 kayalık + 1 sub-Neptün gezegen.
- Düşük yıldız aktivitesi, TOI-700d atmosfer stabilitesini artırıyor.
- JWST ile TOI-700c atmosferi incelenebilir, TOI-700d ise daha zor.

### Discussion

- System architecture: unusual with 2 rocky and 1 sub-Neptune planets.
- Low stellar activity enhances TOI-700d's atmospheric retention chances.
- JWST can characterize TOI-700c atmosphere; TOI-700d is challenging.

## 8. CONCLUSIONS

### Sonuçlar

- TOI-700d, TESS tarafından keşfedilen ilk HZ'deki Dünya boyutunda gezegendir.
- Sistem çoklu gezegen yapısı ve düşük yıldız aktivitesi ile dikkat çekiyor.
- TESS genişletilmiş görev kapsamında 11 sektör daha gözlem yapacak.

### Conclusions

- TOI-700d is the first Earth-sized planet discovered in the HZ by TESS.
- The system stands out due to its multi-planet architecture and low stellar activity.
- TESS will observe 11 more sectors during its extended mission.

## GENEL SORULAR / NOTES

### 1. TOI-700d'nin kütlesi neden RV ile ölçülemiyor?

Yıldız aktivitesi (54 günlük dönüş) 0.5-1 m/s'lık RV sinyallerini maskeleyebilir. Yüksek hassasiyetli ESPRESSO gibi cihazlar gerek.

### **Why can't TOI-700d's mass be measured by RV?**

Stellar activity (54-day rotation) masks RV signals of 0.5–1 m/s. High-precision instruments like ESPRESSO required.

### **2. JWST ile TOI-700d atmosferi gözlemlenebilir mi?**

Zorlu, 100+ geçiş gerekebilir. TOI-700c daha uygun (TSM=73.64).

### **Can JWST observe TOI-700d's atmosphere?**

Challenging, requiring 100+ transits. TOI-700c is more feasible (TSM=73.64).

### **3. Kayalık gezegenler (b/d) neden farklı evrimleşti?**

Muhtemel hipotez: TOI-700c dış diskte oluşup içe göç etti; b ve d yerinde oluştu.

### **Why did rocky planets (b/d) evolve differently?**

Likely hypothesis: TOI-700c formed farther out and migrated inward; b and d formed in place.

### **Analiz Sonucu:**

Makale, sistematik keşif ve doğrulama metodolojisi sunar. TOI-700d, HZ'de Dünya boyutunda gezegen arayışında dönüm noktasıdır. Okur, SPOC, DAVE, VESPA uygulamaları ve fotometri, spektroskopi, dinamik veri entegrasyonuna odaklanmalıdır.

### **Analysis Summary:**

The paper presents a systematic discovery and validation methodology. TOI-700d is a milestone in the search for Earth-sized planets in the HZ. Readers should focus on SPOC, DAVE, VESPA applications and integration of photometric, spectroscopic, and dynamical data.