



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΦΥΣΙΚΗ»
(ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ)

Αναζήτηση δακτυλίων γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες με
φωτομετρικές παρατηρήσεις από το διαστημικό τηλεσκόπιο
Kepler

Παπαδοπούλου Όλγα
ΑΜ: 2018313

Διπλωματική Εργασία για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Επιβλέπων καθηγητής: Γαζέας Κοσμάς (Λέκτορας Παρατηρησιακής Αστροφυσικής)

Αθήνα, Ιούλιος 2020



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΦΥΣΙΚΗ»
(ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ)

Αναζήτηση δακτυλίων γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες με
φωτομετρικές παρατηρήσεις από το διαστημικό τηλεσκόπιο
Kepler

Παπαδοπούλου Όλγα
ΑΜ: 2018313

Διπλωματική Εργασία για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:
Γαζέας Κοσμάς (Λέκτορας Παρατηρησιακής Αστροφυσικής -Κύριος επιβλέπων)
Χατζηδημητρίου Δέσποινα (Καθηγήτρια)
Αποστολάτος Θεοχάρης (Καθηγητής)

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Περίληψη

Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία ουράνιων αντικειμένων τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι αυτά τα οποία ονομάζονται «super-puffs». Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αντικειμένων αυτών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές πυκνότητες που παρουσιάζουν και οι οποίες είναι της τάξης του 0.1 gr/cm^3 . Ένα από τα σενάρια που ερμηνεύει τις παρατηρούμενες πυκνότητες είναι το εξής: πρόκειται για μικρότερης ακτίνας πλανήτες με δακτυλίους να τους περιβάλλουν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθήθηκε το σενάριο αυτό και μελετήθηκε ένα σύνολο μακροπερίοδων πλανητών, χρησιμοποιώντας παρατηρησιακά δεδομένα που έχουν ληφθεί από το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της φωτομετρίας διαβάσεων, με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων και με εφαρμογή σε αυτά θεωρητικών μοντέλων, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του συστήματος μητρικός αστέρας - πλανήτης - δακτύλιος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρέχει η εφαρμογή μοντέλου με δακτύλιο και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη είναι δυνατόν να ανιχνευθούν ενδείξεις φιλοξενίας δακτυλίων και έτσι να εντοπιστούν πλανήτες που χρήζουν περαιτέρω παρατηρήσεων.

Σήμερα, είναι γνωστό ότι οι δακτύλιοι αποτελούν σύνηθες χαρακτηριστικό των ουράνιων σωμάτων του Ηλιακού Συστήματος. Απαντώνται γύρω από πλανήτες, αλλά και γύρω από νάνους πλανήτες και αστεροειδείς. Όμως, η ανακάλυψη τους γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες αποτελεί μια πρόκληση. Είναι λοιπόν, ουσιώδους σημασίας ο εντοπισμός δακτυλίων σε πλανήτες πέρα από το Ηλιακό Σύστημα, διότι μελετώντας τους, μπορούν να απαντηθούν ερωτήματα που αφορούν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτοί σχηματίζονται, την εξέλιξή τους στο χρόνο και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (σύσταση, μάζα).

λέξεις κλειδιά: εξωπλανήτες, δακτύλιοι, φωτομετρία, διαβάσεις, Kepler

Abstract

An interesting class of celestial objects studied in this thesis is what are called super-puffs. The special feature of these objects is their extremely low density, which is of the order of 0.1 gr/cm^3 . One of the scenarios that explain the observed densities assumes that they are planets of smaller radius with rings orbiting around them. In this thesis this scenario was followed and a set of long-period planets was studied, using observational data obtained from the Kepler Space Telescope. Using transit photometry, by the appropriate processing of the data and by fitting theoretical models on them, the parameters of the system host star-planet-ring can be calculated. Comparing the results provided by the fitting of a ringed and a non-ringed model, it is possible to detect indications of ring presence. In this way, someone can identify planets that need further observations. Today, it is known that rings are a common feature of the celestial bodies in the Solar System. They are found orbiting around planets, and so around dwarf planets and asteroids. However, discovering rings around extrasolar planets is still a challenge. It is therefore essential to detect rings around extrasolar planets beyond the Solar System. By investigating them, questions can be answered about the conditions under which they are formed, their evolution over time and their physical characteristics (composition, mass).

key words: exoplanets, rings, photometry, transits, Kepler

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 | Ιστορικά - Γενικά | 1 |
| 1.2 | Σχηματισμός και εξέλιξη πλανητικών συστημάτων | 2 |
| 1.3 | Η μελέτη των εξωπλανητών σήμερα | 4 |
| 1.4 | Διαστημικές αποστολές για τη μελέτη εξωπλανητών | 6 |
| 2 | Μέθοδοι εντοπισμού εξωπλανητών | 11 |
| 2.1 | Μέθοδοι άμεσου εντοπισμού | 11 |
| 2.1.1 | Απευθείας απεικόνιση | 11 |
| 2.1.2 | Διαφορική άμεση απεικόνιση | 11 |
| 2.1.3 | Συμβολομετρική απεικόνιση | 12 |
| 2.2 | Μέθοδοι έμμεσου εντοπισμού | 12 |
| 2.2.1 | Ακτινικές Ταχύτητες | 12 |
| 2.2.2 | Βαρυτική μικροεστίαση | 14 |
| 2.2.3 | Διαβάσεις | 14 |
| 2.2.4 | Αstromετρία | 15 |
| 2.2.5 | Pulsar Timing | 16 |
| 3 | Δακτύλιοι σε τροχιά γύρω από πλανήτες | 17 |
| 3.1 | Συνθήκες σχηματισμού δακτυλίων | 17 |
| 3.2 | Σύσταση των δακτυλίων | 18 |
| 3.3 | Το επίπεδο των δακτυλίων | 19 |
| 3.4 | Δυναμική των δακτυλίων | 19 |
| 3.4.1 | Ψυχροί και θερμοί δακτύλιοι | 19 |
| 3.4.2 | Ακτίνα Roche , ακτίνα Hill και ευστάθεια | 20 |
| 3.4.3 | Ο μηχανισμός Lidov – Kozai | 22 |
| 3.4.4 | Ο μηχανισμός Poynting – Robertsondrag | 23 |
| 3.5 | Εξάπλωση (Spreading) δακτυλίων | 24 |
| 3.6 | Δακτύλιοι στο Ηλιακό Σύστημα | 26 |
| 3.6.1 | Κρόνος | 26 |
| 3.6.2 | Δίας | 27 |
| 3.6.3 | Ουρανός | 28 |
| 3.6.4 | Ποσειδώνας | 29 |
| 3.7 | Ο εξωπλανήτης J1407b | 29 |
| 4 | Μέθοδος αναζήτησης εξωδακτυλίων | 31 |
| 4.1 | Ουράνια Μηχανική - Προσδιορισμός τροχιάς | 31 |
| 4.2 | Μοντέλο για την ανίχνευση δακτυλίων σε εξωπλανήτες | 35 |
| 4.3 | Διερεύνηση | 39 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3.1 | Δακτύλιος μεγάλου πάχους | 41 |
| 4.3.2 | Δακτύλιος ενδιάμεσου πάχους | 44 |
| 4.3.3 | Δακτύλιος μικρού πάχους | 47 |
| 4.3.4 | Κρόνος | 50 |
| 5 | Ανάλυση Παρατηρησιακών Δεδομένων | 53 |
| 5.1 | Κριτήρια επιλογής υποψήφιων πλανητών | 53 |
| 5.2 | Αρχική επεξεργασία των δεδομένων | 54 |
| 5.2.1 | Προσδιορισμός έκκεντρης ανωμαλίας | 57 |
| 5.2.2 | Υπολογισμός συντεταγμένων | 58 |
| 5.3 | Εφαρμογή (fitting) μοντέλου | 62 |
| 6 | Αποτελέσματα | 65 |
| 6.1 | KIC 7619236 | 65 |
| 6.2 | KIC 8505215 | 68 |
| 6.3 | KIC 3962440 | 70 |
| 6.4 | KIC 9214713 | 72 |
| 6.5 | KIC 3230491 | 74 |
| 6.6 | KIC 10460629 | 76 |
| 6.7 | KIC 3239945 | 78 |
| 6.8 | KIC 11342550 | 80 |
| 6.9 | KIC 12356617 | 82 |
| 6.10 | Συμπεράσματα | 84 |
| 7 | Σύνοψη | 87 |
| 7.1 | Ανακεφαλαίωση - Συγκέντρωση ευρημάτων | 87 |
| 7.2 | Συνεισφορά της παρούσας εργασίας | 90 |
| 7.3 | Περιορισμοί στον εντοπισμό εξωδακτυλίων | 91 |
| 7.4 | Μελλοντικές μελέτες | 92 |
| | Κώδικας | 95 |
| | Βιβλιογραφία | 98 |
| | Διαδικτυακές πηγές | 103 |
| | Κατάλογος Πινάκων | 105 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορικά - Γενικά

Από τον 3ο ακόμα αιώνα π.Χ. ο φιλόσοφος Επίκουρος (341 π.Χ. – 270 π.Χ.) στην επιστολή του προς τον Ηρόδοτο είχε αναφέρει: «Άλλά μήν καί κόσμοι ἄπειροι εἰσίν, οἱ θ' ὅμοιοι τούτω καί ἀνόμοιοι». Δηλαδή, υποστήριξε ότι οι κόσμοι είτε όμοιοι με τον δικό μας, είτε ανόμοιοι, είναι άπειροι στον αριθμό. Δεν είχε όμως την ίδια άποψη και ο Αριστοτέλης (384 π.Χ. – 322 π.Χ.), αφού αυτός υποστήριξε πως δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότεροι του ενός κόσμοι. Η εικόνα έγινε λίγο πιο ξεκάθαρη όταν μόλις το 1609 ο Galileo Galilei (1546-1642) παρατήρησε με ένα τηλεσκόπιο της εποχής άλλους πλανήτες του ηλιακού συστήματος. Με τις παρατηρήσεις του αυτές, επιβεβαίωσε την ιδέα του Nicolaus Copernicus (1473-1543) σχετικά με το ηλιοκεντρικό σύστημα.

Σήμερα πλέον, είναι γνωστό ότι στο παρατηρήσιμο Σύμπαν υπάρχουν εκατοντάδες δισεκατομμύρια γαλαξίες και κάθε ένας από αυτούς περιέχει περισσότερους από εκατό δισεκατομμύρια αστέρες. Στατιστικά, αναμένεται να υπάρχει τουλάχιστον ένας πλανήτης γύρω από κάθε αστέρα του Γαλαξίας μας. Ο πρώτος εξωπλανήτης ανιχνεύθηκε το 1992 και βρισκόταν σε τροχιά γύρω από τον pulsar PSR1257+12. Τρία χρόνια αργότερα, το 1995 ανιχνεύθηκε ο πρώτος γίγαντας εξωπλανήτης σε τροχιά γύρω από αστέρα της Κύριας Ακολουθίας (συγκεκριμένα γύρω από τον 51 Pegasi, στον αστερισμό του Πηγάσου). Ο εντοπισμός του πλανήτη έγινε από τους αστρονόμους Didier Queloz και Michel Mayor με τη μέθοδο των ακτινικών ταχυτήτων. Μόλις το έτος 2019, οι δύο αστρονόμοι μοιράστηκαν το βραβείο Nobel φυσικής για την ανακάλυψή τους αυτή. Σήμερα (Ιούνιος 2020) ο αριθμός των επιβεβαιωμένων εξωπλανητών ανέρχεται στους 4164 πλανήτες σε περισσότερα από 3000 πλανητικά συστήματα. Από αυτά τα συστήματα, περισσότερα από 600 είναι πολλαπλά, πράγμα που σημαίνει ότι φιλοξενούν πάνω από έναν πλανήτη. Από τους επιβεβαιωμένους πλανήτες που είναι γνωστοί μέχρι σήμερα, περίπου 160 είναι στο μέγεθος τη Γης, με ακτίνα στο διάστημα ($0.9 R_{\oplus} - 1.1 R_{\oplus}$). Βέβαια, υπάρχουν και υποψήφιοι πλανήτες των οποίων η ύπαρξη δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμη. Ο αριθμός αυτών ανέρχεται στους 5220 πλανήτες. [Πηγή: <https://exoplanets.nasa.gov>].

Στην εργασία αυτή, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα που προέρχονται από το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler. Οι αστέρες που έχουν παρατηρηθεί από το τηλεσκόπιο αυτό, και που αναμένεται να φιλοξενούν έναν ή περισσότερους πλανήτες σε τροχιά γύρω τους συνοδεύονται από δεδομένα και χαρακτηρίζονται ως Kepler Objects of Interest (KOI). Τέτοια αντικείμενα, παρουσιάζουν μια προσωρινή ελάττωση στη φωτεινότητά τους, και αυτή είναι μια ένδειξη για την ύπαρξη -αόρατου από τη Γη- πλανήτη που παρεμβάλλεται μεταξύ αστέρα και Γης και αποκόπτει ένα ποσοστό του αστρικού φωτός. Ωστόσο, το ζήτημα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, καθώς αυτή η μείωση της φωτεινότητας μπορεί να οφείλεται για παράδειγμα σε εκλειπτικό σύστημα και όχι σε διάβαση πλανήτη. Σε κάθε περίπτωση, από το παρατηρούμενο

σχήμα είναι γνωστή η διάρκεια διάβασης, το βάθος του ελαχίστου καθώς και η περιοδικότητα επανάληψης αυτού. Με τη βοήθεια του τηλεσκοπίου Kepler και μέσω φωτομετρίας, για κάθε αστέρα μπορούν να γίνουν γνωστές οι φυσικές του παράμετροι όπως π.χ. η επιφανειακή του θερμοκρασία, η ακτίνα και η μάζα του κ.α. Αν υποτεθεί ότι η πτώση της λαμπρότητας οφείλεται σε διάβαση πλανήτη, τότε μπορούν να υπολογιστούν οι φυσικές και τροχιακές του παράμετροι, όπως η ακτίνα του πλανήτη, η απόστασή του από τον μητρικό του αστέρα και η τροχιακή του περίοδος.

Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή, θα μελετηθεί η λαμπρότητα κάποιων αστέρων που πιθανά ή επιβεβαιωμένα φιλοξενούν πλανήτες. Σκοπός της εργασίας είναι να εντοπιστούν και να μελετηθούν οι δακτύλιοι που ίσως διαθέτουν κάποιοι από τους πλανήτες. Ακόμα και αν δεν εντοπιστούν όμως, είναι δυνατόν να τεθούν περιορισμοί στις σχετικές παραμέτρους και να μελετηθεί με αυτόν τον τρόπο το περιβάλλον και οι συνθήκες στις οποίες σχηματίζονται οι δακτύλιοι. Η κατανόηση της προέλευσης των αντικειμένων αυτών αποτελεί βασική αρχή για την κατανόηση της δημιουργίας και εξέλιξης των πλανητικών συστημάτων. Η ανίχνευση δακτυλίων μπορεί επίσης, να δώσει πληροφορίες για την κλίση του άξονα περιστροφής του πλανήτη.

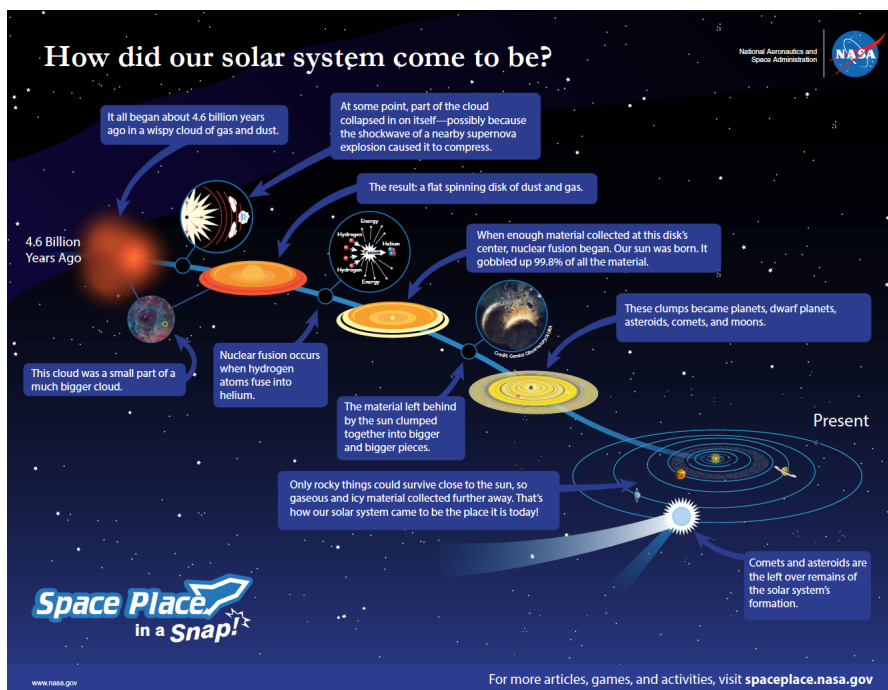
1.2 Σχηματισμός και εξέλιξη πλανητικών συστημάτων

Σύμφωνα με τον ορισμό της Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης ως **πλανήτης** χαρακτηρίζεται κάθε ουράνιο σώμα που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από έναν αστέρα ή ακόμη και αστρικό υπόλειμμα όπως λευκό νάνο ή αστέρα νετρονίων. Παράλληλα, είναι αρκετά μεγάλης μάζας ώστε λόγω της ιδιοβαρύτητάς του να έχει σχήμα σφαιρικό, ωστόσο η μάζα του δεν είναι επαρκής ώστε να ξεκινήσει και να συντηρήσει στο εσωτερικό του θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης. Επίσης, ένα τέτοιο ουράνιο αντικείμενο, για να χαρακτηριστεί ως πλανήτης θα πρέπει να έχει «καθαρίσει» άλλα μικρότερα αντικείμενα από την περιοχή γύρω από την τροχιά του. Αυτό σημαίνει ότι τα σώματα αυτά είτε θα ενσωματωθούν στην μάζα του πλανήτη, είτε θα εκδιωχθούν με το φαινόμενο της βαρυτικής σκέδασης. Αντίστοιχα, ως **εξωπλανήτης** ή εξωηλιακός πλανήτης χαρακτηρίζεται κάθε σώμα που ικανοποιεί όλα τα παραπάνω, όμως βρίσκεται σε τροχιά γύρω από άλλο αστέρα, εκτός του Ήλιου.

Η διαδικασία σχηματισμού των πλανητικών συστημάτων ξεκινά με ένα σκοτεινό νέφος αερίων με ψυχρό πυρήνα. Το νέφος αυτό αντιστέκεται στις δυνάμεις βαρύτητας που τείνουν να το συνθλίψουν χάρη στις εσωτερικές πιέσεις του αερίου, τις τυρβώδεις διακυμάνσεις (turbulence) και τις πιέσεις του μαγνητικού πεδίου. Εάν αυτή η ευσταθής κατάσταση διαταραχθεί εξαιτίας κάποιου εξωτερικού αιτίου ή αν το μαγνητικό πεδίο διαρρεύσει εκτός του νέφους, σύντομα επέρχεται η κατάρρευση του νέφους. Αυτό το «μηδενικής τάξης» αντικείμενο που παρατηρείται στο συγκεκριμένο στάδιο είναι πολύ ψυχρό -με θερμοκρασία της τάξης μερικών δεκάδων K- και αποτελείται κυρίως από σκόνη. Τέτοιου είδους αντικείμενα είναι αρκετά σπάνια, διότι ο χρόνος ζωής τους είναι της τάξης των 10^4 yrs.

Σε επόμενο στάδιο, υλικό από το περιβάλλον νέφος προσπίπτει διαρκώς στο κεντρικό αντικείμενο, προσαιξάνει τη μάζα του και το θερμαίνει, ενώ ταυτόχρονα το νέφος γίνεται όλο και πιο αραιό και διαπερατό. Το αντικείμενο «πρώτης τάξης» που προκύπτει τώρα πια, διαθέτει έναν πυρήνα που θα αποτελέσει μελλοντικά τον αστέρα. Ο νεαρός αστέρας περιβάλλεται από δίσκο υλικών (πρωτοπλανητικός δίσκος) ο οποίος εκπέμπει έντονα υπέρυθη ακτινοβολία και φέρει το μεγαλύτερο ποσοστό της στροφορμής του συστήματος. Η εκπομπή αυτή οφείλεται στην απορρόφηση του φωτός που εκπέμπει ο νεαρός αστέρας και την επανεκπομπή του από τον δίσκο. Η ενέργεια που απελευθερώνεται εξαιτίας της πρόσπτωσης υλικών στο κεντρικό αντικείμενο εν γένει πυροδοτεί ισχυρή εκπομπή και από τον δίσκο υλικών, αλλά και από ότι έχει απομείνει από το νέφος. Αυτό το στάδιο διαρκεί για περίπου 10^5 yrs. Διαδοχικές

συγκρούσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ σκόνης και αερίων οδηγούν στην εμφάνιση πλανητοειδών. Οι πλανητοειδείς είναι αντικείμενα διαστάσεων $100m - 1 km$ στα οποία κυρίαρχη είναι η επίδραση της βαρύτητας και όχι του αερίου. Ο ρυθμός πρόσπτωσης υλικών στο κεντρικό αντικείμενο ελαττώνεται, ενώ ταυτόχρονα διάφοροι μηχανισμοί τείνουν να εξαφανίσουν τον δίσκο υλικών. Το κεντρικό αντικείμενο τώρα είναι «δεύτερης τάξης» και θα μείνει στη φάση αυτή για μερικά εκατομμύρια χρόνια. Στο τέλος αυτής της φάσης, τα υλικά του δίσκου θα έχουν σχηματίσει βραχώδη αντικείμενα και πλανητοειδείς οι οποίοι εξελισσόμενοι και μέσα από συγκρούσεις μεταξύ τους, θα καταλήξουν στη δημιουργία πλανητικών εμβρύων με διαστάσεις όσο της Σελήνης. Και πάλι, κυριαρχούν οι βαρυτικές έλξεις μεταξύ των εμβρύων, ο δίσκος που τα περιβάλλει εξαλείφεται πλήρως, ακολουθούν συγκρούσεις και δημιουργούνται οι γήινοι πλανήτες. Ο κεντρικός αστέρας χαρακτηρίζεται πια σαν «τρίτης τάξης». Όλα τα παραπάνω στάδια συμβαίνουν πριν ο αστέρας περάσει στην Κύρια Ακολουθία. Το πότε θα συμβεί αυτό εξαρτάται από τη μάζα του. Για αστέρες μάζας όσο περίπου του Ήλιου, για να συμβεί η μετάβαση στην Κύρια Ακολουθία απαιτούνται $\approx 10 - 100 Myrs$. Αν στη συνέχεια της διαδικασίας, ένας γήινος πλανήτης καταφέρει να συσσωρεύσει επαρκή ποσότητα αερίων, τότε με την κατάρρευση της νεοσυσταθείσας ατμόσφαιράς του, δημιουργείται ένας αέριος γίγαντας πλανήτης. Παρακάτω, ως παράδειγμα, δίνεται μια αναπαράσταση της διαδικασίας σχηματισμού του ηλιακού συστήματος (εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 – Διαδικασία σχηματισμού του ηλιακού συστήματος [Πηγή: <https://spaceplace.nasa.gov/>]

Παραπάνω αναφέρθηκαν δύο «τελικές» κατηγορίες πλανητών. Οι γήινοι (νάνοι) και οι αέριοι (γίγαντες).

Γήινοι πλανήτες χαρακτηρίζονται αυτοί που έχουν παρόμοια -βραχώδη- σύσταση και μέγεθος με τη Γη, είτε αυτοί βρίσκονται στο Ηλιακό Σύστημα, είτε σε άλλα πλανητικά συστήματα. Οι γήινοι πλανήτες επίσης, μπορεί να περιβάλλονται από ατμόσφαιρα όπως της Γης, ή ακόμα και πυκνότερη ή αραιότερη ατμόσφαιρα από τη γήινη.

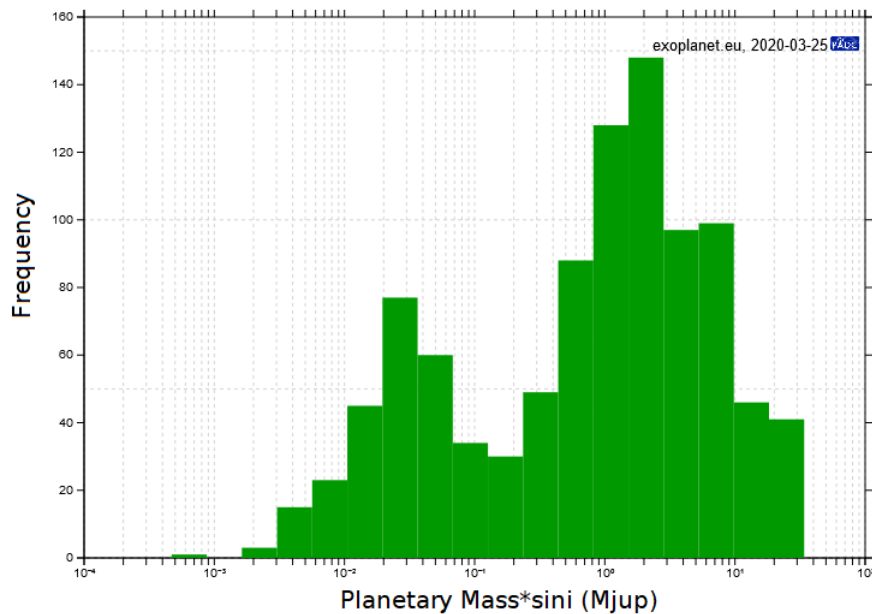
Γίγαντες πλανήτες χαρακτηρίζονται όσοι πλανήτες συντίθενται κατά κύριο λόγο από μη

στερεά υλικά και είναι πολύ πιο μεγάλης μάζας από τη Γη. Όλοι οι γίγαντες πλανήτες διαθέτουν σύστημα λιγότερο ή περισσότερο αμυδρών δακτυλίων και δορυφόρων και αυτό που κυριαρχεί είναι η ατμόσφαιρά τους αποτελούμενη κατά κύριο λόγο από υδρογόνο και ήλιο.

1.3 Η μελέτη των εξωπλανητών σήμερα

Η μελέτη εξωηλιακών συστημάτων ξεκίνησε στα μέσα της περασμένης δεκαετίας, συνεχίζεται σήμερα και μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση της διαδικασίας σχηματισμού και εξέλιξης του ηλιακού συστήματος και γενικά των πλανητικών συστημάτων. Μέχρι σήμερα η όλη γνώση σχετικά με την πλανητική φυσική βασίζεται στο Ηλιακό Σύστημα. Παρατηρήσεις και μελέτη εξωηλιακών συστημάτων είναι απαραίτητες για την κατανόηση της πλανητικής φυσικής σε πιο γενικό και αξιόπιστο πλαίσιο. Οι παρατηρήσεις αυτές με άλλα λόγια, θα δώσουν πληροφορίες σχετικά με το κατά πόσο είναι «τυπικό» το Ηλιακό Σύστημα. Θα γίνει κατανοητό δηλαδή το αν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του ηλιακού συστήματος (π.χ. αριθμός πλανητών, αποστάσεις από τον μητρικό αστέρα, εκκεντρότητες, σύσταση κλπ) είναι συνηθισμένα και απαντώνται και σε άλλα παρόμοια συστήματα σε γειτονικές περιοχές του Γαλαξία. Επίσης, υπάρχει πάντα και η πρόκληση εντοπισμού πλανήτη με συνθήκες κατάλληλες για την εμφάνιση και επιβίωση οποιασδήποτε μορφής ζωής πέρα από τη Γη και το Ηλιακό Σύστημα. Ακόμη, η μελέτη εξωπλανητών δίνει σημαντικά στοιχεία για την φυσική των αστερών, αφού λαμβάνονται πολυάριθμες παρατηρήσεις αυτών.

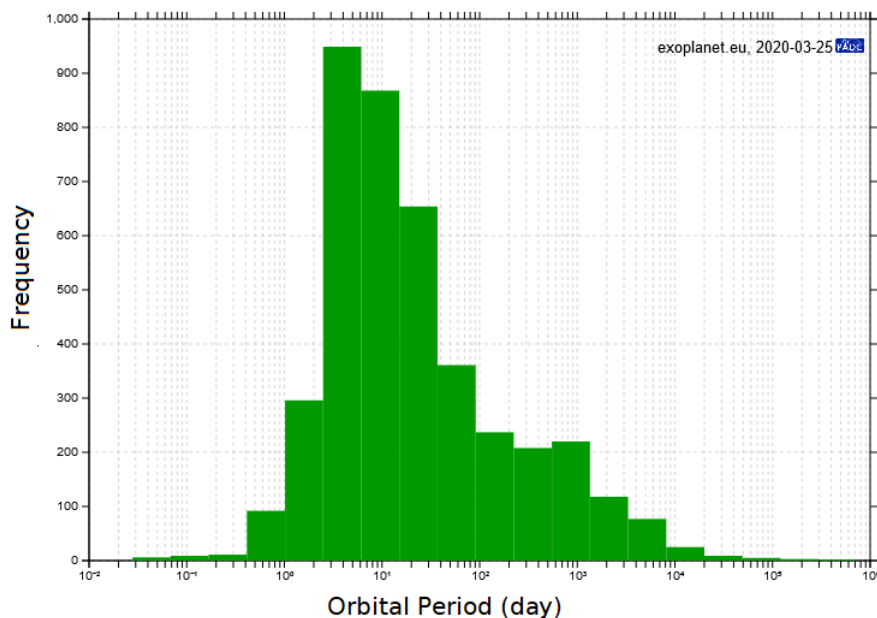
Με βάση τα μέχρι τώρα δεδομένα των εξωπλανητών που έχουν ανακαλυφθεί, μπορεί να μελετηθεί στατιστικά η κατανομή των φυσικών και τροχιακών τους παραμέτρων. Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι οι περισσότεροι από αυτούς τους πλανήτες έχουν $M_p \sin i < 10 M_J$, όπου M_J η μάζα του Δία και i είναι η κλίση του τροχιακού επιπέδου (η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο κίνησης του πλανήτη με την ευθεία παρατήρησης). Το μέγεθος αυτό, $M_p \sin i$, υπολογίζεται



Εικόνα 1.2 – Ιστογράμμο της κατανομής μάζας. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των μέχρι σήμερα επιβεβαιωμένων πλανητών έχουν μάζα συγκρίσιμη με αυτή του Δία. [Πηγή: <http://exoplanet.eu>]

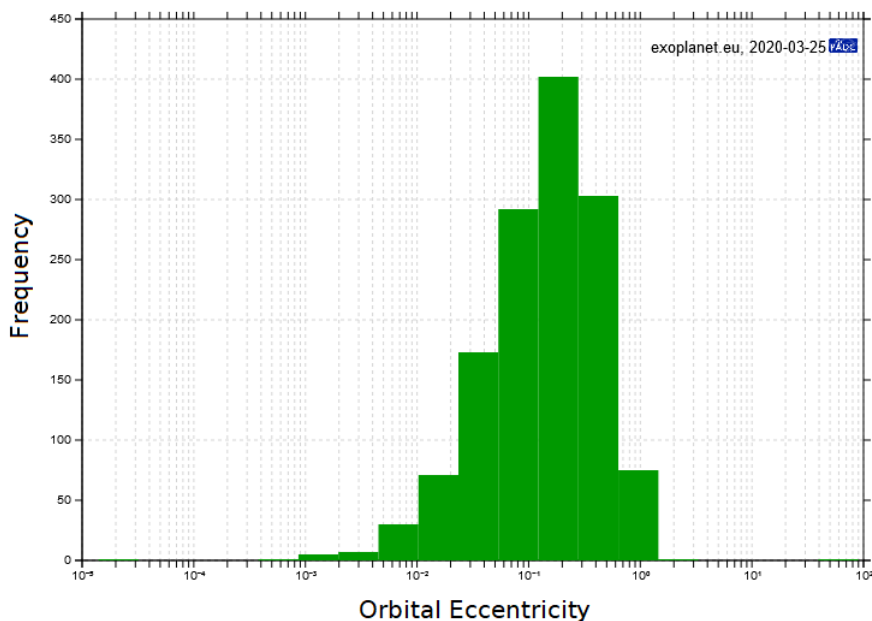
μέσω της μεθόδου ακτινικών ταχυτήτων (βλ. κεφάλαιο 2) και πρακτικά δεν διαφέρει από την πραγματική μάζα του πλανήτη. Από το ιστόγραμμα 1.2 φαίνεται ότι οι μάζες των εξωπλανητών που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα καλύπτουν ένα εύρος από $0,02 M_{\oplus}$ (όπου M_{\oplus} η μάζα της Γης) μέχρι $\sim 30 M_J$. Μέχρι σήμερα λοιπόν, κυρίως ανιχνεύονται πλανήτες οι οποίοι έχουν μάζα συγκρίσιμη με αυτή του Δία ή του Ποσειδώνα. Η μάζα αυτών οριακά δεν επαρκεί για να ξεκινήσουν θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό τους και συνεπώς, να γίνεται πλέον λόγος για αστέρες. Επιπλέον, οι μέχρι τώρα ανακαλύψεις υποστηρίζουν ότι οι μαζικοί πλανήτες εντοπίζονται να περιφέρονται γύρω από αστέρες βαρύτερους του Ήλιου, ενώ πλανήτες σχετικά μικρής μάζας περιφέρονται γύρω από αστέρες με μάζα μικρότερη της ηλιακής.

Ακολουθώς, στο ιστόγραμμα 1.3 παρουσιάζεται η κατανομή της τροχιακής περιόδου (P) των μέχρι σήμερα επιβεβαιωμένων εξωπλανητών. Είναι φανερό, ότι η πλειοψηφία των μέχρι τώρα γνωστών πλανητών έχει $P \sim 10 \text{ days}$. Ισοδύναμα, αυτό σημαίνει ότι βρίσκονται σε αποστάσεις πολύ κοντινές προς τον μητρικό τους αστέρα. Τέτοια αντικείμενα ονομάζονται **hot Jupiters**, διότι παρά την κοντινή τους θέση προς τον μητρικό τους αστέρα, διαθέτουν μάζα της τάξης της μάζας του Δία. Ο εντοπισμός αυτών ευνοείται για δύο λόγους: ο πρώτος, είναι ότι οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εντοπισμού εξωηλιακών πλανητών ευνοούν την ανακάλυψη πλανητών με μικρές τροχιακές περιόδους, αφού υπάρχει η δυνατότητα επανάληψης των μετρήσεων και άρα, μπορεί ευκολότερα να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη του πλανήτη. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι η επίδραση ενός hot Jupiter στο φάσμα του μητρικού αστέρα είναι μεγαλύτερη-άρα, εντοπίζεται πιο εύκολα- σε σχέση με την επίδραση που θα είχε ένας λιγότερο μαζικός και πιο μακρινός πλανήτης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξήγηση που δίνεται σύμφωνα με τη θεωρία σχηματισμού και εξέλιξης των γιγάντων πλανητών, είναι ότι οι hot Jupiters σχηματίστηκαν μακριά από τον κεντρικό αστέρα και μέσω της πλανητικής μετανάστευσης, οδηγήθηκαν και κατέληξαν σε κοντινές στον αστέρα αποστάσεις.



Εικόνα 1.3 – Ιστόγραμμα της κατανομής τροχιακής περιόδου των μέχρι σήμερα γνωστών εξωπλανητών. Είναι φανερό ότι η πλειονότητα αυτών έχει τροχιακή περίοδο της τάξης των 10 ημερών. [Πηγή: <http://exoplanet.eu>]

Παρατηρείται ακόμη, ότι οι γίγαντες εξωπλανήτες, σε αντίθεση με το Ηλιακό Σύστημα, συχνά ακολουθούν τροχιές με μεγάλες τιμές εκκεντρότητας. Συγκεκριμένα, έχουν εντοπιστεί πάνω από 290 εξωπλανήτες με εκκεντρότητα στο διάστημα (0.23 – 0.45), αλλά και πάνω από 170 πλανήτες με τιμές εκκεντρότητας στο διάστημα (0.45–0.86) [Πηγή: <http://exoplanet.eu/>]. Στο Ηλιακό Σύστημα, συγκριτικά, η μέγιστη εκκεντρότητα απαντάται στην τροχιά του Ερμή και είναι ίση με 0.2. Το σχετικό ιστόγραμμα φαίνεται στην εικόνα (1.4).



Εικόνα 1.4 – Ιστόγραμμα της κατανομής της εκκεντρότητας των μέχρι σήμερα γνωστών εξωπλανητών. [Πηγή: <http://exoplanet.eu/>]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το Ηλιακό Σύστημα συγκρινόμενο με άλλα πλανητικά συστήματα, δεν φαίνεται να είναι μια τυπική περίπτωση. Η περίπτωση της Γης όμως, φαίνεται πως είναι συνήθης. Με βάση τα δεδομένα του διαστημικού τηλεσκοπίου Kepler αναμένεται να υπάρχουν δεκάδες δισεκατομμύρια πλανήτες με διαστάσεις συγκρίσιμες με αυτές της Γης και μάλιστα, η τροχιά αυτών αναμένεται να βρίσκεται εντός της κατοικήσιμης ζώνης του μητρικού τους αστέρα. Ο αστέρας αυτός μπορεί να είναι είτε ηλιακού τύπου, είτε κόκκινος νάνος.

1.4 Διαστημικές αποστολές για τη μελέτη εξωπλανητών

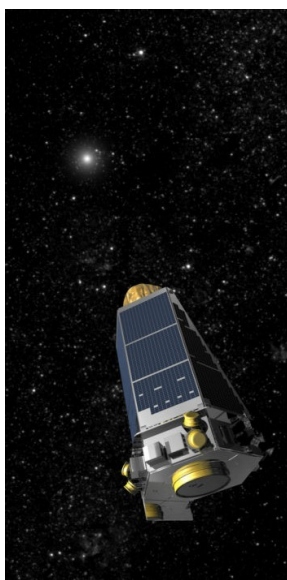
Hubble (1990 - σήμερα): Το διαστημικό αυτό τηλεσκόπιο αποτελεί το αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ της Αμερικανικής Διαστημικής Υπηρεσίας (NASA), της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) και του Space Telescope Science Institute (STScI). Εκτοξεύθηκε το 1990 όταν ακόμη δεν υπήρχε καμία βεβαιότητα για την ύπαρξη εξωπλανητών και είναι σε λειτουργία ακόμη και σήμερα. Σήμερα όμως, έχουν εντοπιστεί χιλιάδες τέτοιοι πλανήτες από επίγεια και διαστημικά τηλεσκόπια. Η συσκευή Hubble συμμετέχει στην αναζήτηση προσπαθώντας να δώσει απαντήσεις σε ερωτήματα που αφορούν για παράδειγμα, τον σχηματισμό των πλανητών. Η επικρατούσα θεωρία σχηματισμού πλανητών αναμένει αυτοί να σχηματίζονται μέσα σε ένα δίσκο αερίων και σκόνης (πρωτοπλανητικός δίσκος) (βλ. κεφάλαιο 1). Αυτοί οι

δίσκοι, όντες 100.000 φορές αμυδρότεροι από τον κεντρικό αστέρα είναι δύσκολο να παρατηρηθούν και να μελετηθούν. Όμως, η υψηλή ευαισθησία και ανάλυση του Hubble μπορεί να δώσει αξιόπιστες παρατηρήσεις των δίσκων αυτών ώστε να αποκτήσουμε πληροφορίες για τις συνθήκες που επικρατούν εκεί. Άλλο ερώτημα που προσπαθεί να απαντήσει το Hubble αφορά την κατοικησιμότητα των πλανητών. Για να εξεταστεί η ενδεχόμενη κατοικησιμότητα είναι σημαντικό να αναγνωριστούν τα συστατικά της ατμόσφαιρας του πλανήτη - εφόσον αυτός διαθέτει. Το Hubble εντόπισε το 2000 για πρώτη φορά εξωπλανήτη -τον HD 209458 b- με παρατηρήσιμες διαβάσεις μπροστά από τον μητρικό του αστέρα. Ανίχνευσε μάλιστα νάτριο στην ατμόσφαιρα του πλανήτη αυτού. Από τότε εντοπίζονται σχεδόν καθημερινά διαβάσεις και τότε, το Hubble αναλαμβάνει τη μελέτη των ατμοσφαιρών τους.

CoRoT (2006 - 2013): Το όνομά του είναι ακρωνύμιο των λέξεων Convection, Rotation and planetary Transits. Ήταν διαστημικό τηλεσκόπιο που σκοπό είχε την αναζήτηση εξωηλιακών πλανητών μικρής τροχιακής περιόδου και πιο συγκεκριμένα, πλανητών με μέγεθος συγκρίσιμο με της Γης. Εστάλη το 2006 μετά από συνεργασία μεταξύ της γαλλικής υπηρεσίας διαστήματος (French Space Agency, CNES) και της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA), λειτούργησε μέχρι το 2013 και ήταν αφιερωμένο στην εφαρμογή αστεροσεισμολογίας μετρώντας τις ταλαντώσεις των αστέρων που πιθανώς φιλοξενούν πλανήτες σε τροχιά γύρω τους. Η συσκευή CoRoT ήταν η πρώτη που ανίχνευσε πλανήτη με βραχώδη - μεταλλική σύσταση (COROT-7B).



Εικόνα 1.5 – Το διαστημικό τηλεσκόπιο CoRoT. [Πηγή: <https://www.esa.int>]



Εικόνα 1.6 – Το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler. [Πηγή: <https://www.space.com>]

Kepler (2009 - 2018): Εκτοξεύθηκε από την NASA το 2009 με σκοπό την ανακάλυψη πλανητών γήινων ή και μεγαλύτερων διαστάσεων γύρω από διάφορων τύπων αστέρες. Μάλιστα η συσκευή αυτή, έδωσε πληροφορίες για το ποσοστό των πλανητών που βρίσκονται κοντά ή εντός της κατοικήσιμης ζώνης του μητρικού τους αστέρα αλλά και πληροφορίες για την κατανομή των ημιαξόνων και των εκκεντροτήτων των τροχιών των πλανητών, αλλά και για τις πλανητικές διαστάσεις, μάζες και συστάσεις. Συντέλεσε επίσης, στον υπολογισμό του ποσοστού των αστέρων του Γαλαξία μας που πιθανώς διαθέτουν πλανήτες σε τροχιά γύρω τους και μελέτησε τις ιδιότητες αυτών. Το Kepler διέθετε ένα φωτόμετρο με το οποίο παρακολούθησε και μέτρησε τη φωτεινότητα περισσότερων από 530.000 αστέρων σε μια συγκεκριμένη περιοχή του Γαλαξία που προβάλλεται στον ουράνιο θόλο μεταξύ των αστερισμών του Κύκνου και της Λύρας. Ακολούθως, τα δεδομένα μεταδίδονταν στη Γη για να αναλυθούν και να εντοπιστούν βυθίσεις στην καμπύλη φωτός. Αυτές οι ελαττώσεις της φωτεινότητας πιθανότατα οφείλονται σε διάβαση πλανήτη μπροστά από τον δίσκο του μητρικού του αστέρα. Η συσκευή Kepler περιστρεφόταν κατά 90° κάθε

90 μέρες προκειμένου οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας που διαθέτετε να είναι στραμμένοι διαρκώς προς τον Ήλιο. Το 2013, εξαιτίας της εμφάνισης βλαβών στο Kepler, πραγματοποιήθηκαν επιδιορθώσεις και η αποστολή συνεχίστηκε ως K2 mission μέχρι το 2018. Τον Οκτώβριο του 2018 το διαστημικό αυτό τηλεσκόπιο «αποσύρθηκε», αφού εξαντλήθηκαν τα καύσιμά του. Κατά τη διάρκεια των εννέα περίπου ετών λειτουργίας του, ανακάλυψε περισσότερους από 2.660 πλανήτες. Εκτός από τη μελέτη εξωπλανητών, το Kepler χρησιμοποιήθηκε και για τη μελέτη μεταβλητών αστερών και εκλειπτικών συστημάτων.

Gaia (2013 - σήμερα): Συσκευή της ESA που εκτοξεύθηκε το 2013 και έχει σαν βασικό σκοπό τη δημιουργία τριδιάστατου και ακριβέστατου γαλαξιακού χάρτη, μέσα από τη μελέτη χιλιάδων εκατομμυρίων αστερών. Εκτός όμως, από τις πολυάριθμες άλλες λειτουργίες της, η συσκευή Gaia μελετά τις τροχιές εξωηλιακών πλανητών και τις κλίσεις αυτών προκειμένου να προσδιοριστούν οι μάζες τους με τη μέθοδο της αστρομετρίας.

TESS (2018 - σήμερα): Το όνομά του προέρχεται από το ακρωνύμιο των λέξεων Transiting Exoplanet Survey Satellite. Η συσκευή αυτή της NASA εκτοξεύθηκε τον Απρίλιο του 2018 και έχει σχεδιαστεί για την σάρωση ολόκληρης της ουράνιας σφαίρας προκειμένου να υλοποιηθεί αναζήτηση εξωηλιακών πλανητών γύρω από κοντινούς αστέρες με τη χρήση της μεθόδου των διαβάσεων. Με βάση τα φωτομετρικά δεδομένα που παρέχει η αποστολή είναι δυνατό να υπολογιστούν οι φυσικές και τροχιακές παράμετροι περισσότερων από 20.000 πλανητών. Αναμένεται η αποστολή αυτή να εντοπίσει περίπου 300 πλανήτες των διαστάσεων της Γης ή και μεγαλύτερων (μέχρι περίπου διπλάσιο μέγεθος).

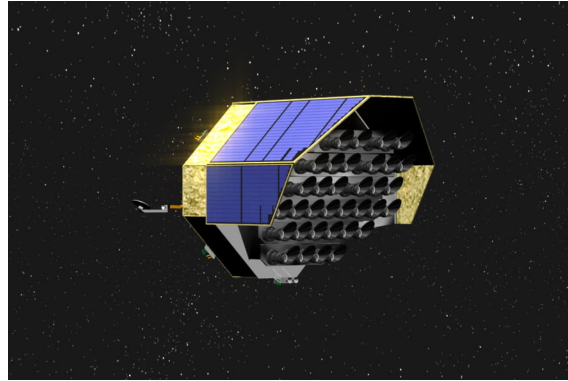


Εικόνα 1.7 – Το διαστημικό τηλεσκόπιο TESS. [Πηγή: <https://spaceflightnow.com>]

JWST (αναμένεται): Το όνομά του είναι το ακρωνύμιο των λέξεων James Webb Space Telescope. Το τηλεσκόπιο αυτό είναι το αποτέλεσμα συνεργασίας μεταξύ NASA και ESA και πρόκειται να εκτοξευθεί την άνοιξη του 2021. Μεταξύ άλλων, ένας από τους στόχους της αποστολής JWST είναι η ανίχνευση εξωηλιακών πλανητών με τη μέθοδο της απευθείας απεικόνισης, με σκοπό την άντληση πληροφοριών σχετικά με τον σχηματισμό αστερών και πλανητών. Με τη χρήση στεμματογράφων που θα διαθέτει η συσκευή JWST θα είναι δυνατή η παρατήρηση εξωπλανητών που είναι 10 εκατομμύρια -ή ίσως και 100 εκατομμύρια- φορές αμυδρότεροι από τον μητρικό τους αστέρα. Η παρατήρηση θα πραγματοποιείται σε υπέρυθρα μήκη κύματος, πράγμα που σημαίνει ότι το JWST θα έχει ευαισθησία σε πλανήτες που μέχρι σήμερα δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός τους. Επί παραδείγματι, θα μπορέσουν να ανιχνευθούν πλανήτες όμοιοι του Κρόνου, σε ευρεία κλίμακα αποστάσεων από τον μητρικό τους αστέρα.

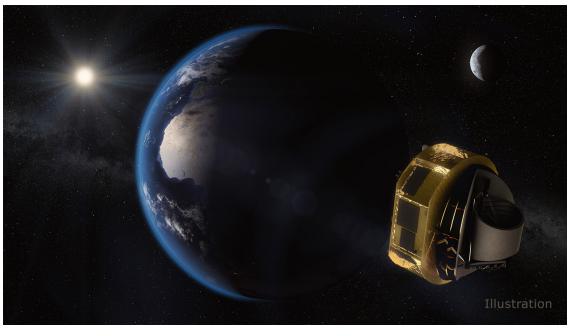
PLATO (αναμένεται): Το όνομα του τηλεσκοπίου αυτού προέρχεται από την αγγλική του ονομασία PLANetary Transits and Oscillations of stars. Πρόκειται για διαστημικό τηλε-

σκόπιο της ESA που θα εκτοξευθεί το 2026 με σκοπό την αναζήτηση πλανητικών διαβάσεων σε πάνω από ένα εκατομμύριο αστέρες. Άλλοι από τους αστέρες αυτούς θα είναι όμοιοι με τον Ήλιο, άλλοι θα είναι υπογίγαντες και άλλοι ερυθροί νάνοι. Πιο συγκεκριμένα η αποστολή αυτή αποσκοπεί στην μελέτη βραχυδών γήινων πλανητών εντός των ορίων της κατοικήσιμης ζώνης αστέρων όπως ο Ήλιος. Επιπρόσθετα, το PLATO θα μελετήσει τις αστρικές ταλαντώσεις και τη σεισμική δραστηριότητα στους αστέρες, ώστε να υπολογιστούν οι μάζες τους και οι ηλικίες τους.



Εικόνα 1.8 – Το διαστημικό τηλεσκόπιο PLATO. [Πηγή: <https://spacenews.com>]

ARIEL (αναμένεται): Το όνομα της αποστολής αυτής προέρχεται από το ακρωνύμιο των λέξεων Atmospheric Remote-sensing Exoplanet Large-survey. Πρόκειται για τηλεσκόπιο που σχεδιάζει η ESA και η εκτόξευσή του αναμένεται το 2028. Η αποστολή αυτή δεν στοχεύει στην αναζήτηση νέων πλανητών. Θα μελετήσει μέσω φασματοσκοπίας την σύσταση των ατμοσφαιρών των ήδη επιβεβαιωμένων εξωπλανητών. Μελετώντας την ατμόσφαιρα ενός πλανήτη είναι δυνατόν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με τη μάζα και τις διαστάσεις, αλλά και σχετικά με τον ημίαξονα της τροχιάς του. Ένα φασματόμετρο θα αναλύει το φως



που ανακλά ο πλανήτης δίνοντας έτσι το φάσμα του, δηλαδή το «αποτύπωμα» των στοιχείων της ατμόσφαιράς του. Γνωρίζοντας τη σύσταση της πλανητικής ατμόσφαιρας, μπορεί να αντληθεί πληροφορία για το πως το περιβάλλον εντός του οποίου δημιουργήθηκε ο πλανήτης μπορεί να επηρεάσει και να καθορίσει την εξέλιξή του.

Εικόνα 1.9 – Το διαστημικό τηλεσκόπιο ARIEL. [Πηγή: <https://www.skyandtelescope.com>]

WFIRST (αναμένεται): Το όνομά του προέρχεται από το ακρωνύμιο των λέξεων Wide Field InfraRed Survey Telescope / Ευρέος Πεδίου Τηλεσκόπιο Επισκόπησης στο Υπέρυθρο. Πρόκειται να μελετήσει σκοτεινή ύλη και ενέργεια και να συνεχίσει το έργο της αποστολής Kepler για την ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητών. Η λειτουργία του τηλεσκοπίου αυτού θα στηριχθεί στη μέθοδο των βαρυτικών μικροφακών και συνεπώς, θα είναι ικανό να εντοπίσει πλανήτες μάζας της τάξης όση η μάζα της Σελήνης. Η συσκευή WFIRST θα εφαρμόσει επίσης τη μέθοδο ανίχνευσης εξωπλανητών με χρήση στεμματογράφου και αναμένεται να είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες για την πλανητική δομή και σύσταση αλλά και για την ατμοσφαιρική σύνθεση . Η εκτόξευσή του έχει προγραμματιστεί για τα μέσα της δεκαετίας του 2020.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι εντοπισμού εξωπλανητών

Η ανίχνευση ενός εξωπλανήτη μπορεί να γίνει είτε άμεσα, είτε έμμεσα μέσω της επίδρασης που ασκεί στον μητρικό του αστέρα.

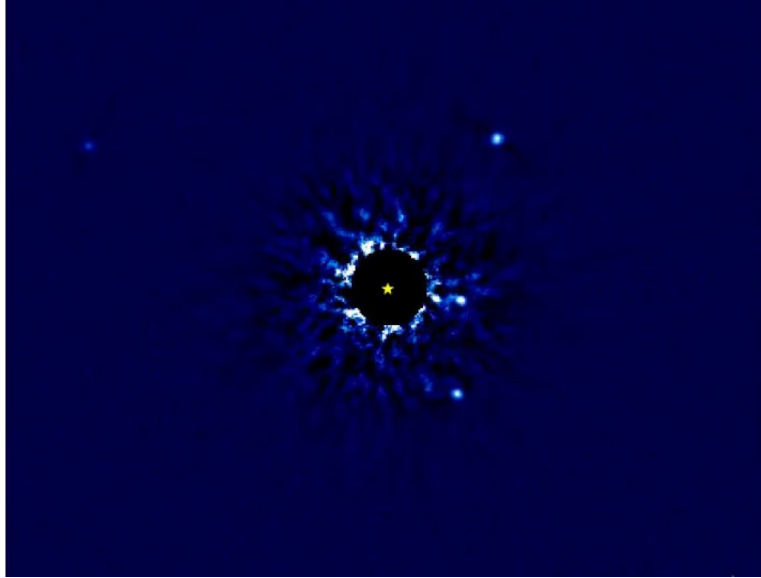
2.1 Μέθοδοι άμεσου εντοπισμού

2.1.1 Απευθείας απεικόνιση

Μια από τις μεθόδους άμεσου εντοπισμού εξωπλανητών είναι η απευθείας απεικόνιση (direct imaging). Πρόκειται για την δυσκολότερα εφαρμόσιμη μέθοδο, καθώς οι εξωηλιακοί πλανήτες είναι δισεκατομμύρια φορές πιο αμυδροί συγκρινόμενοι με τον μητρικό τους αστέρα, και η γωνιακή τους απόσταση είναι της τάξης των λίγων δευτερολέπτων του τόξου. Για την εφαρμογή λοιπόν της μεθόδου αυτής, η παρατήρηση γίνεται στο μέσο υπέρυθρο και σπανίως στο ορατό και μάλιστα, γίνεται από τηλεσκόπια πέρα από τη γήινη ατμόσφαιρα. Αυτό είναι επιθυμητό, έτσι ώστε να μπορούν ο πλανήτης και ο μητρικός αστέρας να διακριθούν ως δύο ξεχωριστές πηγές. Η μέθοδος αυτή -όπως είναι λογικό- είναι πιο αποτελεσματική όταν παρατηρούνται πλανήτες με μεγάλο ημιάξονα τροχιάς ($> 5AU$). Αυτή η μέθοδος είναι που οδήγησε για παράδειγμα, το 2008, στην ανακάλυψη του συστήματος πλανητών γύρω από τον νεαρό αστέρα HR 8799. Η ανακάλυψη έγινε με τα τηλεσκόπια Keck στη Χαβάη και η παρατήρηση έγινε σε υπέρυθρα μήκη κύματος. Συγκεκριμένα, «φωτογραφήθηκαν» τέσσερις πλανήτες να περιφέρονται γύρω από τον μητρικό τους αστέρα, οι οποίοι μάλιστα παρατηρήθηκε να έχουν αυξημένες θερμοκρασίες εξαιτίας του νεαρού του όλου συστήματος. Αυτή η πληροφορία δεν θα μπορούσε να εξαχθεί αν για παράδειγμα τα τηλεσκόπια παρατηρούσαν σε ορατά μήκη κύματος. Οι περίοδοι περιφοράς των πλανητών αυτών όπως μετρήθηκαν, κυμαίνονται μεταξύ 40 και 400 ετών.

2.1.2 Διαφορική άμεση απεικόνιση

Μια ακόμα μέθοδος αναζήτησης εξωηλιακών πλανητών είναι η διαφορική άμεση απεικόνιση (differential direct detection). Τα θεωρητικά μοντέλα για τα αναμενόμενα φάσματα των εξωηλιακών γιγάντων πλανητών δείχνουν ότι το ανακλώμενο από την επιφάνεια του πλανήτη φως θα εξαρτάται ισχυρά από τη σύσταση της ατμόσφαιράς του (π.χ. νάτριο, μονοξείδιο του άνθρακα κ.α.)- εφόσον αυτός διαθέτει τέτοια. Η παρεμβολή της ατμόσφαιρας και η συνακόλουθη απορρόφηση, βοηθούν στην διάκριση μεταξύ του φωτός που φτάνει κατευθείαν από τον αστέρα και του φωτός που έχει ανακλαστεί στην πλανητική επιφάνεια και ατμόσφαιρα.



Εικόνα 2.1 – Απευθείας φωτογράφιση των τεσσάρων πλανητών που περιφέρονται γύρω από τον νεαρό αστέρα HR 8799. [Πηγή: <https://www.planetary.org>]

2.1.3 Συμβολομετρική απεικόνιση

Άλλη μέθοδος αναζήτησης εξωπλανητών είναι η συμβολομετρική απεικόνιση (interferometric imaging). Χρησιμοποιώντας δύο τηλεσκόπια που βρίσκονται σε ορισμένη και επαρκώς μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, οι δέσμες του φωτός που λαμβάνει καθένα από αυτά, μπορούν να συνδυαστούν έτσι ώστε να έχουν διαφορά φάσης π και με τον τρόπο αυτό, να ελαχιστοποιηθεί το φως του κεντρικού αστέρα. Η ενισχυτική συμβολή των δύο δεσμών φωτός θα συμβεί σε γωνίες θ , τέτοιες που να ικανοποιούν τη συνθήκη

$$D \sin \theta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

όπου D ο οπτικός δρόμος και n ακέραιος αριθμός. Μεταβάλλοντας το D , υποθέτοντας ότι το μήκος κύματος διατηρείται σταθερό, λαμβάνεται μια σειρά γωνιών ενισχυτικής συμβολής, η μελέτη των οποίων μπορεί να δώσει πληροφορία για την ανίχνευση είτε ασθενούς αστρικής ανάκλασης, είτε θερμική εκπομπή προερχόμενη από εξωπλανήτη.

2.2 Μέθοδοι έμμεσου εντοπισμού

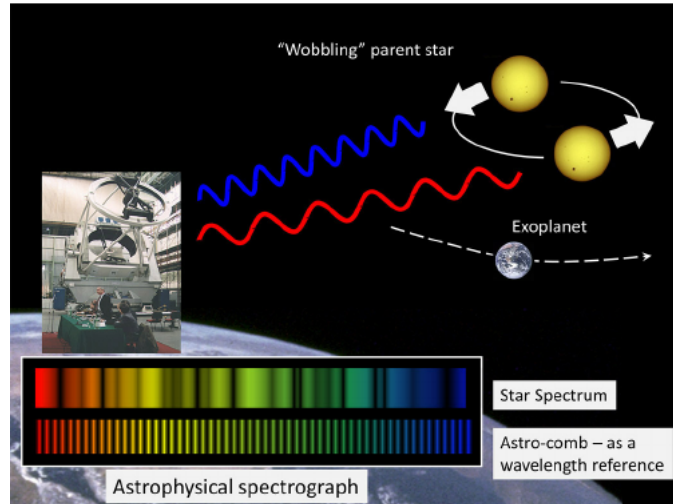
2.2.1 Ακτινικές Ταχύτητες

Μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους έμμεσου εντοπισμού πλανητών είναι η μέθοδος των ακτινικών ταχυτήτων (radial velocities). Πρόκειται για φασματοσκοπική μέθοδο και είναι η πιο αποδοτική ως προς την ανίχνευση εξωηλιακών πλανητών. Αν ο παρατηρούμενος αστέρας διαθέτει σε τροχιά γύρω του πλανήτη, τότε λόγω της βαρυτικής τους αλληλεπίδρασης, ο αστέρας διαγράφει τροχιά μικρής ακτίνας. Κατά συνέπεια, σε μια τροχιακή περίοδο, άλλοτε πλησιάζει προς τη Γη και άλλοτε απομακρύνεται. Συγκεκριμένα, αυτό που παρατηρείται είναι η μετατόπιση των γραμμών προς το ερυθρό του φάσματος όταν ο αστέρας απομακρύνεται από τη Γη και προς το κυανό όταν αυτός πλησιάζει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο

Doppler και η μετατόπιση των φασματικών γραμμών υπολογίζεται ως

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{u_r}{c} \quad (2.2)$$

όπου u_r η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του αστέρα. Αυτή, είναι η ταχύτητα του αστέρα



Εικόνα 2.2 – Μέθοδος ακτινικών ταχυτήτων. [Πηγή: www.researchgate.net]

όπως μετράται κατά τη διεύθυνση της ευθείας παρατήρησης και οι μεταβολές της αποτυπώνονται στο φάσμα. Οι περιοδικές μεταβολές αυτής εξαρτώνται από τη μάζα του πλανήτη και από την κλίση της τροχιάς του ως προς την ευθεία παρατήρησης. Επίσης, επειδή η μετατόπιση των φασματικών γραμμών θα εμφανίζει περιοδικότητα, είναι δυνατό να μετρηθεί και η τροχιακή περίοδος, P . Στη συνέχεια, από τον 3^ο νόμο του Kepler μπορεί να υπολογιστεί ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς:

$$a^3 = \frac{GM_s P^2}{4\pi^2} \quad (2.3)$$

όπου M_s η μάζα του μητρικού αστέρα και G η σταθερά της παγκόσμιας έλξης.

Έστω τώρα ότι η τροχιά είναι σχεδόν κυκλική. Αν θεωρηθεί ότι η βαρυτική δύναμη δρα ως κεντρομόλος:

$$\frac{M_p u_p^2}{a} = \frac{GM_s M_p}{a^2} \rightarrow u_p = \sqrt{\frac{GM_s}{a}} \quad (2.4)$$

Ισχύει επίσης,

$$M_p u_p = M_s u_s \rightarrow M_p = M_s \frac{u_s}{u_p} \quad (2.5)$$

από όπου υπολογίζεται η μάζα M_p του πλανήτη.

Αυτό που μετρά ένας παρατηρητής στην πραγματικότητα είναι η προβολή της ταχύτητας του αστέρα στην ευθεία παρατήρησης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της κλίσης i του επιπέδου κίνησης ως προς την ευθεία παρατήρησης. Η ποσότητα αυτή είναι το ημι-πλάτος μεταβολής της καμπύλης ακτινικών ταχυτήτων και ισούται με:

$$u_s \sin i = \frac{M_p \sin i}{M_s} \sqrt{\frac{GM_s}{a}} \quad (2.6)$$

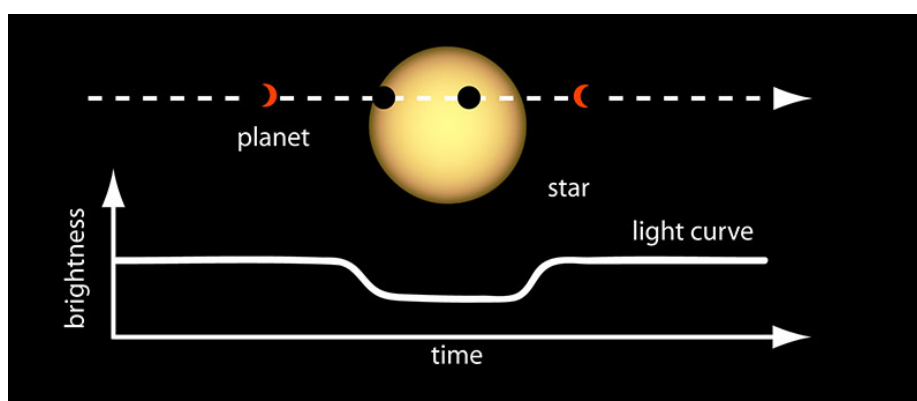
Από τη σχέση αυτή είναι γνωστή η ελάχιστη τιμή της μάζας του πλανήτη, δηλαδή η ποσότητα $M_p \sin i$.

2.2.2 Βαρυτική μικροεστίαση

Η καταλληλότερη μέθοδος όταν χρησιμοποιούνται επίγεια τηλεσκόπια είναι η μέθοδος της βαρυτικής μικροεστίασης (gravitational lensing), η οποία στηρίζεται στο φαινόμενο της εκτροπής του φωτός που εκπέμπει ένας μακρινός αστέρας από την πορεία του όταν συναντήσει μια βαρυτική πηγή, όπως π.χ. ένας αστέρας. Ο τελευταίος, λειτουργεί σαν μικροφακός παραμορφώνοντας και μετατοπίζοντας το είδωλο του αστέρα και εστιάζοντας το φως προς την κατεύθυνση παρατήρησης. Αν ο παρεμβαλλόμενος αστέρας διαθέτει σε τροχιά γύρω του πλανήτη, τότε στο καμπυλωμένο φως θα παρατηρηθεί μια αύξηση της λαμπρότητας, η οποία καταγράφεται φωτομετρικά στη Γη. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την αναζήτηση πλανητών μικρής μάζας ($2 - 3 M_{\oplus}$) που βρίσκονται σε αποστάσεις μερικών AU από τον κεντρικό αστέρα και για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους. Επίσης, η μέθοδος αυτή είναι η μόνη που έχει ευαισθησία στον εντοπισμό παλιών σε ηλικία, ορφανών/ελεύθερων (free floating) πλανητών. Τέτοιοι πλανήτες είτε έχουν αποδεσμευτεί από την τροχιά τους στο πλανητικό σύστημα όπου ανήκαν, είτε δεν υπήρξαν ποτέ μέλη πλανητικού συστήματος. Συνεπώς, δεν υπόκεινται στην βαρυτική έλξη κάποιου μητρικού αστέρα και βρίσκονται σε τροχιά γύρω από το γαλαξιακό κέντρο. Γενικά, με τη μέθοδο της μικροεστίασης, μπορεί να υπολογιστεί ο λόγος μαζών αστέρα και πλανήτη, αλλά και η φαινόμενη γωνιακή απόσταση μεταξύ τους.

2.2.3 Διαβάσεις

Ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον εντοπισμό εξωπλανητών είναι η μέθοδος των διαβάσεων (transits). Κατά τη διάβαση του πλανήτη μπροστά από τον μητρικό του αστέρα, ο δίσκος του πλανήτη αποκόπτει ένα τμήμα του φωτεινού δίσκου του αστέρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της λαμπρότητας του αστέρα η οποία μπορεί να μετρηθεί μέσω της καμπύλης φωτός. Η καμπύλη φωτός δεν είναι τίποτα άλλο παρά το διάγραμμα της λαμπρότητας του αστέρα συναρτήσει του χρόνου. Όπου λαμπρότητα ονομάζεται η ενέργεια που εκπέμπει ο αστέρας ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαβάσεων -ή ισοδύναμα μεταξύ δύο ελαχίστων της καμπύλης φωτός- ισούται με την περίοδο περιφοράς του πλανήτη και με αυτό τον χρόνο δεδομένο, υπολογίζεται και ο ημιάξονας της τροχιάς μέσω του 3^{ου} νόμου του Kepler. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται μέχρις ότου ολόκληρος ο δίσκος του πλανήτη (και όχι μόνο ένα τμήμα αυτού) να βρισκείται μπροστά από τον αστέρα είναι προφανώς, ανάλογο της ακτίνας του πλανήτη. Επίσης, η διάρκεια της διάβασης



Εικόνα 2.3 – Μεταβολή της λαμπρότητας ενός αστέρα κατά τη διάβαση πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο. [Πηγή: <https://exoplanets.nasa.gov>]

-ισοδύναμα του ελαχίστου- εξαρτάται από την απόσταση πλανήτη-αστέρα καθώς και από τις

διαστάσεις τους. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί κατ' αυτόν τον τρόπο η ακτίνα του πλανήτη, διότι και ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να μεγιστοποιηθεί η ελάττωση της λαμπρότητας του αστέρα, είναι επίσης ανάλογος της ακτίνας αυτής. Επίσης, μέσω της μεθόδου διαβάσεων, μπορούν να αντληθούν πληροφορίες και για τη σύσταση της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Καθώς το φως του αστέρα διέρχεται μέσα από αυτήν κάποια μήκη κύματος θα απορροφηθούν και έτσι μπορεί να γίνει γνωστό το είδος των στοιχείων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα αυτή. Κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι σε περίπτωση που παρατηρούνται μεταβολές στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαβάσεων (Transit Timing Variations, TTVs), το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη για την πιθανή ύπαρξη περισσότερων μελών του συστήματος που αλληλεπιδρούν δυναμικά με τον μητρικό αστέρα και τα υπόλοιπα μέλη. Συνολικά, αυτό που ελέγχεται σε μια καμπύλη φωτός είναι το βάθος, το σχήμα καθώς και η διάρκεια του ελαχίστου. Αν η καμπύλη είναι σχήματος U , τότε η απόκρυψη είναι κεντρική. Αν είναι σχήματος V η απόκρυψη είναι εφαπτομενική.

Στην πράξη, η ελάττωση της φαινόμενης λαμπρότητας του αστέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta L}{L_s} \simeq \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 \quad (2.7)$$

όπου R_s και R_p η ακτίνα του αστέρα και του πλανήτη, αντίστοιχα και L_s η φαινόμενη λαμπρότητα πριν/μετά την έκλειψη. Επίσης, το σύμβολο «περίπου ίσο» οφείλεται στο γεγονός ότι η σχέση αυτή αγνοεί το φαινόμενο της αμαύρωσης χείλους κατά το οποίο τα χείλη του αστρικού δίσκου φαίνονται πιο σκοτεινά σε σχέση με το κέντρο του. Αυτό συμβαίνει, διότι στο κέντρο του δίσκου η ακτινοβολία προέρχεται και από βαθύτερα στρώματα όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Αντιθέτως, στο χείλος η ακτινοβολία εκπέμπεται από τα επιφανειακά μόνο στρώματα που είναι και συγκριτικά πιο ψυχρά.

Η μέθοδος των διαβάσεων όμως, έχει το εξής μειονέκτημα: η κλίση της τροχιάς του πλανήτη ως προς την ευθεία παρατήρησης θα πρέπει να είναι κοντά στις 90° και αυτό το κριτήριο το ικανοποιεί μόνο το 10% των πλανητών (αν οι τροχιές τους είναι μικρής ακτίνας), ενώ το ποσοστό αυτό ελαττώνεται σημαντικά για μεγάλες τροχιές των πλανητών. Αν h είναι η ελάχιστη φαινόμενη απόσταση μεταξύ του κέντρου του αστέρα και του κέντρου του πλανήτη, και a ο ημιάξονας της τροχιάς του πλανήτη, τότε:

$$\cos i = \frac{h}{a}$$

και η μέγιστη κλίση που επιτρέπει την παρατήρηση των διαβάσεων είναι:

$$\cos i = \frac{R_s + R_p}{a}$$

Γενικά, ο συνδυασμός των μεθόδων των ακτινικών ταχυτήτων και των διαβάσεων είναι ισχυρότατος γιατί μετρώνται και η ακτίνα και η μάζα του πλανήτη και συνεπώς, μπορεί να μελετηθεί η σύσταση του πλανήτη, αλλά και η διαδικασία σχηματισμού των πλανητικών συστημάτων. Στη μέθοδο των διαβάσεων θα στηρίζεται και η παρούσα εργασία.

2.2.4 Αστρομετρία

Άλλη μέθοδος εντοπισμού εξωηλιακών πλανητών είναι η αστρομετρία (astrometry). Πρόκειται για τρόπο μέτρησης των θέσεων των αστέρων στον ουρανό. Αυτή τη μέθοδο εφαρμόζουν και τα τηλεσκόπια Keck στη Χαβάη. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της -μικρής μεν, επαναλαμβανόμενης δε- μεταβολής της θέσης (δηλαδή των ουρανογραφικών συντεταγμένων) του αστέρα εξαιτίας του -αθέατου από τη Γη- πλανήτη που είναι σε τροχιά γύρω του.

Ο αστέρας ουσιαστικά, διαγράφει τροχιά οι διαστάσεις της οποίας εξαρτώνται από τη μάζα του αστέρα και την απόστασή του από τη Γη, αλλά όχι από την κλίση της τροχιάς του πλανήτη. Συγκεκριμένα, η ίδια πραγματική μετατόπιση του αστέρα θα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη φαινόμενη μετατόπιση αν ο αστέρας βρίσκεται κοντά στη Γη απ' ό,τι αν ήταν πιο απομακρυσμένος. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να υπολογιστούν οι φυσικές και τροχιακές παράμετροι του πλανήτη, όπως μάζα, ακτίνα, περίοδος, ημιάξονας και εκκεντρότητα της τροχιάς. Επίσης, η αστρομετρία έχει μεγάλη ευαισθησία στην ανίχνευση εξωπλανητών με μεγάλες τροχιακές περιόδους, που βρίσκονται δηλαδή σε τροχιά μακριά από τον αστέρα τους. Αυτό συμβαίνει διότι - εφόσον πλανήτη και αστέρας κινούνται γύρω από το κοινό τους κέντρο μάζας - στην περίπτωση αυτή ο πλανήτης μετατοπίζει εντονότερα τη θέση του μητρικού του αστέρα. Όπως είναι αναμενόμενο, η μέθοδος της αστρομετρίας είναι περισσότερο επιτυχής όταν οι μετρήσεις λαμβάνονται από διαστημικές συσκευές (π.χ. Gaia), αφού τότε δεν παρεμβάλλεται η ατμόσφαιρα της Γης και άρα δεν χαλάει η ποιότητα των μετρήσεων.

2.2.5 Pulsar Timing

Με τη μέθοδο pulsar timing ανακαλύφθηκε ο πρώτος εξωπλανήτης, το 1992. Οι pulsars είναι υπέρπυκνα αντικείμενα που αποτελούν το υπόλειμμα που απομένει μετά την βαρυτική κατάρρευση ενός αστέρα αρχικής μάζας $10-25 M_{\odot}$. Τα αντικείμενα αυτά κατά την περιστροφή τους εκπέμπουν παλμούς ραδιοκυμάτων και μάλιστα με εξαιρετικά ακριβή περιοδικότητα. Εάν υπάρχει πλανήτης σε τροχιά γύρω από έναν pulsar, τότε διαταράσσεται η κίνηση του pulsar και μεταβάλλεται ακόμη και ο χρόνος εκπομπής των παλμών. Επίσης, η μέθοδος pulsar timing είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό βαρυτικών διαταραχών ανάμεσα στα μέλη ενός πλανητικού συστήματος, και συνεπώς μπορεί να δώσει στοιχεία για τις τροχιακές τους παραμέτρους. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι οι pulsars είναι σχετικά σπάνια αντικείμενα και ότι για τη φιλοξενία πλανήτη σε τροχιά γύρω τους απαιτούνται «ειδικές» συνθήκες. Προφανώς, για ένα τέτοιο πλανήτη δεν μπορεί να γίνει λόγος για κατοικησιμότητα, αφού η ακτινοβολία στον περιβάλλοντα χώρο θα είναι εξαιρετικά ισχυρή.

Κεφάλαιο 3

Δακτύλιοι σε τροχιά γύρω από πλανήτες

Εφόσον, στο Ηλιακό Σύστημα υπάρχει αφθονία δακτυλίων, θα περίμενε κανείς, η ύπαρξή τους να είναι σύνηθες χαρακτηριστικό και στους εξωηλιακούς πλανήτες. Η διαδικασία σχηματισμού των πλανητικών δακτυλίων αποτελεί σήμερα ένα ανοιχτό ζήτημα, και η μελέτη αυτών μπορεί να δώσει νέες πληροφορίες και δεδομένα. Προσεγγίσεις-σενάρια που εξηγούν το ερώτημα αυτό υπάρχουν, ωστόσο το καθένα αντιμετωπίζει τα δικά του εμπόδια. Μερικά ερωτήματα που αναμένουν να απαντηθούν είναι τα εξής: γιατί οι δακτύλιοι των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού συστήματος είναι τόσο διαφορετικοί μεταξύ τους ως προς τη σύσταση και τη μάζα τους; Πώς εξηγείται η φορά της κίνησής τους; Γιατί οι γήινοι πλανήτες δεν διαθέτουν σύστημα δακτυλίων;

Στην ενότητα αυτή, γίνεται συζήτηση για τη φύση των δακτυλίων που μπορεί να υπάρχουν γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες. Γνωρίζοντας τις γενικές ιδιότητες των δακτυλίων των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού συστήματος, αναζητούνται οι πιθανές ιδιότητες των δακτυλίων που φιλοξενούνται από πλανήτες οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις από τον μητρικό τους αστέρα, είτε εσώτερες της γραμμής πάγου, είτε εξώτερες.

3.1 Συνθήκες σχηματισμού δακτυλίων

Ένα πιθανό ενδεχόμενο για τη δημιουργία των πλανητικών δακτυλίων υποστηρίζει ότι αυτοί, όπως και οι δορυφόροι, φαίνεται να είναι κοινής προέλευσης. Πιθανώς ο σχηματισμός των πρώτων να είναι το αρχικό στάδιο στην διαδικασία σχηματισμού δορυφόρων -τουλάχιστον αυτών με σχετικά μικρές διαστάσεις. Μπορεί όμως να συμβαίνει και το αντίστροφο. Οι πλανητικοί δακτύλιοι δηλαδή, να είναι το αποτέλεσμα της καταστροφικής διάλυσης ενός φυσικού δορυφόρου εξαιτίας κάποιας σύγκρουσης που αυτός υπέστη. Πιθανώς, η διαδικασία σχηματισμού των δακτυλίων κάθε πλανήτη να έχει διαφορετικά στάδια.

Στο Ηλιακό Σύστημα η προέλευση των πολύ χαμηλής μάζας δακτυλίων του Δία, του Ουρανού και του Ποσειδώνα φαίνεται να μπορούν να αποδοθούν σε καταστροφή κάποιου δορυφόρου λόγω σύγκρουσης με κομήτη ή λόγω βομβαρδισμού μετεώρων. Δηλαδή, στην τελική και σημερινά παρατηρούμενη κατάληξη των συστημάτων δορυφόρων και δακτυλίων των πλανητών αυτών έπαιξαν καθοριστικό ρόλο βίαιες συγκρούσεις. Δεν μπορεί όμως να δοθεί η ίδια εξήγηση στην περίπτωση των δακτυλίων του Κρόνου, αφού αυτοί είναι αρκετά πιο μεγάλης μάζας και το ζήτημα αυτό παραμένει μέχρι σήμερα μια πρόκληση για τους επιστήμονες. Στην περίπτωση του Κρόνου, οι δακτύλιοί του μπορεί να σχηματίστηκαν είτε από την απογύμνωση του εξωτερικού κελύφους πάγου ενός αρχέγονου δορυφόρου λόγω παλιρροϊκών δυνάμεων, ε-

είτε από τη σύγκρουση ενός προϋπάρχοντος μικρού φεγγαριού με κάποιο άλλο αντικείμενο, είτε ακόμη, μπορεί να αποτελούν αρχέγονο υλικό και η σημερινή τους μορφή να είναι αποτέλεσμα της εξέλιξής τους στην ιστορία του ηλιακού συστήματος. Ποιο από τα σενάρια ισχύει δεν είναι γνωστό, ωστόσο σε κάθε περίπτωση, οι δακτύλιοι είτε σχηματίστηκαν μαζί με τον πλανήτη, είτε σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του «Μεγάλου Βομβαρδισμού» (Heavy Bombardment) που συνέβη πιθανώς πριν από 3,8 Gyr στις εξωτερικές περιοχές του ηλιακού συστήματος. Σε μεταγενέστερες εποχές, φαίνεται να είναι δύσκολος ο σχηματισμός δακτυλίων, αφού τουλάχιστον τα τελευταία 3 Gyr δεν έχει σημειωθεί κάποιο γεγονός που να έχει προκαλέσει μεγάλη διαφοροποίηση στη δομή του ηλιακού συστήματος. Ωστόσο, οι Cuk et al (2016) [7] υποστηρίζουν ότι μεταβολές στην εκκεντρότητα των τροχιών κάποιων δορυφόρων του Κρόνου λόγω της επίδρασης του Ήλιου (evection resonances), πιθανώς να έχουν οδηγήσει πρόσφατα σε συγκρούσεις στο Ηλιακό Σύστημα. Τέτοιες καταστροφικές συγκρούσεις μεταξύ δορυφόρων, οδηγούν στη δημιουργία μαζικών δίσκων υλικών-θραυσμάτων τα οποία στη συνέχεια ίσως να συνενωθούν προς δημιουργία νέας γενιάς δορυφόρων ή ακόμα και συστήματος δακτυλίων. Αυτό το σενάριο όμως, αποδεικνύεται ότι στην περίπτωση του Κρόνου δεν είναι δυνατόν να ισχύει, αφού η διαδικασία αυτή αδυνατεί να αναπαράγει την παρατηρούμενη κατανομή μάζας-απόστασης των δορυφόρων του Κρόνου, όπως επίσης δεν μπορεί να αναπαράγει την παγωμένη σύσταση των δακτυλίων του. Στην περίπτωση της Γης, πιστεύουμε ότι η ύπαρξη της Σελήνης οφείλεται σε μια σύγκρουση που υπέστη η νεαρή υπερ-Γη πριν από περίπου 4,5 δισεκ. χρόνια. Τα απομεινάρια της σύγκρουσης τέθηκαν σε τροχιά γύρω από τη Γη και σταδιακά σχημάτισαν τη Σελήνη, χωρίς να απομείνει υλικό διαθέσιμο για τη δημιουργία δακτυλίων. Στην περίπτωση του Άρη πάλι, οι δορυφόροι του είναι αστεροειδείς που έχουν συλληφθεί βαρυτικά και αυτό αιτιολογεί και την ανυπαρξία δακτυλίων γύρω του.

Γενικά, μέχρι σήμερα, καμία θεωρία δεν είναι σε θέση να εξηγήσει με απόλυτη βεβαιότητα την προέλευση των διαφορετικών πλανητικών δακτυλίων και δορυφόρων που συναντώνται στο Ηλιακό Σύστημα.

3.2 Σύσταση των δακτυλίων

Τα παγωμένα δακτυλίδια του Κρόνου μπορούν και υπάρχουν στην τροχιακή απόσταση του Κρόνου, γιατί εκεί η θερμοκρασία είναι επαρκώς χαμηλή. Ωστόσο, για τους μέχρι τώρα γνωστούς εξωηλιακούς πλανήτες η ύπαρξη παγωμένων δακτυλίων είναι αμφίβολη, αφού αυτοί οι πλανήτες εντοπίζονται σε αποστάσεις κοντινές στον μητρικό τους αστέρα. Όμως, συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες των γνωστών μας εξωπλανητών με τη θερμοκρασία τήξης του SiO_2 παρατηρείται ότι πολλοί από αυτούς θα μπορούσαν να διατηρούν δακτυλίους γύρω τους. Αυτοί οι δακτύλιοι είναι δυνατόν να αποτελούνται από βραχώδη υλικά, τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του πάγου, οπότε και αναμένεται να είναι πιο συμπαγείς από τους παγωμένους δακτυλίους που απαντώνται στους εξωτερικούς πλανήτες του ηλιακού συστήματος.

Για κάθε αστέρα ορίζεται μια απόσταση που καλείται «γραμμική πάγου». Αυτή, αντιστοιχεί στην απόσταση από τον μητρικό αστέρα πέρα από την οποία το νερό συναντάται στη μορφή πάγου. Αυτό στην πράξη μεταφράζεται ως αύξηση της πυκνότητας των στερεών υλικών πέρα από την απόσταση αυτή. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα αυτή σχεδόν τετραπλασιάζεται. Σύμφωνα με τον ορισμό της γραμμής πάγου, αναμένεται οι μεγάλοι στερεοί πρωτοπλανήτες να σχηματίζονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτήν. Στο Ηλιακό Σύστημα η γραμμή πάγου βρίσκεται σε απόσταση 2,7 AU από τον Ήλιο. Γενικά, για οποιοδήποτε πλανητικό σύστημα, η θέση της γραμμής πάγου εξαρτάται και καθορίζεται από την εκπεμπόμενη ισχύ του αστέρα, αλλά και από τη σύσταση, το μέγεθος και τη μάζα του πρωτοπλανητικού δίσκου μέσα στον οποίο θα σχηματιστούν μελλοντικά οι πλανήτες.

3.3 Το επίπεδο των δακτυλίων

Όσο αφορά το επίπεδο όπου εντοπίζονται οι δακτύλιοι, αυτό καθορίζεται από την ισορροπία των φυγόκεντρων δυνάμεων και της βαρυτικής επίδρασης του μητρικού αστέρα. Η απόσταση από τον πλανήτη στην οποία αυτές οι δυνάμεις ισορροπούν ορίζεται ως **ακτίνα Laplace** και δίνεται από τη σχέση (Schlichting & Chang, 2011) [18]:

$$R_L^5 = 2J_2 R_p^2 \alpha^3 (1 - e)^{3/2} \frac{M_p}{M_s} \quad (3.1)$$

όπου R_p η ακτίνα του πλανήτη, M_s, M_p η μάζα του αστέρα και του πλανήτη, αντίστοιχα, α και e ο μεγάλος ημιάξονας και η εκκεντρότητα της τροχιάς του πλανήτη και J_2 η τετραπολική ροπή του πλανήτη. Εντός της ακτίνας R_L , οι δακτύλιοι εντοπίζονται στο ισημερινό επίπεδο, ενώ εκτός αυτής εντοπίζονται στο τροχιακό επίπεδο. Αν πάλι, η κίνηση του πλανήτη γύρω από τον αστέρα είναι σύγχρονη, τότε $R_L \simeq 0,84 R_p$. Δηλαδή, αναμένεται αυτοί οι πλανήτες να μην έχουν δακτυλίους στο ισημερινό τους επίπεδο, αλλά στο τροχιακό επίπεδο. Αυτό κάνει την παρατήρηση των δακτυλίων μέσω της μεθόδου των διαβάσεων αρκετά δύσκολη, καθώς οι δακτύλιοι θα παρατηρούνται edge-on, δηλαδή, η κλίση του επιπέδου των δακτυλίων ως προς το επίπεδο του ουρανού θα είναι ίση με 0° .

Επιπρόσθετα, ο λόγος της ακτίνας Laplace προς την ακτίνα Roche δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R_L}{R_{Roche}} \simeq J_2^{1/5} R_p^{-3/5} \alpha^{3/5} (1 - e)^{3/10} \left(\frac{M_p}{M_s} \right)^{1/5} \left(\frac{\rho_r}{\rho_p} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

όπου ρ_r και ρ_p η πυκνότητα των δακτυλίων και του πλανήτη, αντίστοιχα. Αν $R_L/R_{Roche} > 1$, τότε οι δακτύλιοι βρίσκονται εξολοκλήρου εντός της ακτίνας R_L και συνεπώς, κείνται στο ισημερινό επίπεδο του πλανήτη. Αντίστοιχα, αν $R_L/R_{Roche} < 1$, οι δακτύλιοι εκτείνονται και πέραν του ορίου R_L και κείνται στο τροχιακό επίπεδο.

Για γίγαντες πλανήτες, όπως αυτούς του ηλιακού συστήματος, η ποσότητα J_2 κυμαίνεται μεταξύ $0.003 - 0.1$.

3.4 Δυναμική των δακτυλίων

Οι δακτύλιοι βέβαια, δεν παραμένουν «για πάντα» σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη. Έχουν ορισμένο χρόνο ζωής. Αυτό συμβαίνει διότι η περιοχή στην οποία εντοπίζονται, είναι εκτεθειμένη σε έντονες παλιρροϊκές δυνάμεις βαρύτητας. Οι δακτύλιοι, όπως απαντώνται στο Ηλιακό Σύστημα, αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των εξωτερικών πλανητών και είναι δίσκοι στερεών σωματιδίων που εκτείνονται σε αποστάσεις $\approx 2,5$ πλανητικών ακτίνων. Σε αντίθεση με τους πρωτοπλανητικούς δίσκους οι δακτύλιοι δεν έχουν καθόλου αέρια συνιστώσα, παρά μόνο στερεή. Σε πυκνούς δακτυλίους μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τροχιές των σωματιδίων υπακούν στους νόμους του Kepler.

3.4.1 Ψυχροί και θερμοί δακτύλιοι

Έστω H το πάχος του δακτυλίου και Ω η γωνιακή ταχύτητα. Η σχετική ταχύτητα των σωματιδίων είναι:

$$\sigma_v = H\Omega \quad (3.3)$$

Επίσης, η εφαπτομενική ταχύτητα ενός σωματιδίου που βρίσκεται σε απόσταση r από το κέντρο του πλανήτη υπολογίζεται ως:

$$V_{orb} = r\Omega \quad (3.4)$$

Αν $\sigma_v \ll V_{orb}$ τότε ο δίσκος των δακτυλίων χαρακτηρίζεται ως **ψυχρός**. Αν πάλι $\sigma_v \gg V_{orb}$ τότε, γίνεται λόγος για **θερμό** δακτύλιο.

Ο λόγος των δύο ταχυτήτων είναι:

$$h \equiv \frac{\sigma_v}{V_{orb}} = \frac{H}{r} \quad (3.5)$$

Σε αντίθεση με ένα δίσκο αερίων, σε ένα δίσκο στερεών αντικειμένων, υπάρχει διάχυση ενέργειας λόγω συγκρούσεων. Αν ο ρυθμός συγκρούσεων είναι μεγάλος τότε η ταχύτητα σ_v φθίνει γρήγορα και τελικά ο δακτύλιος γίνεται ψυχρός και λεπτός (h και H ελαττώνονται). Για σύγκριση, οι δακτύλιοι του Κρόνου έχουν παράμετρο h ίση με 10^{-7} , γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως η πιο λεπτή δομή που είναι γνωστή μέχρι σήμερα. Επίσης, η περίπτωση των δακτυλίων του Κρόνου αποτελεί ψυχρό σύστημα. Το πάχος τους είναι της τάξης των 10 m και είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των μεγαλύτερων από τα αντικείμενα που τους αποτελούν. Αυτό σημαίνει ότι έχει επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία του συστήματος και άρα έχει ελαχιστοποιηθεί και η ενέργεια του συστήματος. Σε ένα τέτοιο ψυχρό σύστημα δακτυλίων λόγω συγκρούσεων τα σωματίδια αποκλίνουν από τις τροχιές τους και υπάρχει πιθανότητα να συμβεί πρόσπτωση αυτών στον κεντρικό πλανήτη. Αντίθετα, σε ένα θερμό σύστημα δακτυλίων οι σχετικές ταχύτητες των σωματιδίων σ_v είναι πολύ μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής. Αυτό πρακτικά, σημαίνει ότι η επίδραση της ιδιοβαρύτητας είναι μικρή και δεν συμβαίνει πρόσπτωση υλικών στον πλανήτη. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της ιδιοβαρύτητας, ορίζεται η εξής παράμετρος:

$$Q = \frac{\Omega \sigma_r}{3,36G\Sigma} \quad (3.6)$$

όπου σ_r η ακτινική ταχύτητα των σωματιδίων, $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ η σταθερά της παγκόσμιας έλξης και Σ η επιφανειακή πυκνότητα των υλικών.

Βέβαια, ακόμα και σε ένα βαρυτικά ασταθές σύστημα, υπάρχουν δυνάμεις που αντιτίθενται στη συσσώρευση στερεών σωματιδίων. Αυτές είναι οι **παλιρροϊκές δυνάμεις**. Αυτές είναι που επηρεάζουν και καθορίζουν σε ένα βαθμό την ύπαρξη και την έκταση του συστήματος δακτυλίων ενός πλανήτη. Οι δυνάμεις αυτές εμφανίζονται όταν οποιοδήποτε αντικείμενο βρεθεί στο πεδίο μιας ισχυρής βαρυτικής πηγής και τείνουν να «τεντώσουν» το αντικείμενο αυτό κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα δύο σώματα. Όσο μικρότερη η απόσταση των δύο αντικειμένων ή όσο πιο μεγάλης μάζας είναι αυτά, τόσο ισχυρότερες οι παλιρροϊκές δυνάμεις, και συνεπώς, τόσο εντονότερη η παραμόρφωση.

3.4.2 Ακτίνα Roche, ακτίνα Hill και ευστάθεια

Για κάθε ουράνιο σώμα λοιπόν, όπως ένας πλανήτης, ορίζεται η **ακτίνα Roche**. Αυτή είναι η απόσταση εντός της οποίας ένα ουράνιο αντικείμενο π.χ. δορυφόρος αρχίζει να χάνει μάζα και να διαλύεται υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, όπως για παράδειγμα των παλιρροϊκών δυνάμεων που του ασκεί ο πλανήτης γύρω από τον οποίο περιφέρεται. Με άλλα λόγια, εντός της ακτίνας Roche, τα αντικείμενα που βρίσκονται σε τροχιά διαλύονται σχηματίζοντας δακτυλίους, ενώ εκτός αυτής, τα αντικείμενα αυτά συγκρούονται δημιουργώντας ολοένα και μεγαλύτερα συσσωματώματα. Η ακριβής τοποθεσία της ακτίνας Roche εξαρτάται από ποικίλες φυσικές διαδικασίες (accretion, destruction, splitting), αλλά και από την πυκνότητα των σωματιδίων που αποτελούν τον δακτύλιο. Στην περίπτωση του Κρόνου για παράδειγμα, η ακτίνα Roche είναι $r_R \simeq 140.000 \text{ km}$. Εφόσον οι δακτύλιοι του Κρόνου βρίσκονται εντός της ακτίνας Roche, δεν θα μπορέσουν ποτέ να συνενωθούν και να σχηματίσουν συμπαγές αντικείμενο όπως είναι ένας δορυφόρος.

Η ακτίνα Roche, για έναν δορυφόρο πυκνότητας ρ και ο οποίος εκτελεί σύγχρονη περιστροφή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{R_{Roche}}{R_p} = 2,45 \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

όπου $\rho_p = \frac{3}{4\pi} \frac{M_p}{R_p^3}$ η μέση πυκνότητα του πλανήτη. Ομοίως, για δακτυλίους:

$$\frac{R_{Roche}}{R_p} = 2.45 \left(\frac{\rho_p}{\rho_r} \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

όπου ρ_r η πυκνότητα των δακτυλίων. Δακτύλιοι συνεπώς, μπορούν να υπάρξουν και να είναι ευσταθείς μόνο εντός της ακτίνας Roche του πλανήτη. Πέρα από το όριο αυτό, τα υλικά που απαρτίζουν το δακτύλιο θα είναι ασταθή και θα συγκρουστούν σταδιακά προς σχηματισμό δορυφόρων.

Από τη σχέση (3.8) είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα των δακτυλίων, τόσο μικρότερη η ακτίνα Roche. Άρα, βραχώδη υλικά, αναμένεται να έχουν μικρότερη ακτίνα Roche συγκριτικά με την αντίστοιχη ακτίνα παγωμένων υλικών. Αυτά τα πυκνά υλικά λοιπόν, σχηματίζουν δακτυλίους που αναμένεται να βρίσκονται εγγύτερα στον πλανήτη απ' ότι οι παγωμένοι δακτύλιοι του Κρόνου, αφού η ακτίνα Roche είναι μικρότερη στην περίπτωση τέτοιων υλικών. Ο ισχυρισμός αυτός ενισχύεται περαιτέρω αν αναλογιστεί κανείς ότι κοντά στον μητρικό αστέρα, δηλαδή σε αποστάσεις πολύ μικρότερες της γραμμής πάγου, μπορούν να επιβιώσουν μόνο υλικά τα οποία είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυριτιούχες ενώσεις).

Εκτός από την ακτίνα Roche που αναφέρθηκε και ορίστηκε νωρίτερα, για κάθε πλανήτη ορίζεται και η **ακτίνα Hill**. Αυτή, είναι η απόσταση από το πλανήτη στην οποία οι παλλιροϊκές δυνάμεις του μητρικού αστέρα και η βαρύτητα του ίδιου του πλανήτη βρίσκονται σε ισορροπία -αν υποθέσει κανείς ότι ασκούνται σε ένα σωματίο που βρίσκεται εκεί. Για να συγκρατήσει ένας πλανήτης σε τροχιά γύρω του ένα σώμα-δορυφόρο, θα πρέπει η τροχιά του τελευταίου να εντοπίζεται εσώτερα της ακτίνας Hill του πλανήτη. Αντίστοιχα, και ο δορυφόρος θα χαρακτηρίζεται από μια δική του ακτίνα Hill. Αν κάποιο αντικείμενο βρεθεί εντός αυτής, θα «συλληφθεί» ως φεγγάρι του αρχικού δορυφόρου, και όχι του πλανήτη. Τα σωματίδια που βρίσκονται εντός ενός δακτυλίου εύρους όσο η ακτίνα Hill γύρω από την τροχιά του πλανήτη, τείνουν να συγκρουστούν μαζί του και να προσαυξήσουν τη μάζα του. Η ακτίνα Hill για ένα σύστημα πλανήτη-αστέρα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{Hill} = \alpha(1 - e) \left(\frac{M_p}{3M_s} \right)^{1/3} \quad (3.9)$$

όπου α και e ο ημιάξονας και η εκκεντρότητα της τροχιάς του πλανήτη, M_p η μάζα του πλανήτη και M_s η μάζα του αστέρα.

Στο Ηλιακό Σύστημα: $R_{Roche} \ll R_{Hill}$.

Στα εξωηλιακά πλανητικά συστήματα: $R_{Roche} \sim R_{Hill}$.

Εφόσον οι περιοχές που βρίσκονται πέρα από την ακτίνα Hill είναι ασταθείς, δεν μπορούν να υπάρξουν δακτύλιοι εκεί. Η «επιτρεπτή» περιοχή εντός της οποίας μπορούν να υπάρξουν ευσταθείς τροχιές και άρα και δακτύλιοι, εξαρτάται από την κλίση των τροχιών των σωματιδίων που συνθέτουν τον δακτύλιο. Επίσης, εν γένει, οι τροχιές με ανάδρομη φορά είναι πιο ευσταθείς απ' ότι αυτές με ορθή φορά. Αν οι δακτύλιοι δημιουργούνται από την απώλεια μάζας ενός μεγαλύτερου αντικειμένου όταν αυτό εισέλθει εντός της ακτίνας Roche ενός εξωπλανήτη, τότε οι εξωπλανήτες με $R_{Roche} \sim R_{Hill}$ είναι σε μειονεκτική θέση, δεδομένου ότι λόγω της έλλειψης ευσταθών τροχιών στις εξωτερικές περιοχές της σφαίρας Hill, η μάζα που πέπτει σε αυτές τις περιοχές θα χάνεται από το σύστημα και συνεπώς δεν θα είναι διαθέσιμη για

τον σχηματισμό δακτυλίων. Δηλαδή, ένας εξωπλανήτης με $R_{Roche} \ll R_{Hill}$ μπορεί να είναι καλύτερος υποψήφιος για να φιλοξενεί δακτυλίους, σε αντίθεση με έναν με $R_{Roche} \sim R_{Hill}$.

3.4.3 Ο μηχανισμός Lidov – Kozai

Η δυναμική των -εν γένει κεκλιμένων- δακτυλίων καθορίζεται εκτός των παραπάνω και από την επίδραση των τυχόν υπαρχόντων συνοδών π.χ. του μητρικού αστέρα και του μητρικού πλανήτη, ή ακόμη από την επίδραση κάποιου κοντινού δορυφόρου μεγάλης μάζας ή άλλου πλανήτη. Ο **μηχανισμός Lidov-Kozai** (LKM) ίσως είναι υπεύθυνος για τις παρατηρούμενες μεταβολές των χαρακτηριστικών (κυρίως του σχήματος) των δακτυλίων που φέρει ένας πλανήτης -μικρής περιόδου- και ίσως να εξηγεί τις ανωμαλίες στις καμπύλες φωτός αλλά και να ερμηνεύει τα πρώτα στάδια εμφάνισης των δακτυλίων. Στην εργασία τους, οι Sucerquia et al (2017) [19] κατέληξαν ότι οι δομές κεκλιμένων δακτυλίων υφίστανται βραχυχρόνιες μεταβολές του σχήματος και του προσανατολισμού τους. Αυτές οι μεταβολές είναι τέτοιας διάρκειας που επιτρέπουν σε έναν παρατηρητή να τις εντοπίσει ως μεταβολές στο βάθος της παρατηρούμενης καμπύλης φωτός και στους χρόνους επαφής (contact times). Συγκεκριμένα οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από τις μεταβολές του μεγέθους του δακτυλίου και από τις μεταβολές μιας συγκεκριμένης γωνίας. Αυτή είναι η γωνία μεταξύ του άξονα y -ο οποίος δείχνει προς τον παρατηρητή- και της διεύθυνσης \hat{n} που δείχνει κατά μέσο όρο τη διεύθυνση της στροφορμής των σωματιδίων του δακτυλίου. Οι αβεβαιότητες στα μεγέθη αυτά, με τη σειρά τους, οδηγούν σε αβεβαιότητες στη μέτρηση της τροχιακής περιόδου και της αστρικής πυκνότητας. Με άλλα λόγια, οι Sucerquia et al (2017) [19] πρότειναν ότι οι «περίεργες» μορφές των καμπυλών φωτός πιθανώς να εξηγούνται ως συνέπεια της δυναμικής εξέλιξης των δακτυλίων.

Η περιγραφή του μηχανισμού LKM έχει ως εξής: τα σωματίδια ενός αρχικά κεκλιμένου δακτυλίου που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από έναν πλανήτη που εντοπίζεται σχετικά κοντά στον μητρικό του αστέρα, δέχονται έντονη την επίδραση του τελευταίου. Αν η αρχική κλίση του δακτυλίου -ως προς το επίπεδο της τροχιάς του πλανήτη- είναι επαρκώς μεγάλη ($i_r \geq 39^\circ, 2$), εμφανίζεται μια κυκλική ανταλλαγή στροφορμής μεταξύ των σωματιδίων του δακτυλίου και του αστέρα. Το αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται ταλάντωση της κλίσης των τροχιών των σωματιδίων, αλλά και της εκκεντρότητάς τους. Η μέγιστη εκκεντρότητα που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται μόνο από την αρχική κλίση της τροχιάς του σωματιδίου και δίνεται από τη σχέση:

$$e_{max} \simeq \sqrt{1 - \frac{5}{3} \cos^2 i_r} \quad (3.10)$$

Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, αλλάζουν το σχήμα και το μέγεθος του δακτυλίου. Συγκεκριμένα, αν i_o αρκετά μεγάλο, τα σωματίδια που βρίσκονται στις εσωτερές περιοχές του δακτυλίου ίσως να αρχίσουν να συγκρούονται με τον πλανήτη και έτσι, ο δακτύλιος θα «διαβρωθεί» με τον χρόνο. Η ολική διάλυση του δακτυλίου αποφεύγεται όσο η κλίση i_r είναι μικρότερη από μία χαρακτηριστική τιμή-κατώφλι i_{th} , για την οποία:

$$\cos^2 i_{th} \simeq \frac{3}{5} \left(\frac{R_p}{\alpha} \right)^2 \left(2 \frac{\alpha}{R_p} - 1 \right) \quad (3.11)$$

όπου

$$r_{in} < \frac{R_p}{\alpha} < r_{out}$$

και r_{in}, r_{out} ο λόγος της εσωτερής και της εξωτερής ακτίνας του δακτυλίου ως προς την ακτίνα R_p του πλανήτη, αντίστοιχα και α ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς. Αντίστοιχα, όταν τα σωματίδια που βρίσκονται στις εξωτερές περιοχές του δακτυλίου αποκτήσουν τροχιά με εκκεντρότητα κοντά στην τιμή e_{max} , τότε, πιθανώς αυτά θα συνενωθούν και θα σχηματίσουν

μικρά φεγγάρια. Και αυτή η διαδικασία συνεισφέρει με τη σειρά της στην διάλυση του δακτυλίου. Αυτοί οι μηχανισμοί διάλυσης των δακτυλίων θέτουν όρια στην αρχική κλίση που πρέπει να έχει ένας δακτύλιος ώστε να «επιβιώσει» υπό την επίδραση του LKM και να μην χάσει μεγάλο ποσοστό της μάζας του.

Στην εργασία τους, οι Sucerquia et al (2017) [19] μοντελοποίησαν το σήμα της διάβασης υποθέτοντας ότι οι δακτύλιοι είναι μια ενιαία δισκοειδής δομή, με εσώτερη και εξώτερη ακτίνα r_{in} και r_{out} , αντίστοιχα, πάχος Δ και φαινόμενη κλίση $i_r = 90 - a$ (α η γωνία μεταξύ του άξονα y -ο οποίος δείχνει προς τον παρατηρητή- και της διεύθυνσης \hat{n} που δείχνει κατά μέσο όρο τη διεύθυνση της στροφορμής των σωματιδίων του δακτυλίου). Για να υπολογίσουν τη ροή, το βάθος διάβασης και την ακτίνα πλανήτη, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των Zuluaga et al (2015) [22]. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκαν έντονες ταλαντώσεις της παρατηρούμενης ροής και πλανητικής ακτίνας $F_{obs}, R_{p,obs}$, ειδικά στην περίπτωση πυκνού δακτυλίου (και άρα μεγάλου οπτικού βάθους). Σε αυτή την περίπτωση, η διάβαση των δακτυλίων εκδηλώνεται ως βύθιση στην καμπύλη φωτός κατά περίπου 5% και αυτό αντιστοιχεί σε υπερεκτίμηση της ακτίνας του πλανήτη κατά 3,5 φορές (απ' ότι θα μετρούσε κανείς αν υπήρχε δακτύλιος). Επίσης, οι μεταβολές στις διαστάσεις και το σχήμα του δακτυλίου, δημιουργούν επιπρόσθετες βυθίσεις και κορυφές στην καμπύλη φωτός.

Συνολικά, για δεδομένες τιμές των i_r, r_{in}, r_{out} , ο LKM καθορίζει την εξέλιξη και την τελική κατάληξη ενός δακτυλίου μέσω των εξής τριών μηχανισμών:

- Απώλεια υλικού των δακτυλίων λόγω συγκρούσεων των σωματιδίων που τον αποτελούν με τον πλανήτη
- Απώλεια λόγω ολίσθησης των σωματιδίων πέρα από την ακτίνα Roche, όπου από εκεί και πέρα μπορεί να συνενωθούν μεταξύ τους δημιουργώντας μικρούς δορυφόρους
- Μεταβολή της χωρικής κατανομής των δακτυλίων, και κατά συνέπεια μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δακτυλίων

Ανάλογα με την αρχική μάζα του δακτυλίου, ο μηχανισμός LKM μπορεί να προκαλέσει ολοκληρωτική διάλυση αυτού. Αν ο δακτύλιος είναι αρκετά μεγάλης μάζας, τότε οι επαγόμενες έντονα έκκεντρες τροχιές των σωματιδίων, ευνοούν τις συγκρούσεις και αυτό ίσως συμβάλλει στο να τείνουν να γίνουν πιο κυκλικές και ομοεπίπεδες. Ο συνδυασμός αυτού του μηχανισμού μαζί με άλλες διαδικασίες απώλειας σωματιδίων, οδηγεί τελικά σε μικρής κλίσης και μικρής μάζας δακτυλίους όπως αυτοί που παρατηρούνται στο Ηλιακό Σύστημα.

3.4.4 Ο μηχανισμός Poynting – Robertsondrag

Ο χρόνος ζωής των δακτυλίων μπορεί να επηρεάζεται -εκτός των παραπάνω- και από τον μηχανισμό **Poynting-Robertson drag (P-R drag)**. Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία η πίεση της ακτινοβολίας του μητρικού αστέρα αναγκάζει έναν κόκκο σκόνης που περιφέρεται γύρω από αυτόν (και γύρω από έναν πλανήτη) να χάνει βαθμιαία την στροφορμή του. Η ακτίνα της τροχιάς του κόκκου σκόνης ολοένα και ελαττώνεται ώσπου τελικά, σπειροειδώς, ο κόκκος καταλήγει να «αρπαγεί» από τον αστέρα. Ουσιαστικά, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον κόκκο σκόνης μεταφράζεται ως εμφάνιση δύναμης, μια συνιστώσα της οποίας βρίσκεται σε διεύθυνση αντίθετη της διεύθυνσης της κίνησης. Το Poynting-Robertson drag επηρεάζει σωματίδια διαστάσεων μεταξύ $1 \mu m$ και $1 mm$. Αν όμως το σωματίδιο έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές, είναι πιο πιθανό να συγκρουστεί με τα γειτονικά του σωματίδια, και να αποφύγει την σταδιακή προσέγγιση προς τον κεντρικό αστέρα. Στο Ηλιακό Σύστημα, ο μηχανισμός αυτός δεν επηρεάζει σημαντικά τους δακτυλίους του Κρόνου, καθορίζει όμως την εξέλιξη αυτών του Δία.

Μαθηματικά, ο χρόνος διάσπασης ενός δακτυλίου ακτίνας s εξαιτίας του P-R drag δίνεται από τη σχέση:

$$t_{PR} \sim \frac{8\rho s c^2}{3(L/4\pi\alpha^2)Q_{PR}(5 + \cos^2 i_r)} \quad (3.12)$$

όπου:

ρ η πυκνότητα των υλικών του δακτυλίου, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό,

L η φωτεινότητα του μητρικού αστέρα,

i_r η κλίση του επιπέδου των δακτυλίων ως προς το επίπεδο της τροχιάς του πλανήτη και

Q_{PR} ο συντελεστής απόσωσης της πίεσης της ακτινοβολίας (radiation pressure efficiency factor)

Εν γένει, ο χρόνος t_{PR} είναι σημαντικά μικρότερος για σωματίδια μικρών διαστάσεων και αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια αυτά διασπείρονται έντονα εξαιτίας του P-R drag. Ωστόσο, είναι πιθανό ότι η εξέλιξη μεμονωμένων σωματιδίων του δακτυλίου εξαρτάται από τις συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων. Τότε, λαμβάνεται η μέση τιμή του t_{PR} .

Αν τώρα, ο δακτύλιος είναι οπτικά πυκνός, τότε ο χρόνος t_{PR} εξαρτάται από την επιφανειακή πυκνότητα (Σ) του δακτυλίου και όχι από τις διαστάσεις των μεμονωμένων σωματιδίων. Αν ληφθεί υπόψη ότι η μέση επιφάνεια του δακτυλίου που εκτίθεται στον μητρικό αστέρα είναι:

$$2sini (R_{out}^2 - R_{in}^2)$$

τότε, ο χρόνος διάσπασης του δακτυλίου είναι της μορφής:

$$t_{PR} \sim \frac{\pi c^2 \Sigma}{sini(L/4\pi\alpha^2)Q_{PR}(5 + \cos^2 i_r)} \quad (3.13)$$

Εφόσον $t_{PR} \sim \Sigma$, ο χρόνος ζωής ενός δακτυλίου αναμένεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερος για δακτυλίους με επιφανειακή πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του Κρόνου. Επίσης, ο χρόνος «εξάλειψης» του δακτυλίου είναι αντιστρόφως ανάλογος του ημιτόνου της κλίσης του, i_r . Συνεπεία τούτου, δακτύλιοι με μικρότερη κλίση αναμένεται να έχουν μεγαλύτερους χρόνους ζωής. Αυτό συμβαίνει διότι με τη μικρή αυτή κλίση, τελικά εκτίθεται στην ακτινοβολία του μητρικού αστέρα μικρότερο τμήμα της επιφάνειας των δακτυλίων.

3.5 Εξάπλωση (Spreading) δακτυλίων

Κατά την αλληλεπίδραση δύο σωματιδίων που ανήκουν σε δακτύλιο, η ολική στροφορμή διατηρείται. Αυτό σημαίνει ότι αν μεταβληθεί η ταχύτητά τους, θα πρέπει να έχει συμβεί ανταλλαγή στροφορμής. Εφόσον τα σωματίδια που βρίσκονται σε εσώτερες τροχιές έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες σε σύγκριση με αυτά που βρίσκονται σε εξώτερες, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά στροφορμής από τις εσώτερες προς τις εξώτερες περιοχές, πράγμα το οποίο σημαίνει πως αυξάνεται η ακτίνα της τροχιάς των σωματιδίων που βρίσκονται στις τελευταίες. Αντίστοιχα, η ακτίνα των τροχιών των σωματιδίων που εντοπίζονται στις εσώτερες περιοχές, ολοένα ελαττώνεται. Έτσι, ο δακτύλιος «απλώνεται» καθώς η στροφορμή «ρέει» προς τα έξω. Θεωρητικά, η διαδικασία αυτή θα τελειώσει και η ισορροπία θα επέλθει όταν ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια. Τότε, όλα τα σωματίδια θα έχουν προσπέσει στο κέντρο, δηλαδή στον πλανήτη, ενώ όλη τη στροφορμή θα φέρει ένα απείρως μικρό σωματίδιο ευρισκόμενο στο άπειρο.

Η ανταλλαγή στροφορμής μπορεί να θεωρηθεί και να αντιμετωπιστεί ως επίδραση «ιξώδους» -όχι με την αυστηρή του έννοια. Η ροπή ιξώδους που ασκείται από μια περιοχή που

βρίσκεται εντός ακτίνας r_o προς την περιοχή εκτός της ακτίνας αυτής, δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma_\nu = 3\pi\Sigma\nu r_o^2\Omega_o \quad (3.14)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες και Ω_o η γωνιακή συχνότητα στην απόσταση r_o . Αν συνδυαστούν οι εξισώσεις διατήρησης στροφορμής και μάζας, προκύπτει η παρακάτω σχέση για τη χρονική μεταβολή της επιφανειακής πυκνότητας του δακτυλίου:

$$\frac{\partial\Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\sqrt{r} \frac{\partial(\nu\Sigma\sqrt{r})}{\partial r} \right] \quad (3.15)$$

Στους δακτυλίους που βρίσκονται στο εσωτερικό της ακτίνας Roche, η αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ομοιόμορφο ιξώδες. Τα σωματίδια ανταλλάσσουν στροφορμή κατά τις κρούσεις μεταξύ τους, αλλά και εξαιτίας της βαρυτικής τους αλληλεπίδρασης όταν πλησιάζουν μεταξύ τους. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η επιφανειακή πυκνότητα των δακτυλίων, τόσο ισχυρότερες οι ανταλλαγές στροφορμής. Σύμφωνα με τους Daisaka et al (2001) [8], για μαζικούς δακτυλίους, το ιξώδες είναι $\nu \propto M_{ring}^2$, όπου $M_{ring} \simeq \pi r_R^2 \Sigma$ η μάζα τους. Ο χαρακτηριστικός χρόνος εξάπλωσης (λόγω ιξώδους) ενός δακτυλίου ακτίνας r_R και μάζας M_{ring} , δίνεται από τη σχέση:

$$t_\nu = \frac{r_R^2}{\nu} \simeq \frac{T_R}{\mu^2} \quad (3.16)$$

όπου

$$\mu = \frac{M_{ring}}{M_p}$$

με M_p να είναι η μάζα του πλανήτη και T_R η τροχιακή περίοδος σε απόσταση όσο η ακτίνα r_R . Εφόσον:

$$\frac{d\mu}{dt} = -\frac{\mu}{t_\nu} \quad (3.17)$$

και ορίζοντας την ποσότητα:

$$\bar{t} = \frac{t}{T_R}$$

προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\mu}{d\bar{t}} = -30\mu^3 \quad (3.18)$$

με λύση της μορφής:

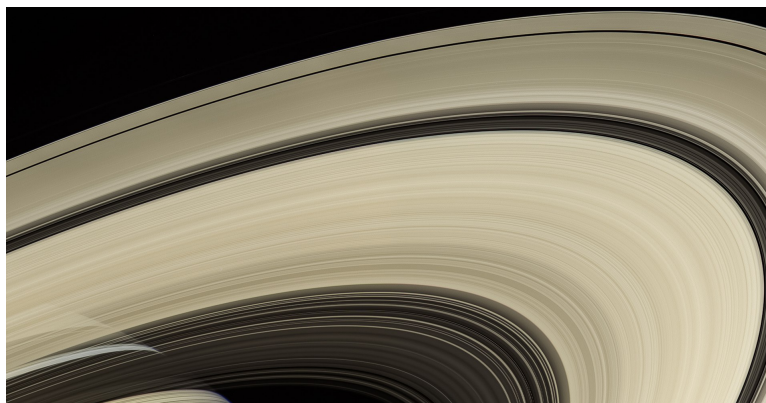
$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{60\bar{t} + \mu^{-2}}} \quad (3.19)$$

Στην περίπτωση του Κρόνου, η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και της μετρούμενης μάζας των δακτυλίων, ευνοεί και ενισχύει το σενάριο της αρχέγονης προέλευσης των δακτυλίων του Κρόνου. Δηλαδή, η σημερινή τους μάζα, θα μπορούσε να εξηγηθεί ως το αποτέλεσμα της εξέλιξης τους στην ιστορία του ηλιακού συστήματος. Βέβαια, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι οι δακτύλιοι του Κρόνου αποτελούν μεταγενέστερη και «νεαρή» δομή και ότι η συμφωνία μεταξύ μοντέλου και μετρήσεων είναι απλώς συμπτωματική.

3.6 Δακτύλιοι στο Ηλιακό Σύστημα

3.6.1 Κρόνος

Στο Ηλιακό Σύστημα, δακτύλιοι παρατηρούνται γύρω από όλους τους εξωτερικούς πλανήτες, με τον Κρόνο να κυριαρχεί έχοντας τους πιο φωτεινούς και εύκολα παρατηρήσιμους. Ανακαλύφθηκαν το 1610 από τον Γαλιλαίο. Οι δακτύλιοι του Κρόνου είναι σχεδόν επίπεδες δομές, με πάχος της τάξης των δέκα μέτρων και διάμετρο της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων. Συγκεκριμένα, εκτείνονται σε αποστάσεις 7.000 km από την επιφάνεια του Κρόνου, μέχρι 80.000 km. Τα αντικείμενα που τους αποτελούν είναι παγωμένα και έχουν διαστάσεις από 1 μm μέχρι 10 m. Σχετικά με την σύσταση των δακτυλίων μπορεί να εξαχθεί πληροφορία από το παρατηρούμενο φάσμα. Σε αντίθεση με τους δακτυλίους όλων των υπολοίπων εξωτερικών πλανητών, οι οποίοι έχουν μικρή ανακλαστικότητα και είναι σκοτεινοί, οι δακτύλιοι του Κρόνου κυριαρχούνται από πάγο και συνεπώς, σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφανειακή τους πυκνότητα, ανακλούν έντονα το ηλιακό φως. Επίσης, παρ' όλο που από τη Γη μπορούν να παρατηρηθούν μόνο δύο ευδιάκριτα κενά ανάμεσα στους δακτυλίους του Κρόνου, η αποστολή Voyager αποκάλυψε ότι εκεί εντοπίζονται πολυάριθμα κενά. Τα κενά αυτά είτε έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της παρουσίας κάποιου δορυφόρου εκεί, είτε στις αποστάσεις αυτές συμβαίνει ασταθής συντονισμός. Ακόμη, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρωματικές διαφορές



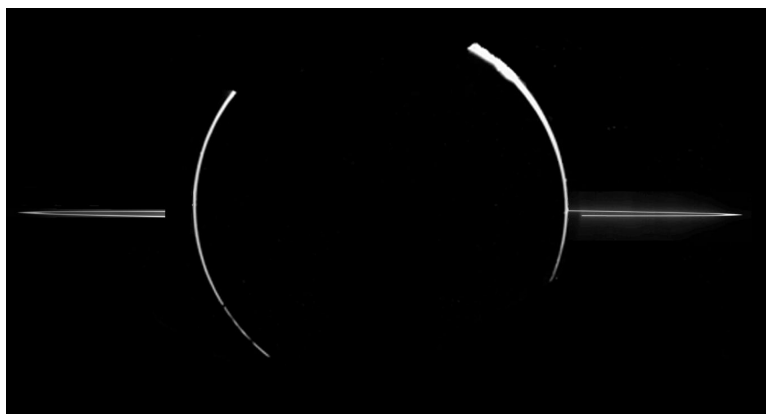
Εικόνα 3.1 – Οι δακτύλιοι του Κρόνου όπως φωτογραφήθηκαν από την αποστολή Cassini. [Πηγή: <https://photojournal.jpl.nasa.gov>]

που παρατηρούνται ανάμεσα στους δακτυλίους του Κρόνου αποτελούν ένδειξη διαφορετικής σύστασης που πιθανώς οφείλεται στην επίδραση της διαπλανητικής σκόνης που τους «βομβαρδίζει» και κάνει πιο σκοτεινά τα σωματίδια που βρίσκονται εκεί. Σε αντίθεση με κάποιους από τους δορυφόρους του Κρόνου, όπως για παράδειγμα ο Τιτάνας, η Διώνη και ο Εγκέλαδος, που η σύστασή τους είναι μείγμα βραχωδών και παγωμένων υλικών, οι δακτύλιοί του, αποτελούνται κατά 99% περίπου από παγωμένο νερό. Υπάρχει επίσης και μια βραχώδης συνιστώσα η οποία αυξάνεται με τον χρόνο εξαιτίας του βομβαρδισμού των δακτυλίων με πλούσιους σε πυριτιούχα υλικά μετεωροειδείς. Έτσι η σημερινή παρατηρούμενη σύσταση υποδηλώνει ότι αυτοί οι δακτύλιοι στην αρχή της δημιουργίας τους ήταν καθαρός πάγος. Γενικά, σχετικά με την προέλευση και την ηλικία των δακτυλίων υπάρχουν διάφορα σενάρια και ερμηνείες, χωρίς όμως κάποιο από αυτά να είναι γενικώς αποδεκτό και επικρατόν. Σύμφωνα με τα δεδομένα της αποστολής Cassini οι δακτύλιοι του Κρόνου δεν αποτελούν αρχέγονο υλικό προερχόμενο από τις αρχές δημιουργίας του Κρόνου, αλλά αντιθέτως, η ηλικία τους υπολογίζεται να είναι αρκετά μικρότερη, και ίση με περίπου 100 εκατομμύρια έτη. Δύο είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα σενάρια. Το πρώτο από αυτά, υποστηρίζει ότι οι δακτύλιοι του Κρόνου προήλθαν από την

διάλυση κάποιου δορυφόρου που υπήρχε εκεί. Ο δορυφόρος αυτός είναι πιθανό να διαλύθηκε υπό την επίδραση ισχυρών παλιρροϊκών δυνάμεων εξαιτίας της κοντινής του προσέγγισης στον πλανήτη, ή εξαιτίας μιας σύγκρουσης με άλλο αντικείμενο (αστεροειδή ή κομήτη). Σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο, το υλικό των δακτυλίων αποτελεί τα απομεινάρια του υλικού που σχημάτισε τον Κρόνο και τους δορυφόρους του.

3.6.2 Δίας

Οι δακτύλιοι του Δία ανιχνεύθηκαν το 1979 χάρη στην αποστολή Voyager 1 και χαρακτηρίζονται ως «αιθέριοι». Αυτό συμβαίνει γιατί χαρακτηρίζονται από οπτικά βάρη $\tau \ll 1$ και πιο συγκεκριμένα, της τάξης 10^{-8} έως και 10^{-6} . Στην πράξη, αυτό μεταφράζεται ως εξής: δεν υπάρχει αρκετά πυκνό υλικό για να μπορέσει να ανιχνευθεί μέσω της μεθόδου επιπρόσθησης (occultation). Οι δακτύλιοι αυτοί, εκτείνονται σε αποστάσεις μεταξύ 92.000 km και 226.000 km από την επιφάνεια του Δία. Επίσης, η ηλικία τους δεν είναι γνωστή με βεβαιότητα, αλλά πιθανώς υπάρχουν από την εποχή της δημιουργίας του Δία. Τέτοιοι αιθέριοι

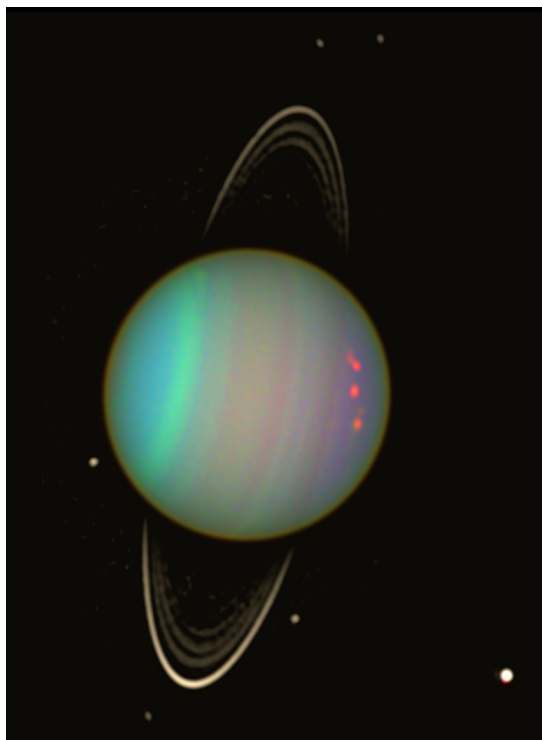


Εικόνα 3.2 – Οι δακτύλιοι του Δία όπως φωτογραφήθηκαν από τη διαστημική συσκευή Galileo τη στιγμή διάβασης του πλανήτη μπροστά από τον ηλιακό δίσκο. [Πηγή: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>]

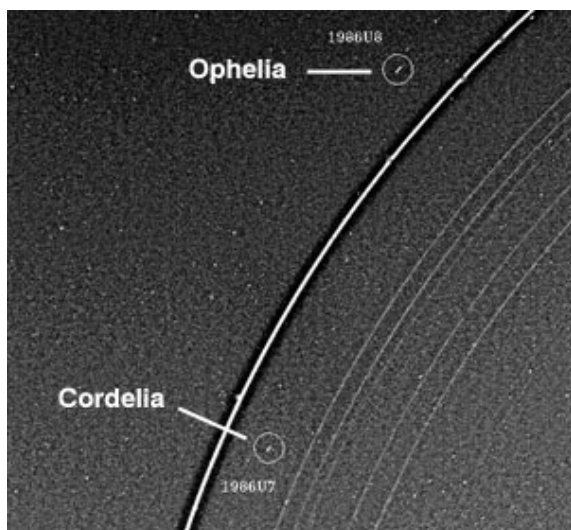
δακτύλιοι αποτελούνται κατά κύριο λόγο -ή και ολοκληρωτικά- από σωματίδια σκόνης με διαστάσεις από $0.1 \mu m$ μέχρι και $100 \mu m$. Από τις διαστάσεις των συστατικών των δακτυλίων και μόνο, καταλαβαίνει κανείς ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να παρατηρηθούν. Μπορούν όμως να γίνουν ορατοί και να φωτογραφηθούν κατά τη διάρκεια ηλιακών επιπροσθησεων, δηλαδή κατά την επιπρόσθηση του Δία πίσω από τον ηλιακό δίσκο και όταν η κλίση τους είναι τέτοια ώστε να παρατηρούνται edge-on, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Τα συστατικά σωματίδια των δακτυλίων του Δία έχουν χρόνους ζωής πολύ μικρότερους από την ηλικία του ηλιακού συστήματος και αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι πρέπει να υπάρχει κάποιος μηχανισμός τροφοδότησης αυτών. Η σκόνη αυτή λοιπόν, θα πρέπει να ανανεώνεται συνεχώς μέσω συγκρούσεων μεταξύ σωμάτων που κινούνται στη γειτονιά των δακτυλίων. Τα σωματίδια αυτά, εκτός από τη βαρυτική έλξη του πλανήτη, υπόκεινται και σε μη-βαρυτικές δυνάμεις όπως οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις λόγω μαγνητόσφαιρας, η πίεση της ακτινοβολίας και το Poynting-Robertson drag και οι δυνάμεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια υλικού από τους δακτυλίους.

3.6.3 Ουρανός

Οι δακτύλιοι του Ουρανού είναι σχετικά νεαροί σε ηλικία (600 εκ. χρόνια), ανακαλύφθηκαν το 1977 και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο Ηλιακό Σύστημα, μετά βέβαια, από αυτούς του Κρόνου. Το 1986 η αποστολή Voyager 2 αποκάλυψε την ύπαρξη δύο επιπλέον δακτυλίων, όπως επίσης, και στο διάστημα 2003-2005 εντοπίστηκαν ακόμα δύο, από φωτογραφίες του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble. Οι ακτίνες των δακτυλίων αυτών κυμαίνονται από 38000 km μέχρι 98000 km, ενώ ταυτόχρονα στις περιοχές ανάμεσά τους μπορεί να υπάρχουν διάσπαρτες ζώνες ή τόξα σκόνης. Όσο αφορά τη σύστασή τους, αποτελούνται από υδάτινο πάγο και άλλα οργανικά υλικά που έχουν φτάσει εκεί μέσω της ακτινοβολίας (radiation-processed organics). Εκτός από τη σκόνη που εντοπίζεται εκεί, υπάρχουν ακόμη και αντικείμενα διαμέτρου 0,2 – 20 m. Παρ' όλο που οι δακτύλιοι των δύο παγωμένων γιγάντων, Ουρανού και Ποσειδώνα, είναι οι περισσότερο ανεξερευνήτοι σε σύγκριση με αυτούς του Κρόνου, φαίνεται να είναι



Εικόνα 3.3 – Ο Ουρανός και οι δακτύλιοί του, όπως φωτογραφήθηκαν από το τηλεσκόπιο Hubble. [Πηγή: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>]



Εικόνα 3.4 – Οι δορυφόροι του Ουρανού, Κορδηλία και Οφηλία. [Πηγή: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>]

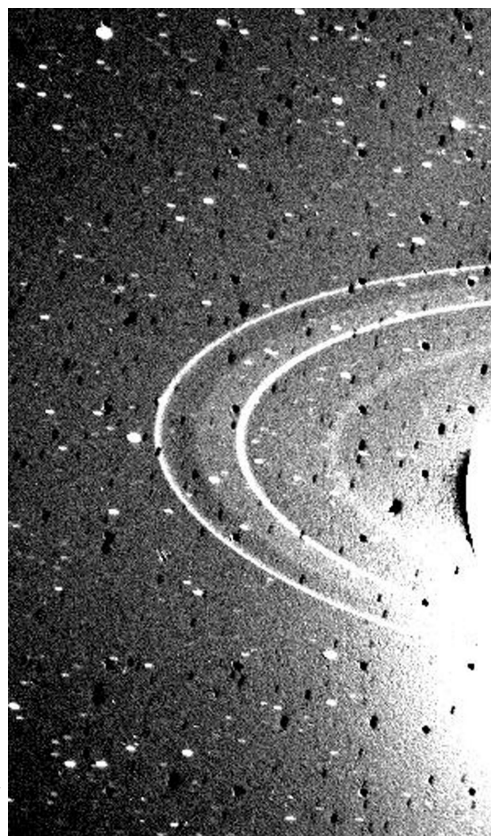
κά προς τα έξω και η ηλικία των δακτυλίων δεν θα ξεπερνούσε τα 10^6 χρόνια. Το σενάριο

ευκολότερη η ερμηνεία της προέλευσής τους. Στην περίπτωση λοιπόν του Ουρανού, η ερμηνεία που δίνεται είναι ότι οι δακτύλιοι προήλθαν από την καταστροφική σύγκρουση που υπέστησαν φεγγάρια που κάποτε υπήρχαν εκεί. Μετά τη σύγκρουση, τα θραύσματα συνέχιζαν να περιφέρονται σε τροχιά γύρω από το κεντρικό σώμα μόνο σε αποστάσεις όπου οι τροχιές αυτές χαρακτηρίζονται από ευστάθεια. Ακόμη, επειδή ο άξονας περιστροφής του Ουρανού είναι σχεδόν παράλληλος με το επίπεδο της τροχιάς του, οι δακτύλιοί του που βρίσκονται στο επίπεδο του ισημερινού του, φαίνεται να είναι κάθετοι στο επίπεδο της τροχιάς. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 3.3. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει κάποιος μηχανισμός που συγκρατεί το υλικό των δακτυλίων εκεί, διότι αν δεν υπήρχε, αυτοί θα απλώνονταν ακτινικά

που προσπαθεί να δώσει ερμηνεία στο ζήτημα αυτό, έχει προταθεί από τους Goldreich και Tremaine. Σύμφωνα με αυτό, σε κάθε δακτύλιο αντιστοιχούν δύο γειτονικοί δορυφόροι που αλληλεπιδρούν βαρυτικά με αυτόν, διατηρώντας τον σε περίπου σταθερή τροχιά. Ένα τέτοιο ζεύγος δορυφόρων ανακάλυψε η διαστημική συσκευή Voyager 2 γύρω από τον φωτεινότερο δακτύλιο του Ουρανού. Τα φεγγάρια αυτά, ονομάζονται Κορδηλία και Οφηλία και φαίνονται στην εικόνα 3.4.

3.6.4 Ποσειδώνας

Οι δακτύλιοι του Ποσειδώνα ανακαλύφθηκαν μόλις το 1984 από τηλεσκόπιο του European Southern Observatory (ESO) στη Χιλή. Οι δακτύλιοι αυτοί εκτείνονται σε αποστάσεις μεταξύ των 40.900 km και 63.000 km από τον πλανήτη. Αποτελούνται από σκοτεινή σκόνη διαμέτρου της τάξης των μερικών μm και υπάρχει και μια μικρή συνιστώσα οργανικών ενώσεων. Το οπτικό τους βάθος κυμαίνεται από $\sim 10^{-4}$ έως $\sim 0,09$. Με άλλα λόγια, είναι εξαιρετικά σκοτεινοί και δύσκολα παρατηρήσιμοι. Επίσης, όπως και στην περίπτωση του πλανήτη Ουρανού, έτσι και σε αυτή του Ποσειδώνα, παρατηρούνται δορυφόροι να περιφέρονται στο εσωτερικό του συστήματος των δακτυλίων. Για την προέλευση των δακτυλίων του Ποσειδώνα, πιστεύεται ότι είναι πολύ νεαρότεροι του ηλιακού συστήματος και ότι σχηματίστηκαν εξαιτίας της διάλυσης κάποιου δορυφόρου που υπήρχε εκεί. Ο εξώτερος από τους δακτυλίους φέρει το όνομα Άνταμς και διαθέτει πέντε τόξα ύλης με τα ονόματα Αδελφότητα, Ισότητα 1, Ισότητα 2, Ελευθερία και Θάρρος. Τα τόξα αυτά εξαιτίας της αλληλεπίδρασης του δακτυλίου με τον δορυφόρο Γαλάτεια, φαίνεται να χαρακτηρίζονται από εντυπωσιακή σταθερότητα, αφού τα τελευταία περίπου 35 χρόνια έχουν αλλάξει αμελητέα.

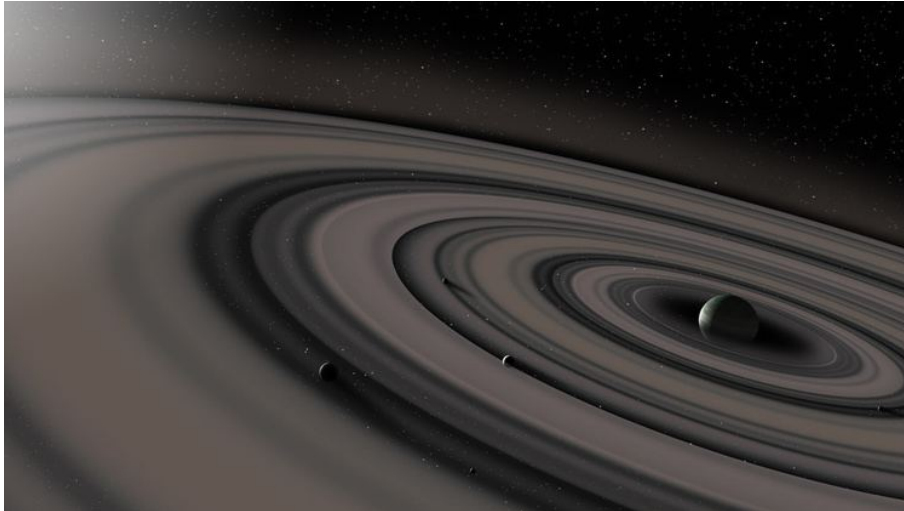


Εικόνα 3.5 – Οι δακτύλιοι του Ποσειδώνα όπως φωτογραφήθηκαν από τη διαστημική συσκευή Voyager 2. [Πηγή: <http://photojournal.jpl.nasa.gov>]

3.7 Ο εξωπλανήτης J1407b

Ο μοναδικός εξωηλιακός πλανήτης που έχει επιβεβαιωθεί ότι διαθέτει δακτυλίους είναι ο αέριος γίγαντας J1407b και ανακαλύφθηκε μόλις το 2012 από την ομάδα των Eric Mamajek και Matthew Kenworthy στο πανεπιστήμιο του Rochester (Kenworthy et al (2015) [13]). Το χαρακτηριστικό της καμπύλης φωτός που οδήγησε στην ανακάλυψη είναι ότι η διάρκεια της διάβασης ήταν της τάξης των μερικών εβδομάδων, ενώ ταυτόχρονα σημειώνονταν ταχείες μεταβολές σε χρονικές κλίμακες των 10 min. Αυτό συνέβαινε εξαιτίας της διέλευσης του φωτός του μητρικού αστέρα μέσα από το σύστημα δακτυλίων σκόνης που περιβάλλει τον πλα-

νήτη. Η ίδια ομάδα επιστημόνων υπολόγισε την εξωτερική ακτίνα του συστήματος δακτυλίων του πλανήτη αυτού και τη βρήκε να είναι της τάξης των 90 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Υπερβαίνει δηλαδή την αντίστοιχη ακτίνα των δακτυλίων του Κρόνου κατά 200 φορές. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι εάν οι δακτύλιοι αυτοί έπαιρναν τη θέση των δακτυλίων του Κρόνου, τότε θα ήταν εύκολα ορατοί δια γυμνού οφθαλμού από τη Γη και μάλιστα, με λαμπρότητα πολλές φορές μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα της Πανσελήνου. Παρατηρήθηκε



Εικόνα 3.6 – Καλλιτεχνική απεικόνιση του εξωηλιακού πλανήτη J1407b, ο οποίος είναι και ο μοναδικός εξωπλανήτης που επιβεβαιωμένα φιλοξενεί σύστημα δακτυλίων. [Πηγή: <https://exoplanets.nasa.gov>]

ακόμη, ότι ανάμεσα στους 30 αυτούς δακτυλίους εντοπίζονται κενές τροχιές. Το πιο ευδιάκριτο από αυτά παρατηρείται σε απόσταση $\sim 61 \times 10^6 \text{ km}$ από το κέντρο. Η ανίχνευση του κενού αυτού υποδεικνύει την πιθανή ύπαρξη κάποιου δορυφόρου εκεί. Εάν πράγματι υπάρχει ο δορυφόρος αυτός, αναμένεται να έχει μάζα $0,8 M_{\oplus}$. Μια ερμηνεία που δίνεται στο σύστημα αυτό, είναι ότι εξαιτίας της μεγάλης μάζας των δακτυλίων (περίπου όσο η μάζα της Γης), είναι πιθανό η παρατηρούμενη εικόνα να αποτελεί αρχικό στάδιο σχηματισμού δορυφόρων και όχι ένα «ευσταθές» σύστημα δακτυλίων όπως του Κρόνου. Έτσι, αναμένεται μέσα στα επόμενα μερικά εκατομμύρια χρόνια οι δακτύλιοι αυτοί να εκλείψουν. Θα έλεγε κανείς δηλαδή, ότι η ανακάλυψη του συστήματος αυτού αποτελεί ένα στιγμιότυπο της διαδικασίας σχηματισμού δορυφόρων!

Κεφάλαιο 4

Μέθοδος αναζήτησης εξωδακτυλίων

Πολλοί από τους εξωπλανήτες που ανακαλύπτονται καθημερινά, έχουν μορφή που μας είναι οικεία από το Ηλιακό Σύστημα, γι' αυτό και συνήθως τα αντικείμενα αυτά χαρακτηρίζονται ως *super-Earths*, *mini-Neptunes* και *hot-Jupiters*. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντοτε. Έχουν ανακαλυφθεί και αντικείμενα που δεν υπάρχει ανάλογό τους στο Ηλιακό Σύστημα. Τα αντικείμενα αυτά καλούνται συνήθως «*super-puffs*». Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι πλανήτες εξαιρετικά χαμηλής πυκνότητας ($\sim 0.1 \text{ gr/cm}^3$). Η ύπαρξη αυτών δεν είναι εύκολο να ερμηνευθεί με όρους πλανητικής φυσικής, οπότε και αναζητούνται άλλες ερμηνείες, όπως η ύπαρξη δακτυλίων. Μέχρι σήμερα, δεν μπορεί να δοθεί απάντηση με βεβαιότητα σε κάτι τέτοιο, παρ' όλα αυτά προτείνονται ποικίλοι τρόποι ερμηνείας.

Ένα από τα σενάρια, υποστηρίζει ότι πιθανά γύρω από τον πλανήτη υπάρχει σύστημα δακτυλίων. Αν όλη η ελάττωση της φωτεινότητας του μητρικού αστέρα αποδοθεί στη διάβαση σφαιρικού πλανήτη (χωρίς δακτύλιο) τότε, θα υπερεκτιμηθεί η ακτίνα του και συνεπώς, θα υποτιμηθεί η πυκνότητά του. Αν όμως, η ελάττωση της φωτεινότητας αποδοθεί εν μέρει στον πλανήτη και εν μέρει σε δακτυλίους που αυτός φιλοξενεί, η ακτίνα του πλανήτη θα υπολογιστεί να έχει μικρότερη τιμή και συνεπώς, η πυκνότητά του δεν θα είναι ασυνήθιστα χαμηλή. Στο σενάριο ερμηνείας μέσω δακτυλίων, εφόσον η μάζα αυτών αναμένεται να είναι μικρή, η ύπαρξή τους δεν μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή στη δυναμική του συστήματος. Όμως, η ακριβής φωτομετρία και φασματοσκοπία υπόσχονται την ανίχνευση δακτυλίων και για το σκοπό αυτό είναι χρήσιμες οι παρατηρήσεις των διαβάσεων αλλά και του φωτός που αυτά τα αντικείμενα ανακλούν. Πιθανά αποτυπώματα που αφήνουν οι δακτύλιοι είναι για παράδειγμα η αύξηση της λαμπρότητας, η παροδική «εξαφάνιση» του πλανήτη εξαιτίας της κενής περιοχής που πιθανά μεσολαβεί μεταξύ πλανήτη και δακτυλίου ή ακόμα η ασυμφωνία μεταξύ της έντασης του ανακλώμενου φωτός και της έντασης των θερμικών εκπομπών.

Παρακάτω περιγράφεται η μέθοδος που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία για την ανίχνευση ενδείξεων που υποστηρίζουν την παρουσία δακτυλίων γύρω από έναν πλανήτη.

4.1 Ουράνια Μηχανική - Προσδιορισμός τροχιάς

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων ενός πλανήτη συναρτήσει του χρόνου. Οι συντεταγμένες αυτές είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των τιμών της ροής (ενέργεια ανά χρόνο και ανά επιφάνεια) που δίνουν τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα. Η διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων του πλανήτη, ουσιαστικά είναι η επίλυση του προβλήματος Kepler.

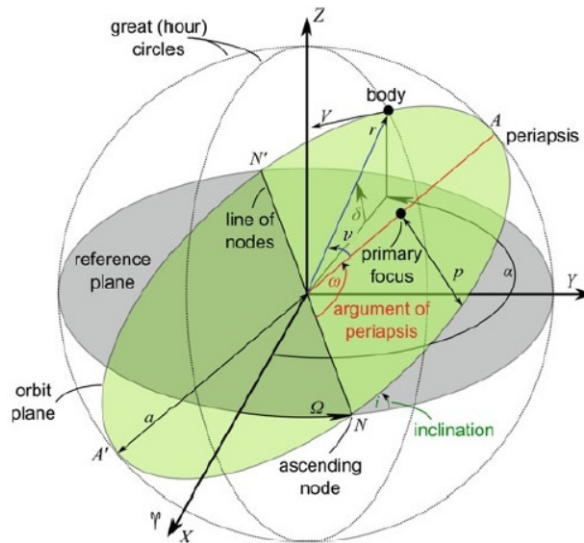
Έστω δύο αντικείμενα μάζας M_p (πλανήτης) και $M_s \gg M_p$ (αστέρας), με το πρώτο να περιφέρεται γύρω από το τελευταίο. Πρόκειται δηλαδή, για το περίφημο πρόβλημα των δύο σωμάτων. Η σχετική κίνηση του ελαφρύτερου σώματος ως προς το βαρύτερο, περιγράφεται από την εξίσωση κίνησης (2ος Νόμος Newton):

$$\ddot{\vec{r}} + \mu \frac{\vec{r}}{r^3} = 0 \quad (4.1)$$

όπου $\mu = G(M_s + M_p) \simeq GM_s$ η παράμετρος μάζας του συστήματος και $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ η σταθερά της παγκόσμιας έλξης. Η λύση του προβλήματος αυτού, έχει τη γενική μορφή εξίσωσης που περιγράφει κωνική τομή. Συνεπώς, η κίνηση του σώματος μάζας M_p σε πολικές συντεταγμένες, δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{\alpha(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu} \quad (4.2)$$

όπου α και e ο μεγάλος ημιάξονας και η εκκεντρότητα της τροχιάς, και ν η **αληθής ανωμαλία**, που δίνει τη θέση του πλανήτη σε κάθε σημείο της τροχιάς του (σχήμα 4.1). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για γωνία που έχει αρχή μέτρησης την ευθεία που ενώνει τις δύο εστίες της έλλειψης (γραμμή των αψίδων) και αυξάνεται κατά τη φορά κίνησης του σώματος μάζας m . Στη λύση αυτή βέβαια (εξ. 4.2), δεν υπεισέρχεται ο χρόνος και αυτό διότι ο 2ος Νόμος του Newton δεν μπορεί να λυθεί ως προς το χρόνο σε κλειστή μορφή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε από τον Kepler, χρησιμοποιώντας γεωμετρικές έννοιες.



Εικόνα 4.1 – Ορισμός των Κεπλεριανών στοιχείων της τροχιάς του πλανήτη. Τα σημεία N , N' ονομάζονται αναβιβάζων και καταβιβάζων σύνδεσμος, αντίστοιχα. Φαίνεται επίσης η γραμμή των αψίδων, AA' και η γραμμή των συνδέσμων, NN' . Επίσης, παρουσιάζεται η φορά μέτρησης της αληθούς ανωμαλίας, ν , του ορίσματος του περιάστρου, ω , καθώς και του μήκους του αναβιβάζοντος συνδέσμου, Ω .

Η **εξίσωση Kepler** έχει τη μορφή:

$$M = E - e \sin E \quad (4.3)$$

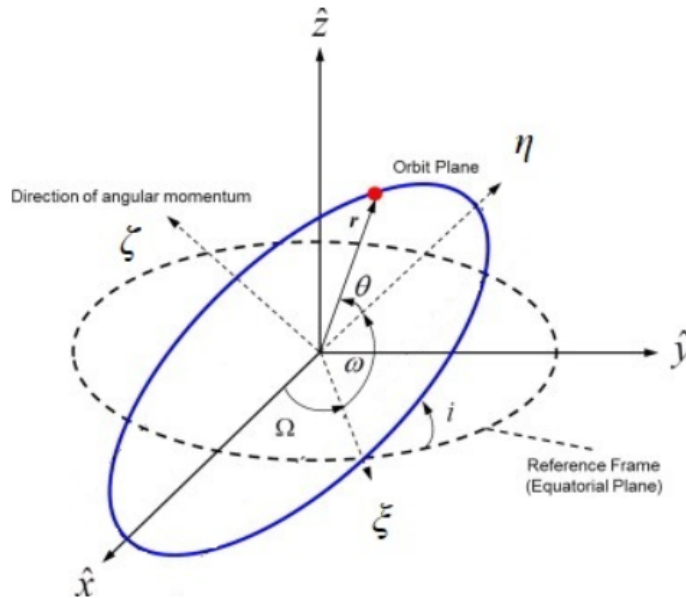
όπου:

E η **έκκεντρη ανωμαλία**,

e η εκκεντρότητα της τροχιάς

και $M = n(t - t_o) = \sqrt{\frac{G(M_s + M_p)}{a^3}}(t - t_o)$ η **μέση ανωμαλία**, με t_o να είναι ο χρόνος διάβασης από το περίαστρο της τροχιάς και με τη **μέση κίνηση** n να δίνεται από τη σχέση $n = \frac{2\pi}{P}$ (P η τροχιακή περίοδος). Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η μέση ανωμαλία δεν αναφέρεται στο περιφερόμενο σώμα μάζας M_p . Αναφέρεται σε υποθετικό κινητό που περιφέρεται με σταθερή γραμμική ταχύτητα κατά μήκος της τροχιάς του και είναι ανάλογη του εμβαδού που σαρώνει η επιβατική ακτίνα (το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει κάθε στιγμή το κινητό με την εστία) στο διάστημα μεταξύ τυχαίας χρονικής στιγμής t και του χρόνου t_o . Συνεπώς, το πρώτο στάδιο στην διαδικασία εύρεσης της θέσης του πλανήτη στην τροχιά του, είναι ο υπολογισμός της έκκεντρης ανωμαλίας. Με γνωστή την έκκεντρη ανωμαλία, μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του πλανήτη.

Παρακάτω, θα χρησιμοποιηθούν δύο συστήματα συντεταγμένων (σχήμα 4.2). Αυτά είναι το σύστημα xyz και το σύστημα $\xi\eta\zeta$. Και τα δύο έχουν σαν αρχή των αξόνων το κέντρο του μητρικού αστέρα. Το σύστημα xyz ορίζεται έτσι ώστε ο x -άξονας να δείχνει προς τον παρατηρητή, ενώ το επίπεδο xy ταυτίζεται με τον ισημερινό του αστέρα. Το σύστημα $\xi\eta\zeta$ ορίζεται έτσι ώστε το τροχιακό επίπεδο να συμπίπτει με το επίπεδο $\xi\eta$. Η επίλυση του προβλήματος



Εικόνα 4.2 – Ορισμός συστημάτων συντεταγμένων με αρχή των αξόνων το κέντρο του μητρικού αστέρα.

συνεχίζεται με τον υπολογισμό των συνιστωσών του διανύσματος θέσης του πλανήτη στο σύστημα $\xi\eta\zeta$ του επιπέδου της τροχιάς:

$$[\xi, \eta, \zeta] = [\alpha(\cos E - e), \alpha\sqrt{1 - e^2}\sin E, 0] \quad (4.4)$$

Η συνιστώσα ζ είναι μηδενική, αφού εξ ορισμού στο σύστημα $\xi\eta\zeta$ οι δύο από τους άξονες ορίζονται με βάση το επίπεδο της τροχιάς. Στην προκειμένη περίπτωση το τροχιακό επίπεδο ταυτίζεται με το επίπεδο $\xi\eta$.

Σε επόμενο στάδιο θα πρέπει να μετατρέπουν οι συνιστώσες αυτές από το σύστημα $\xi\eta\zeta$ στο σύστημα xyz . Για το σκοπό αυτό, θα χρειαστεί το μέτρο της στροφορμής, L . Αυτό, θα

είναι ίδιο και στα δύο συστήματα και ίσο με:

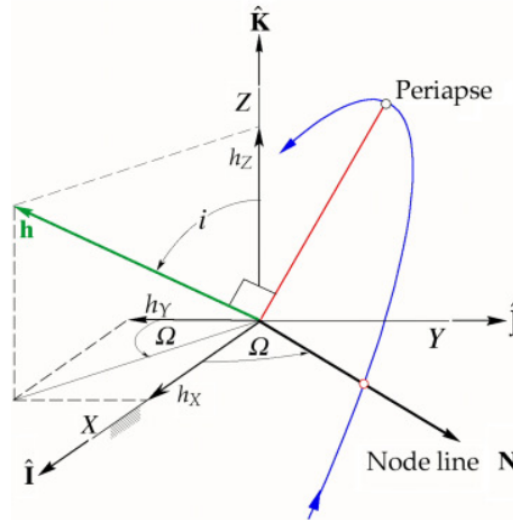
$$L = \sqrt{G(M_s + M_p)\alpha\sqrt{1 - e^2}} \simeq \sqrt{GM_s\alpha\sqrt{1 - e^2}} \quad (4.5)$$

όπου $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ η σταθερά της παγκόσμιας έλξης.

Επίσης, σύμφωνα με το σχήμα 4.3, για τις συνιστώσες οποιουδήποτε διανύσματος \vec{h} που βρίσκεται στον άξονα ζ - άρα και για τις συνιστώσες της στροφορμής \vec{L} - ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} L_x &= L \sin \Omega \sin i \\ L_y &= -L \cos \Omega \sin i \\ L_z &= L \cos i \\ L_x^2 + L_y^2 + L_z^2 &= L^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

όπου Ω το μήκος του αναβιβάζοντος συνδέσμου (χαρακτηριστικό της τροχιάς, σταθερό στο χρόνο) και i η κλίση του επιπέδου της τροχιάς ως προς την ευθεία παρατήρησης. Το πρόβλημα, δηλαδή, ανάγεται σε πρόβλημα επίλυσης συστήματος τεσσάρων εξισώσεων, με τέσσερις αγνώστους: Ω, L_x, L_y, L_z .

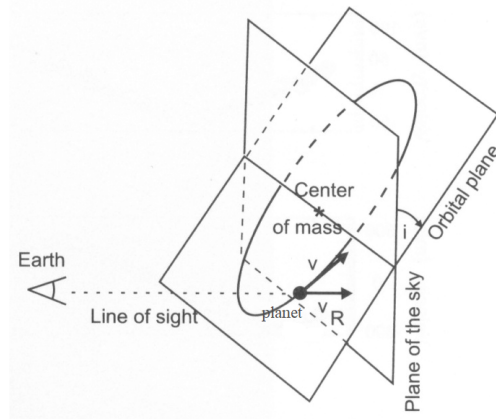


Εικόνα 4.3 – Σχήμα για τον προσδιορισμό των συνιστωσών τυχαίου διανύσματος \vec{h} που βρίσκεται στον άξονα z.

Επίσης, για καλύτερη κατανόηση, στο παρακάτω σχήμα 4.4, φαίνεται πως ορίζεται η κλίση i . Είναι η γωνία μεταξύ του τροχιακού επιπέδου και του επιπέδου ουρανού.

Τελικά, στο σύστημα xyz όπου ο x -άξονας δείχνει τον παρατηρητή, και το επίπεδο xy ταυτίζεται με τον ισημερινό του αστέρα, οι συνιστώσες της θέσης του πλανήτη δίνονται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

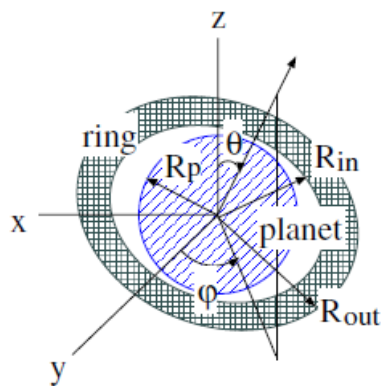


Εικόνα 4.4 – Σχήμα για τον ορισμό της κλίσης i .

4.2 Μοντέλο για την ανίχνευση δακτυλίων σε εξωπλανήτες

Παρακάτω περιγράφεται το μοντέλο των Ohta et al (2009) [16]. Το μοντέλο αυτό προσδιορίζει τη μορφή του αναμενόμενου σήματος κατά τη διάβαση πλανήτη μπροστά από τον μητρικό του αστέρα. Η λύση του σήματος αυτού εξάγεται αναλυτικά για face-on δακτύλιο ($\theta = 90^\circ$ και $\phi = 0^\circ$) και αριθμητικά στη γενική περίπτωση. Ο ορισμός των γωνιών θ και ϕ φαίνεται στο σχήμα 4.5. Με θ συμβολίζεται η γωνία μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο των δακτυλίων και του z-άξονα, ενώ με ϕ συμβολίζεται η γωνία μεταξύ του y-άξονα και της προβολής της καθέτου στο επίπεδο των δακτυλίων στο επίπεδο yz.

Η αναλυτική έκφραση του μοντέλου αυτού θα εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία στους πλανήτες που έχουν επιλεγθεί ως υποψήφιοι πλανήτες φέροντες δακτυλίους.



Εικόνα 4.5 – Σχηματική αναπαράσταση πλανήτη με δακτύλιο. Φαίνεται ο ορισμός των ακτινών R_{in} , R_{out} καθώς και των γωνιών θ και ϕ . Αν $\theta = 90^\circ$ και $\phi = 0^\circ$, τότε ο δακτύλιος παρατηρείται face-on. [Πηγή: Ohta et al, 2009]

Στα παρακάτω, οι συντεταγμένες x , z δίνουν τη θέση τυχαίου σημείου του αστρικού δίσκου ως προς το κέντρο του αστέρα και αντίστοιχα, οι X_p , Z_p δίνουν τη θέση του πλανήτη ως προς το κέντρο του αστέρα στο σύστημα xyz .

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η σχετική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\pi \left(1 - \frac{u_1}{3} - \frac{u_2}{6}\right) - A(\rho, \gamma_{ps}) - (1 - e^{-\tau}) [A(\rho, \gamma_{os}) - A(\rho, \gamma_{is})]}{\pi \left(1 - \frac{u_1}{3} - \frac{u_2}{6}\right)} \quad (4.8)$$

όπου u_1, u_2 οι παράμετροι αμαύρωσης χείλους, $\rho = \frac{\sqrt{Xp^2 + Zp^2}}{R_s}$ η κανονικοποιημένη θέση του πλανήτη, $\gamma_{ps} = \frac{R_p}{R_s}$, $\gamma_{is} = \frac{R_{in}}{R_s}$, $\gamma_{os} = \frac{R_{out}}{R_s}$ - με R_{in}, R_{out} να είναι η εσωτερη και η εξωτερη ακτίνα των δακτυλίων, αντίστοιχα - και τ το οπτικό βάθος. Αν $\tau=0$ και επιπλέον $R_{in} = R_{out} = R_p$, το μοντέλο «μετατρέπεται» από μοντέλο για πλανήτη με δακτύλιο, σε μοντέλο για σφαιρικό πλανήτη, δηλαδή χωρίς δακτύλιο.

Η συνάρτηση A που εμφανίζεται στη σχέση 4.8 ορίζεται ως εξής:

$$A(\rho, \gamma) = \begin{cases} \pi\gamma^2[1 - u_1 - u_2(2 - \rho^2 - \gamma^2/2) + (u_1 + 2u_2)W_1], & \rho < 1 - \gamma \\ (1 - u_1 - 3u_2/2)[\gamma^2 \cos^{-1}(\zeta/\gamma) + \sin^{-1}z_o - \rho z_o] + \\ + \frac{u_2}{2}\rho[(\rho + 2\zeta)\gamma^2 \cos^{-1}(\zeta/\gamma) - z_o(\rho\zeta + 2\gamma^2)] + \\ + (u_1 + 2u_2)W_3, & 1 - \gamma \leq \rho \leq 1 + \gamma \\ 0, & 1 + \gamma < \rho \end{cases} \quad (4.9)$$

Ο πρώτος κλάδος της A αντιστοιχεί στη συνεισφορά του σφαιρικού πλανήτη. Ο δεύτερος κλάδος αντιστοιχεί στη συνεισφορά του πιθανά υπάρχοντος δακτυλίου. Τέλος, ο κλάδος $A = 0$ αφορά τις χρονικές στιγμές πριν την έναρξη και μετά το πέρας της διάβασης του πλανήτη μπροστά από τον δίσκο του μητρικού του αστέρα.

Στη συνάρτηση A εμφανίζονται οι συναρτήσεις $z_o(\gamma)$ και $\zeta(\gamma)$, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$z_o(\gamma) = \frac{\sqrt{(\gamma^2 - \eta_p^2)[(\eta_p + 2)^2 - \gamma^2]}}{2(1 + \eta_p)} \quad (4.10)$$

$$\zeta(\gamma) = \frac{\eta_p^2 + 2\eta_p + \gamma^2}{2(1 + \eta_p)} \quad (4.11)$$

όπου $\eta_p = \rho - 1$.

Οι ποσότητες W_1, W_3 που εμφανίζονται στη συνάρτηση A , δίνονται από τα ολοκληρώματα:

$$W_1 = \frac{1}{\pi R_p^2} \iint_S \sqrt{1 - (x^2 + z^2)/R_s^2} dx dz \quad (4.12)$$

$$W_3 = \iint_{S'} \sqrt{1 - \tilde{x}^2 - \tilde{z}^2} d\tilde{x} \tilde{z} \quad (4.13)$$

και προσεγγίζονται από τις λύσεις:

$$W_1 \simeq \sqrt{1 - \rho^2} - \gamma^2 \frac{2 - \rho^2}{8(1 - \rho^2)^{3/2}} + O(\gamma^4) \quad (4.14)$$

$$W_3 \simeq \frac{\pi}{6}(1 - x_o)^2(2 + x_o) + \frac{\pi}{2}\gamma(\gamma - \zeta) \frac{g(x_c, \eta_p, \gamma)}{g(1 - 2s\gamma, -\gamma, \gamma)} W_1(1 - \gamma) \quad (4.15)$$

όπου

$$x_o = 1 - \frac{\gamma^2 - \eta_p^2}{2(1 + \eta_p)} \quad (4.16)$$

$$g(\tilde{x}, \eta_p, \gamma) \equiv (1 - \tilde{x}^2) \sin^{-1} \left[\frac{\gamma^2 - (\tilde{x} - 1 - \eta_p)^2}{1 - \tilde{x}^2} \right]^{1/2} + \sqrt{2(1 + \eta_p)(x_o - \tilde{x})[\gamma^2 - (\tilde{x} - 1 - \eta_p)^2]} \quad (4.17)$$

Επίσης,

$$\tilde{x} = \frac{1}{R_s \sqrt{X_p^2 + Z_p^2}} (X_p x + Z_p z) \quad (4.18)$$

Αν είναι γνωστές οι συντεταγμένες του πλανήτη X_p, Z_p , καθώς και οι συντεταγμένες x, z ενός τυχαίου σημείου του αστρικού δίσκου, τότε μπορούν να υπολογιστούν όλα τα παραπάνω, άρα και η σχετική ροή που δίνει η σχέση 4.8.

Οι παραδοχές που γίνονται παρακάτω για την εφαρμογή του μοντέλου που μόλις περιγράφηκε, είναι οι εξής: ο πλανήτης και ο αστέρας θεωρούνται σφαιρικοί. Οι δακτύλιοι είναι ομοίμορφοι με σταθερό οπτικό βάθος και η σκέδαση/απορρόφηση του φωτός συμβαίνει μόνο για αποστάσεις r από το κέντρο του πλανήτη που ικανοποιούν τη συνθήκη $R_{in} \leq r \leq R_{out}$, όπου R_{in} και R_{out} είναι η εσωτερη και η εξωτερη ακτίνα του δακτυλίου, αντίστοιχα. Επίσης, στα παρακάτω θεωρείται ότι η περίθλαση που συμβαίνει στα σωματίδια των δακτυλίων δεν τροποποιεί σημαντικά τις μετρούμενες παραμέτρους, οπότε και θα αγνοηθεί. Ακόμα, στην υλοποίηση της επεξεργασίας δεδομένων (βλ. κεφάλαιο 5) θα θεωρηθεί γνωστή η αστρονομική εφημερίδα, δηλαδή η τροχιακή περίοδος του πλανήτη και η χρονική στιγμή της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι ακόμη και για πλανήτες με μία μόνο παρατηρήσιμη διάβαση, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τροχιακή περίοδος με βάση τη διάρκεια διάβασης και τα φυσικά χαρακτηριστικά του μητρικού αστέρα (Wang et al (2015) [21]). Ακόμη, γνωστή θα θεωρηθεί και η μάζα του εκάστοτε μητρικού αστέρα αφού αυτή υπολογίζεται μέσω φασματοσκοπίας. Συνεπώς, γνωστός είναι και ο ημιάξονας της πλανητικής τροχιάς (3ος νόμος Kepler). Επιπλέον, όλες οι διαβάσεις θα θεωρηθούν κεντρικές (κλίση 90°). Θα πρέπει εδώ επίσης να σημειωθεί, ότι κατά την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων στην εργασία αυτή οι τροχιές των πλανητών θα θεωρηθούν κυκλικές ($e = 0$). Η μηδενική τιμή της εκκεντρότητας ευνοεί την ευστάθεια των δακτυλίων, αφού τότε οι παλιρροϊκές δυνάμεις που αυτοί δέχονται από τον κεντρικό πλανήτη είναι σταθερές.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω στηρίζονται στις πλανητικές διαβάσεις. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η σπουδαιότητα αυτών είναι ότι παρέχουν πλήθος πληροφοριών που εξάγονται απλά και μόνο από τον εντοπισμό μεταβολών στην ροή του αστρικού φωτός που λαμβάνει ένας παρατηρητής στη Γη. Παρατηρησιακά λοιπόν, μπορούν να μετρηθούν τα εξής μεγέθη:

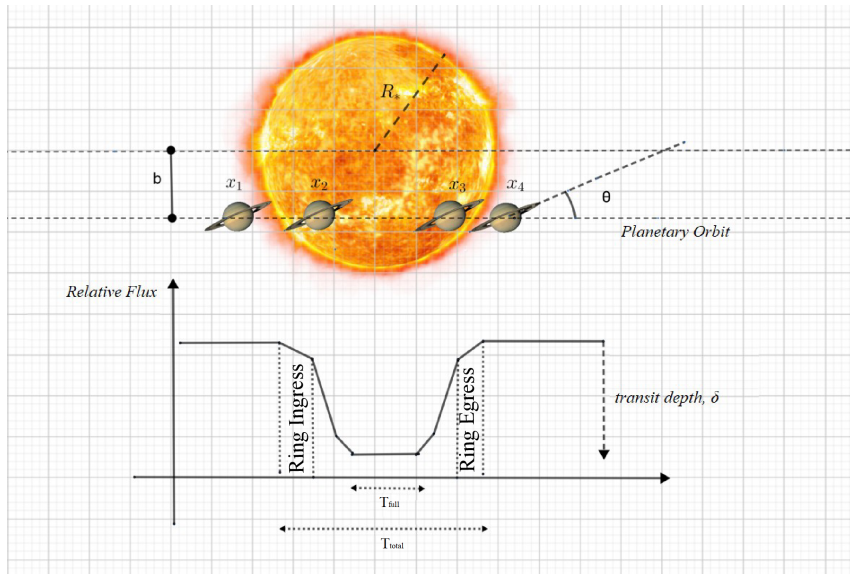
- Βάθος ελαχίστου, δ

$$\delta = \frac{F_o - F}{F_o} = \frac{A_{R_p}}{A_s} = \frac{A_{R_p}}{\pi R_s^2} \quad (4.19)$$

Στην παραπάνω εξίσωση F_o είναι η ροή πριν ή μετά τη διάβαση και F η ροή κατά τη διάρκεια της διάβασης, A_{R_p} η συνολική επιφάνεια του πλανήτη και των δακτυλίων και A_s η επιφάνεια του αστρικού δίσκου του μητρικού αστέρα.

- Ολική διάρκεια διάβασης, T_{total}

Το χρονικό αυτό διάστημα μετράται από τη στιγμή που οι δακτύλιοι θα αρχίσουν να εισέρχονται μπροστά από τον αστρικό δίσκο (μερική απόκρυψη), μέχρι να εξέλθει όλος ο πλανητικός δίσκος αλλά και οι δακτύλιοι μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Αν υπάρχει



Εικόνα 4.6 – Σχηματική αναπαράσταση διάβασης πλανήτη με δακτυλίους μπροστά από τον δίσκο του μητρικού του αστέρα. Έχουν σημειωθεί τα μεγέθη: βάθος διάβασης δ , παράμετρος κρούσης b καθώς και οι χρόνοι T_{total} και T_{full} . Σημειώνεται επίσης, η γωνία θ , μεταξύ του επιπέδου των δακτυλίων και της πλανητικής τροχιάς.

δακτύλιος, αναμένεται το χρονικό διάστημα T_{total} να είναι μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή που θα υπολογίζονταν απουσία δακτυλίου.

- Διάρκεια μέγιστης αποκοπής, T_{full}
 Το διάστημα αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη αποκοπή του αστρικού φωτός, δηλαδή όταν ολόκληρος ο δίσκος του πλανήτη καθώς και ολόκληρη η επιφάνεια των δακτυλίων βρίσκεται μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Αν υπάρχει δακτύλιος, αναμένεται το χρονικό διάστημα T_{full} να είναι μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή που θα υπολογίζονταν απουσία δακτυλίου.

4.3 Διερεύνηση

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι παράμετροι των θεωρητικών μοντέλων που θα προσαρμοστούν στα επόμενα κεφάλαια αυτής της διπλωματικής εργασίας σε παρατηρησιακά δεδομένα.

Πίνακας 4.1 – Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων του προβλήματος.

| Παράμετρος | Είδος | Τιμή | Σχόλιο |
|---|-------|------------|--------------------|
| Τροχιακή περίοδος P | fixed | ... | Θεωρείται γνωστή |
| Μάζα αστέρα M_s | fixed | ... | Θεωρείται γνωστή |
| Ακτίνα αστέρα R_s | free | ... | Προσδιορίζεται |
| Παράμετροι αμαύρωσης χείλους u_1, u_2 | fixed | ... | Θεωρούνται γνωστές |
| Ακτίνα πλανήτη R_p | free | ... | Προσδιορίζεται |
| Εσώτερη ακτίνα δακτυλίων R_{in} | free | ... | Προσδιορίζεται |
| Εξώτερη ακτίνα δακτυλίων R_{out} | free | ... | Προσδιορίζεται |
| Οπτικό βάθος δακτυλίων $\tau^{(1)}$ | fixed | 1 ή 0 | - |
| Κλίση τροχιακού επιπέδου i | fixed | 90° | - |
| Γωνία $\theta^{(2)}$ | fixed | 90° | - |
| Γωνία $\phi^{(3)}$ | fixed | 0° | - |

¹ Για το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη, $\tau = 0$, ενώ για το μοντέλο με δακτύλιο, $\tau = 1$.

² Γωνία «λόξωσης» (obliquity angle) των δακτυλίων. Πρόκειται για τη γωνία μεταξύ του άξονα z και της καθέτου στο επίπεδο των δακτυλίων.

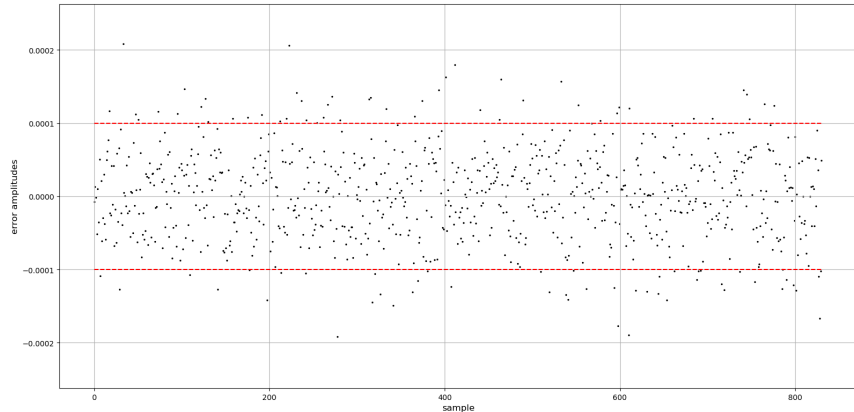
³ Αζιμουθιακή γωνία των δακτυλίων. Πρόκειται για τη γωνία μεταξύ του άξονα y και της προβολής της καθέτου στο επίπεδο των δακτυλίων στο επίπεδο $y - z$.

Από τις παραμέτρους αυτές, πραγματοποιείται στη συνέχεια διερεύνηση ως προς την εσώτερη και την εξώτερη ακτίνα (με άλλα λόγια ως προς το πάχος) των δακτυλίων που δυνητικά διαθέτει ένας πλανήτης. Διερεύνηση ως προς την κλίση των δακτυλίων δεν πραγματοποιείται, αφού εξ' ορισμού του μοντέλου οι γωνίες θ , ϕ που χαρακτηρίζουν τον δακτύλιο έχουν σταθερές τιμές ίσες με $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ (βλ. σχήμα 4.5). Για οποιοσδήποτε άλλες γωνίες, το πρόβλημα θα πρέπει να λυθεί αριθμητικά. Επίσης, στο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη δακτύλιο, ελέγχεται το πόσο καθοριστική είναι η τιμή του οπτικού βάθους των δακτυλίων. Το μέγεθος αυτό λαμβάνει τιμές μεταξύ $\tau = 0$ (πλήρως διαφανής δακτύλιος, non-ringed model) και $\tau = 1$ (πλήρως αδιαφανής δακτύλιος, ringed model). Μεταβολές στην τιμή του οπτικού βάθους στο ringed model, παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζουν τις τιμές των παραμέτρων όπως αυτές υπολογίζονται κατά τη διαδικασία του fitting, γι' αυτό και δεν πραγματοποιείται και διερεύνηση ως προς το μέγεθος αυτό. Τέλος, δεν διερευνώνται ούτε οι τιμές των παραμέτρων αμαύρωσης χείλους, αφού αυτές προσδιορίζονται από μοντέλα αστρικών ατμοσφαιρών και αποτελούν χαρακτηριστικών των αστέρων και όχι των πλανητών.

Στην ενότητα αυτή, παράγονται τεχνητά δεδομένα με σκοπό να γίνει προσαρμογή των θεωρητικών μοντέλων (για πλανήτη με δακτύλιο και για σφαιρικό πλανήτη) σε αυτά. Τα «δεδομένα» παράγονται με βάση την εξίσωση 4.8 και προσομοιώνουν στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα του διαστημικού τηλεσκοπίου Kepler. Η εξίσωση αυτή δίνει την θεωρητικά αναμενόμενη φωτεινή ροή του μητρικού αστέρα όταν μπροστά από τον αστρικό δίσκο διαβαίνει ένας πλανήτης που φιλοξενεί δακτύλιο. Επιπλέον, προκειμένου τα τεχνητά δεδομένα να είναι όσο το δυνατόν ρεαλιστικά, προστίθεται θόρυβος. Ο θόρυβος αυτός παρήχθη μέσω γεννήτορα τυχαίων αριθμών της γλώσσας Python. Οι αριθμοί που παράγονται ακολουθούν κανονική κατανομή με mean deviation= 0 και standard deviation $\sim 10^{-5}$. Οι τιμές της μέσης τιμής

και της τυπικής απόκλισης επιλέχθηκαν έτσι ώστε τα παραγόμενα τεχνητά «δεδομένα» να εντοπίζονται εντός της φωτομετρικής ευαισθησίας του διαστημικού τηλεσκοπίου Kepler. Το συγκεκριμένο τηλεσκόπιο διαθέτει ακρίβεια της τάξης 10^{-4} . Οι τιμές που παράγει ο γεννήτορας τυχαίων αριθμών αποτελούν ουσιαστικά το σφάλμα των «δεδομένων», είναι της τάξης $\pm 10^{-4}$ ή αλλιώς 0.01% της αστρικής ροής πριν/μετά την διάβαση του πλανήτη και παρουσιάζονται στο διάγραμμα

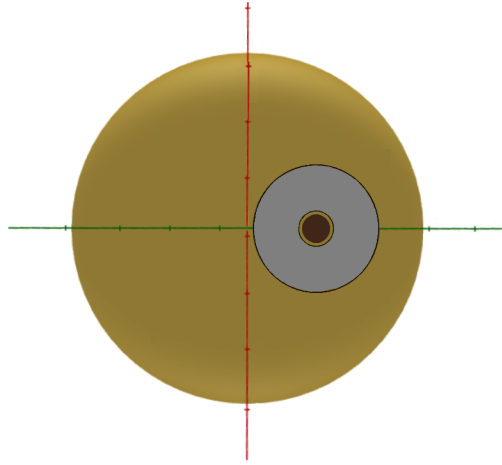
4.7. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάζονται δύο οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές που σηματοδοτούν τα όρια της ευαισθησίας του τηλεσκοπίου Kepler. Πράγματι, από το γράφημα αυτό, φαίνεται ότι με βάση τις τιμές μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης που επιλέχθηκαν,



Εικόνα 4.7 – Στον κατακόρυφο άξονα εικονίζεται το μέγεθος των σφαλμάτων που προστίθενται στα τεχνητά δεδομένα, ενώ στον οριζόντιο ο αύξων αριθμός των σημείων. Οι δύο κόκκινες οριζόντιες διακεκομμένες σηματοδοτούν τα όρια της φωτομετρικής ευαισθησίας του τηλεσκοπίου Kepler, η οποία ισούται με 10^{-4} . Αν επιλεγθεί μικρότερη τιμή της τυπικής απόκλισης για την παραγωγή των ψευδοτυχαίων αριθμών, τότε μόνο λίγα σημεία εντοπίζονται εντός των ορίων της ευαισθησίας του Kepler (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές στο διάγραμμα 4.7). Αν πάλι, επιλεγθεί μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης, τότε όλα τα σημεία που παράγει ο γεννήτορας είναι εντός των επιθυμητών ορίων, πράγμα που αποτελεί εξιδανίκευση.

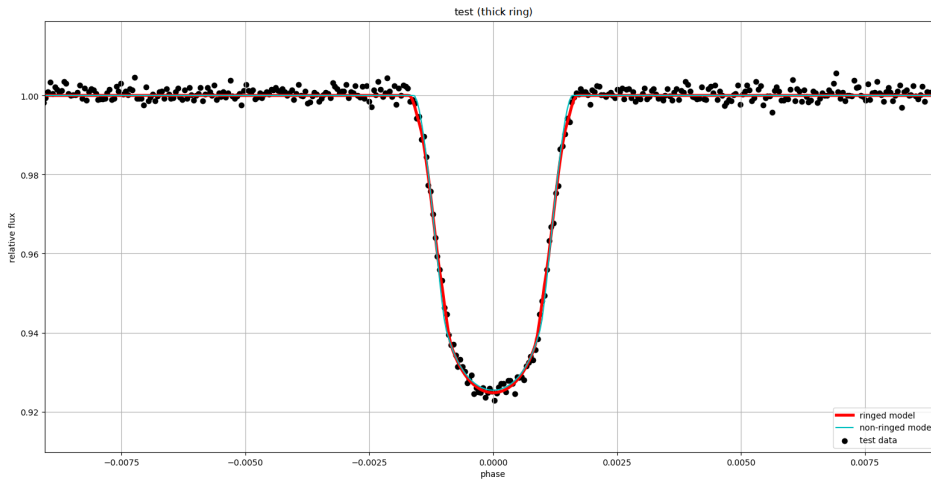
4.3.1 Δακτύλιος μεγάλου πάχους

Στην προκειμένη περίπτωση, ο εν λόγω υποθετικός πλανήτης για τον οποίο παρήχθησαν τα πλασματικά «παρατηρησιακά» δεδομένα θεωρείται ότι έχει ακτίνα $R_p = 3.36382 R_J$, όπου R_J η ακτίνα του πλανήτη Δία και ότι περιφέρεται με περίοδο 2100 days γύρω από αστέρα ακτίνας $R_s = 4.94119 R_\odot$ και μάζας $M_s = 0.7 M_\odot$, όπου R_\odot και M_\odot η ακτίνα και η μάζα του Ήλιου, αντίστοιχα. Ο δακτύλιος που φιλοξενεί θεωρείται οπτικά πυκνός, με οπτικό βάθος $\tau = 1$, και έχει εσωτερη και εξωτερη ακτίνα ίσες με $R_{in} = 4.25827 R_J$ και $R_{out} = 15.32120 R_J$, αντίστοιχα. Το πάχος δηλαδή του δακτυλίου, ισούται με $\Delta r = 3.28879 R_p$. Της ίδιας τάξης τιμή έχει ο λόγος $\Delta r/R_p$ για τον πλανήτη Κρόνο του ηλιακού συστήματος.

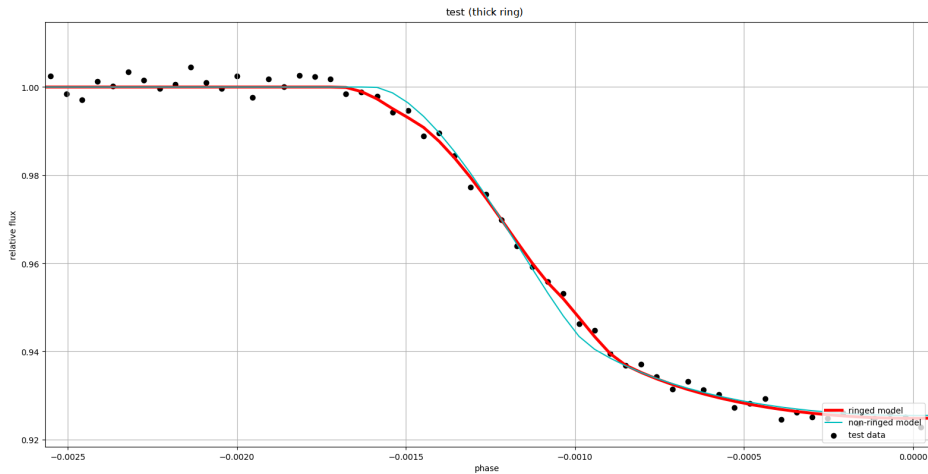


Εικόνα 4.8 – Σχηματική απεικόνιση του υποθετικού συστήματος αστέρα-πλανήτη με δακτύλιο μεγάλου πάχους κατά την κεντρική διάβασή του μπροστά από τον αστρικό δίσκο.

Η καμπύλη φωτός του υποθετικού αστέρα καθώς και η προσαρμογή των θεωρητικών μοντέλων στα τεχνητά δεδομένα φαίνεται στο διάγραμμα 4.9. Από αυτή, φαίνεται ότι κατά τη διάβαση του πλανήτη μπροστά από τον μητρικό του αστέρα η φωτεινή ροή ελαττώνεται κατά $\sim 7.78\%$.



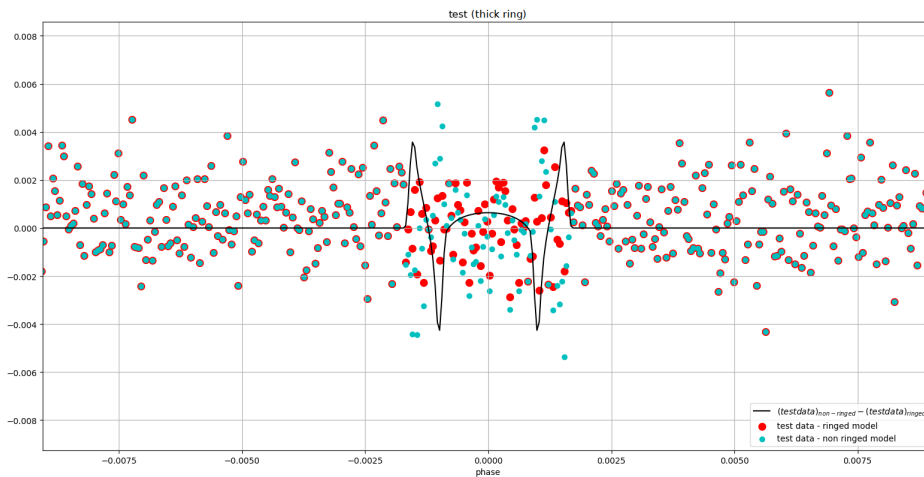
Εικόνα 4.9 – Η καμπύλη φωτός υποθετικού αστέρα κατά τη διάβαση υποθετικού πλανήτη με τροχιακή περίοδο 2100days, ο οποίος φέρει δακτύλιο μεγάλου πάχους. Παρουσιάζονται τα τεχνητά δεδομένα (μαύρα σημεία) καθώς και η προσαρμογή δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).



Εικόνα 4.10 – Μεγέθυνση της καμπύλης φωτός του προηγούμενου διαγράμματος ώστε να φανεί η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Από το διάγραμμα αυτό καθώς και από το διάγραμμα 4.10 είναι εμφανής η διαφοροποίηση των δύο θεωρητικών μοντέλων. Η διαφοροποίηση αυτή εντοπίζεται στις περιοχές των διαγραμμάτων που αντιστοιχούν σε τιμές φάσης $\phi \sim \pm 0.0010$ και $\phi \sim \pm 0.0015$. Τα τμήματα αυτά των θεωρητικών καμπυλών προέρχονται από τη συνεισφορά των δακτυλίων που φέρει ο υποθετικός πλανήτης.

Επιπρόσθετα, σχεδιάζεται το διάγραμμα 4.11, το οποίο στον οριζόντιο άξονα έχει τιμές της φάσης και στον κατακόρυφο τις τιμές της διαφοράς του καθενός μοντέλου από τα τεχνητά «παρατηρησιακά» δεδομένα. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στο μοντέλο με δακτύλιο, ενώ τα γαλάζια σημεία αντιστοιχούν στο μοντέλο για σφαιρικό πλανήτη-χωρίς δακτύλιο. Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι οι τιμές των residuals, τόσο καλύτερη είναι η εφαρμογή του μοντέλου.



Εικόνα 4.11 – Σύνοψη των διαγραμμάτων των residuals και της διαφοράς μεταξύ των δύο μοντέλων.

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα λοιπόν, γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα παράγραφο, το μοντέλο για πλανήτη με δακτύλιο εφαρμόζει καλύτερα -όπως ήταν αναμενόμενο- στα δεδομένα σε σχέση με το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη. Το γεγονός

Πίνακας 4.2 – *Best-fit parameters* για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο μεγάλου πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days.

| test (thick ring) | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| orbital period [days] | 2100 | | |
| model | ringed | non-ringed | input |
| $R_p[R_J]$ | 5.76973 ± 1.74681 | 12.04025 ± 0.03130 | 3.36 |
| $R_s[R_\odot]$ | 4.93968 ± 0.01398 | 4.940399 ± 0.01328 | 4.94 |
| $R_{in}[R_J]$ | 6.98889 ± 2.59785 | – | 4.26 |
| $R_{out}[R_J]$ | 15.09367 ± 0.25809 | – | 15.32 |
| χ^2 | 0.00191 | 0.00205 | – |

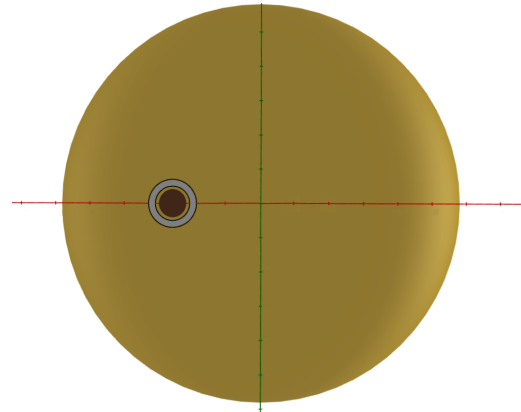
αυτό γίνεται αντιληπτό με βάση τις τιμές της ποσότητας χ^2 για τα δύο μοντέλα (βλ. πίνακα 4.2). Όποιο από τα δύο έχει μικρότερη τιμή χ^2 , εφαρμόζει καλύτερα στα «δεδομένα». Η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων, φαίνεται στο ίδιο διάγραμμα 4.11, συναρτήσει της φάσης. Οι ακμές που εμφανίζονται, είναι έντονες εξαιτίας του μεγάλου πάχους των δακτυλίων και εντοπίζονται ακριβώς στις περιοχές που αντιστοιχούν στη συνεισφορά αυτών.

Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα δύο μοντέλα όπως υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία του fitting, συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.2. Το πάχος των δακτυλίων προέκυψε ίσο με $\Delta r \sim 8.1 R_J$ έναντι της αναμενόμενης τιμής $11.96 R_J$. Επίσης, αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι η υπερεκτίμηση της ακτίνας του πλανήτη στην περίπτωση του μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη. Συγκεκριμένα, η πλανητική ακτίνα στην παρούσα περίπτωση υπερεκτιμάται κατά 108.68%. Αν λοιπόν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει δακτύλιος, αυτό συνεπάγεται την υπερεκτίμηση της πλανητικής ακτίνας και την συνακόλουθη υποτίμηση της πυκνότητάς του. Αυτό είναι και το κύριο γνώρισμα των αντικειμένων που αποτελούν στόχους αναζήτησης εξωδακτυλίων. Τέτοια αντικείμενα ονομάζονται super puffs και έχουν πυκνότητες της τάξης 0.1 gr/cm^3 .

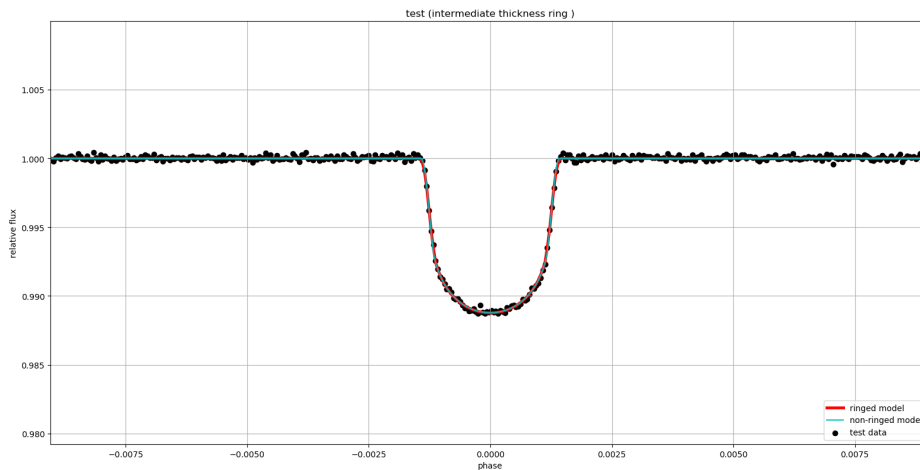
4.3.2 Δακτύλιος ενδιάμεσου πάχους

Στην ενότητα αυτή μελετάται η περίπτωση του ίδιου πλανήτη με προηγούμενως (ίδια ακτίνα, ίδια τροχιακή περίοδος, ίδιος μητρικός αστέρας), με τη μόνη διαφορά ότι τα τεχνητά δεδομένα τώρα παράγονται υποθέτοντας δακτύλιο οπτικού βάνθους $\tau = 1$ με εσωτερη ακτίνα ίση με $R_{in} = 4.25827 R_J$ και εξωτερη ακτίνα $R_{out} = 5.90594 R_J$, όπου R_J η ακτίνα του πλανήτη Δία. Δηλαδή, στην προκειμένη περίπτωση ο δακτύλιος είναι μικρότερου πάχους, και συγκεκριμένα $\Delta r = 0.48982 R_p$.

Η καμπύλη φωτός του υποθετικού μητρικού αστέρα ακτίνας $R_s = 4.94119 R_\odot$, όπου R_\odot η ακτίνα του Ήλιου, κατά τη διάβαση του υπό μελέτη υποθετικού πλανήτη, φαίνεται στο διάγραμμα 4.13. Είναι φανερό ότι το βάνθος της καμπύλης στην περίπτωση αυτή, έχει ελαττωθεί σε σχέση με το αντίστοιχο βάνθος της προηγούμενης ενότητας. Αυτό συμβαίνει διότι τώρα το αντικείμενο που διαβαίνει μπροστά από τον αστρικό δίσκο έχει μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με πριν -εφόσον ελαττώθηκε το πάχος των δακτυλίων- και ως αποτέλεσμα, αποκόπτεται μικρότερο τμήμα του αστρικού δίσκου. Το ποσοστό ελάττωσης της φωτεινής ροής τώρα ισούται με $\sim 1.18\%$. Επιπρόσθετα, μεγέθυνση του διαγράμματος αυτού παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.14. Παρατηρείται από το διάγραμμα αυτό ότι υπάρχει και πάλι διαφοροποίηση μεταξύ των δύο καμπυλών των θεωρητικών μοντέλων, όμως η διαφορά τώρα

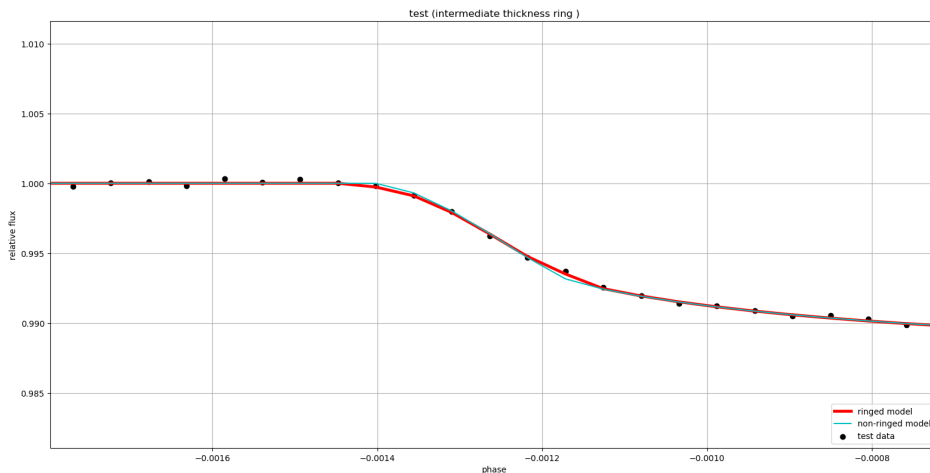


Εικόνα 4.12 – Σχηματική απεικόνιση του υποθετικού συστήματος αστέρα-πλανήτη με δακτύλιο ενδιάμεσου πάχους κατά την κεντρική διάβασή του μπροστά από τον αστρικό δίσκο.



Εικόνα 4.13 – Η καμπύλη φωτός υποθετικού αστέρα κατά τη διάβαση υποθετικού πλανήτη με τροχιακή περίοδο 2100days, ο οποίος φέρει δακτύλιο ενδιάμεσου πάχους. Παρουσιάζονται τα τεχνητά δεδομένα (μαύρα σημεία) καθώς και η προσαρμογή δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

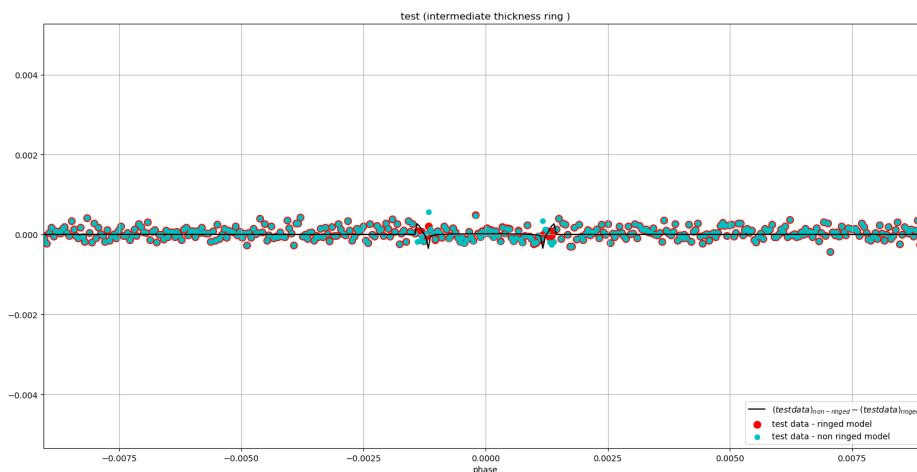
είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαφοροποίηση οφείλεται στην συνεισφορά των δακτυλίων που φέρει ο πλανήτης. Όσο πιο μικρό πάχος έχουν οι δακτύλιοι, η συνεισφορά τους γίνεται ολοένα και πιο ασθενής.



Εικόνα 4.14 – Μεγέθυνση της καμπύλης φωτός του προηγούμενου διαγράμματος ώστε να φανεί η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Ακόμη, από το διάγραμμα 4.15 των residuals με απλή οπτική εποπτεία φαίνεται πως το μοντέλο που φέρει δακτύλιο (κόκκινα σημεία) προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα σε σχέση με το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη (γαλάζια σημεία). Συγκεκριμένα τα κόκκινα σημεία εντοπίζονται κοντά στον άξονα που αντιστοιχεί σε residuals=0, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων τιμών της φωτεινής ροής και των «δεδομένων». Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της ποσότητας χ^2 , το οποίο λαμβάνει μικρότερη τιμή στην περίπτωση του ringed model.

Επιπρόσθετα, η διαφορά μεταξύ των τιμών των δύο μοντέλων, φαίνεται στο διάγραμμα ίδιο 4.15 (μαύρη καμπύλη). Παρατηρείται από αυτό ότι οι αιχμές είναι λιγότερο έντονες σε σχέση με τις αιχμές στο αντίστοιχο διάγραμμα για δακτύλιο μεγάλου πάχους.



Εικόνα 4.15 – Σύθεση των διαγραμμάτων των residuals και της διαφοράς μεταξύ των δύο μοντέλων.

Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων των δύο θεωρητικών μοντέλων όπως υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία της εφαρμογής τους στα «δεδομένα», παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Όπως ήταν αναμενόμενο -εφόσον υπάρχει δακτύλιος στα τεχνητά δεδομένα- η ακτίνα του πλανήτη

υπερεκτιμάται στην περίπτωση του μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη, γιατί ολόκληρο το βάθος της βύθισης αποδίδεται τότε μόνο στην παρουσία πλανήτη και δεν αποδίδεται εν μέρει σε πλανήτη και εν μέρει σε δακτύλιο. Συγκεκριμένα, η ακτίνα υπερεκτιμάται κατά 27.27% κατά την προσαρμογή του non-ringed model. Επίσης, το πάχος δηλαδή των δακτυλίων προέκυψε ίσο με $\Delta r \sim 1.61 R_J$ έναντι $1.65 R_J$ που ήταν η αναμενόμενη τιμή.

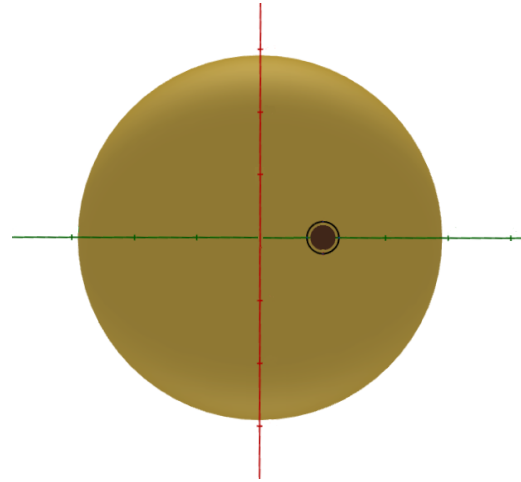
Πίνακας 4.3 – *Best-fit parameters* για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο ενδιάμεσου πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days.

| test (intermediate ring) | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| orbital period [days] | 2100 | | |
| model | ringed | non-ringed | input |
| $R_p[R_J]$ | 3.38825 ± 0.63307 | 4.65879 ± 0.00652 | 3.36 |
| $R_s[R_\odot]$ | 4.93419 ± 0.00639 | 4.93419 ± 0.00610 | 4.94 |
| $R_{in}[R_J]$ | 4.24561 ± 0.97918 | – | 4.25 |
| $R_{out}[R_J]$ | 5.85314 ± 0.20948 | – | 5.91 |
| χ^2 | 1.93079×10^{-5} | 1.98482×10^{-5} | – |

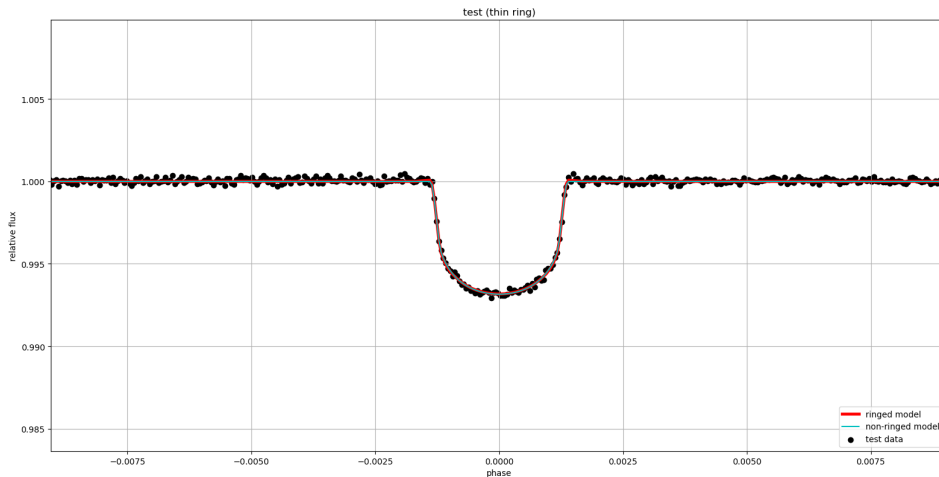
4.3.3 Δακτύλιος μικρού πάχους

Στην ενότητα αυτή μελετάται μια τρίτη εκδοχή του ίδιου πλανήτη που μελετήθηκε στις δύο προηγούμενες ενότητες (ίδια ακτίνα, ίδια τροχιακή περίοδος, ίδιος μητρικός αστέρας), όμως τώρα τα τεχνητά δεδομένα έχουν παραχθεί με παραδοχή ότι ο δακτύλιος που φέρει ο υποθετικός πλανήτης έχει οπτικό βάθος $\tau = 1$, εσωτερή ακτίνα $R_{in} = 4.25827 R_J$ και εξωτερή ακτίνα $R_{out} = 4.30106 R_J$, όπου R_J η ακτίνα του πλανήτη Δία. Το πάχος του δηλαδή, ισούται με $\Delta r = 0.01272 R_p$.

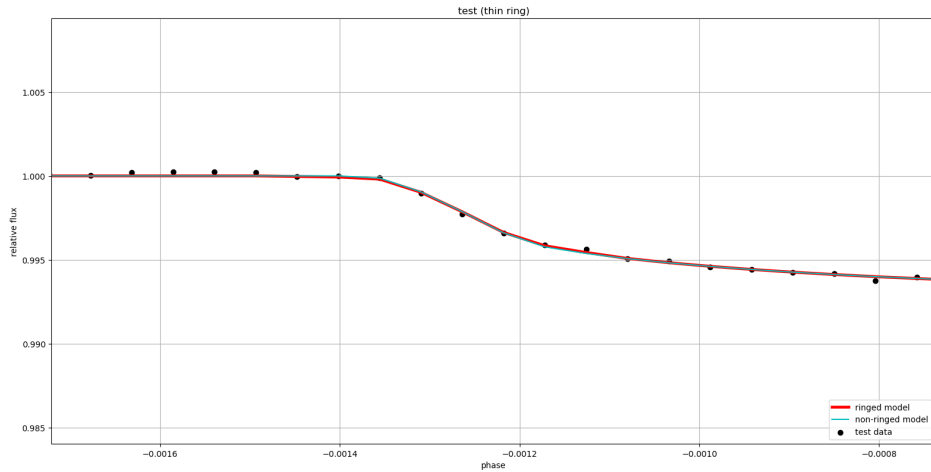
Η ελάττωση της φωτεινής ροής του μητρικού αστέρα κατά τη διάβαση του υποθετικού πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.17. Η βύθιση είναι ακόμα ασθενέστερη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, δεδομένου ότι οι διαστάσεις του αντικειμένου που αποκόπτει φως έχουν ελαττωθεί. Συγκεκριμένα, η σχετική ροή τώρα μειώνεται κατά $\sim 0.61\%$ κατά τη διάβαση του πλανήτη. Μεγέθυνση μιας περιοχής του διαγράμματος αυτού, αποτελεί το διάγραμμα 4.18. Βλέποντας το διάγραμμα αυτό, καταλαβαίνει κανείς ότι για τις συγκεκριμένες διαστάσεις δακτυλίου, με απλή οπτική εποπτεία φαίνεται οι δύο καμπύλες να ταυτίζονται.



Εικόνα 4.16 – Σχηματική απεικόνιση του υποθετικού συστήματος αστέρα-πλανήτη με δακτύλιο μικρού πάχους κατά την κεντρική διάβασή του μπροστά από τον αστρικό δίσκο.



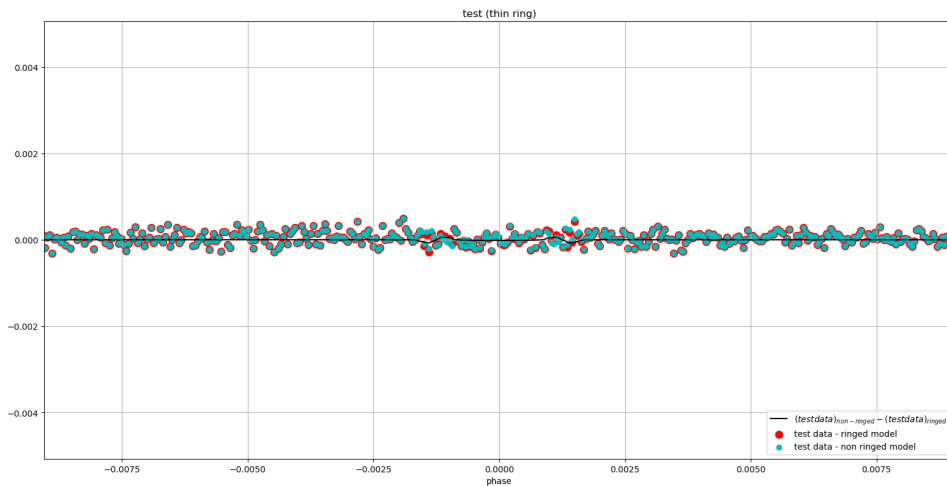
Εικόνα 4.17 – Η καμπύλη φωτός υποθετικού αστέρα κατά τη διάβαση υποθετικού πλανήτη με τροχιακή περίοδο 2100days, ο οποίος φέρει δακτύλιο μικρού πάχους. Παρουσιάζονται τα τεχνητά δεδομένα (μαύρα σημεία) καθώς και η προσαρμογή δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).



Εικόνα 4.18 – Μεγέθυνση της καμπύλης φωτός του προηγούμενου διαγράμματος ώστε να φανεί η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Για την εκτίμηση της ποιότητας της προσαρμογής καθενός μοντέλου στα τεχνητά δεδομένα, σχεδιάζεται το διάγραμμα των residuals 4.19. Από τις τιμές αυτών μάλιστα, υπολογίζεται η ποσότητα χ^2 , το οποίο στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνει τιμές που για τα δύο μοντέλα διαφέρουν στο όγδοο δεκαδικό ψηφίο. Συνεπώς, δεν μπορεί να εξαχθεί με βεβαιότητα συμπέρασμα με βεβαιότητα για το ποιο από τα δύο μοντέλα έχει τη βέλτιστη εφαρμογή στα «δεδομένα».

Ακόμη, από την καμπύλη της διαφοράς μεταξύ των δύο θεωρητικών μοντέλων που σχεδιάζεται στο ίδιο διάγραμμα 4.19 φαίνεται ότι για τόσο λεπτό δακτύλιο, όπως αυτόν που θεωρήθηκε για την παραγωγή των τεχνητών δεδομένων, η διαφωνία μεταξύ τους είναι εξαιρετικά μικρή.



Εικόνα 4.19 – Σύθεση των διαγραμμάτων των residuals και της διαφοράς μεταξύ των δύο μοντέλων.

Τέλος, κατά τη διαδικασία του fitting υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4. Το πάχος των δακτυλίων προέκυψε ίσο με $\Delta r \sim 0.045 R_J$ έναντι $0.043 R_J$ που ήταν η αναμενόμενη τιμή. Από τους

υπολογισμούς, φαίνεται πως και πάλι υπάρχει υπερεκτίμηση της ακτίνας του πλανήτη αν θεωρηθεί πως δεν υπάρχει δακτύλιος, όμως η υπερεκτίμηση ανέρχεται μόλις στο 1.51%, έναντι 108.68% για δακτύλιο μεγάλου πάχους και 27.27% για δακτύλιο ενδιάμεσου πάχους.

Πίνακας 4.4 – *Best-fit parameters* για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο μικρού πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days.

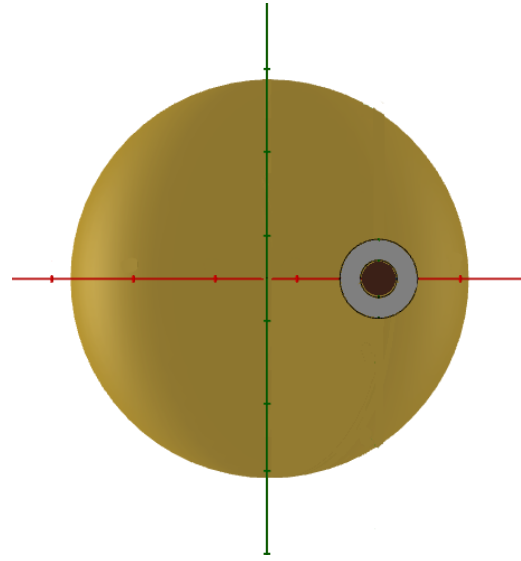
| orbital period [days] | test (thin ring) | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| | 2100 | | |
| model | ringed | non-ringed | input |
| $R_p[R_J]$ | 3.33154 ± 0.47037 | 3.38170 ± 0.00836 | 3.36 |
| $R_s[R_\odot]$ | 4.92813 ± 0.01097 | 4.92835 ± 0.00955 | 4.94 |
| $R_{in}[R_J]$ | 5.89823 ± 0.90329 | – | 4.26 |
| $R_{out}[R_J]$ | 5.94354 ± 0.81896 | – | 4.3 |
| χ^2 | 2.13064×10^{-5} | 2.13387×10^{-5} | – |

Συνολικά, στην περίπτωση λεπτών δακτυλίων δεν μπορεί να εξαχθεί με βεβαιότητα συμέρασμα για την ύπαρξη ή όχι δακτυλίων. Είναι απαραίτητες περισσότερες παρατηρήσεις και σε άλλα μήκη κύματος όπως για παράδειγμα στο υπέρυθρο, διότι τότε η καμπύλη φωτός θα παρουσιάζει ασθενέστερη βύθιση σε σχέση με άλλα μήκη κύματος. Αυτό συμβαίνει γιατί στο υπέρυθρο οι δακτύλιοι θα είναι διαπερατοί και δεν θα συνεισφέρουν στην ελάττωση του αστρικού φωτός κατά τη διάβασή τους μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Συγκρίνοντας, συνεπώς, την καμπύλη φωτός του παρατηρούμενου αστέρα στο υπέρυθρο και σε κάποιο άλλο τμήμα του φάσματος (π.χ. ορατό) θα εντοπιστεί διαφωνία στο βάθος της βύθισης και αυτό θα αποτελεί ένδειξη για επιπλέον μελέτη του συστήματος. Επίσης, χρήσιμες κρίνονται και οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, μιας και η διαπερατότητα των υλικών που πιθανά αποτελούν έναν δακτύλιο εξαρτάται από τη σύσταση αυτών και συνεπώς θα εξαρτάται από το μήκος κύματος παρατήρησης.

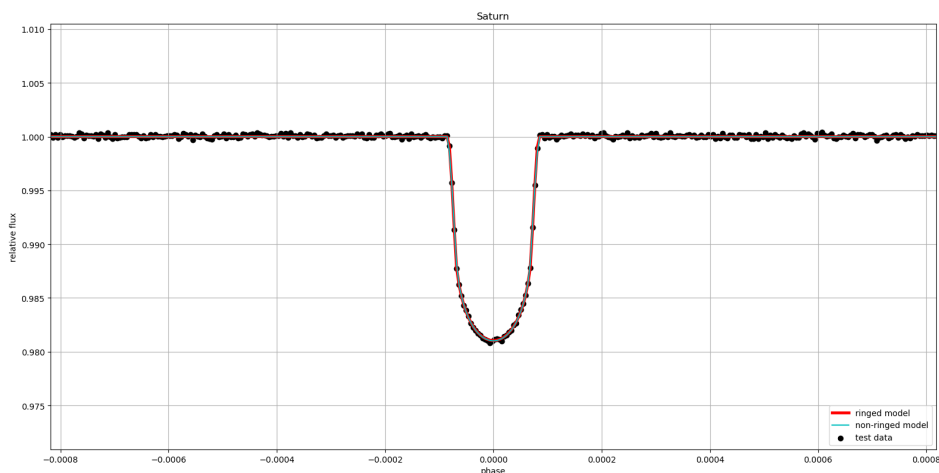
4.3.4 Κρόνος

Για τον έλεγχο της λειτουργίας των μοντέλων καθώς και της διαδικασίας προσαρμογής αυτών σε δεδομένα (fitting) μελετάται σαν παράδειγμα, η περίπτωση του πλανήτη Κρόνου. Προφανώς, λόγω της γεωμετρίας του Ηλιακού Συστήματος και των θέσεων των πλανητών, δεν είναι δυνατόν από τη Γη να παρατηρηθεί ποτέ διάβαση του Κρόνου μπροστά από τον ηλιακό δίσκο. Ωστόσο, στην ενότητα αυτή, με δεδομένες όλες τις παραμέτρους παράγονται τεχνητά δεδομένα με βάση την εξίσωση 4.8, χρησιμοποιούνται ως παρατηρησιακά δεδομένα και σε αυτά εφαρμόζονται δύο θεωρητικά μοντέλα: ένα για πλανήτη με δακτύλιο, και ένα για σφαιρικό πλανήτη - χωρίς δακτύλιο. Οι παράμετροι του συστήματος, στην προκειμένη περίπτωση είναι οι εξής: ηλιακή ακτίνα και μάζα ίσες με $R_{\odot} = 696340 \text{ km}$ και $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$, αντίστοιχα, τροχιακή περίοδος του Κρόνου, ίση με 10759.2 days , ακτίνα Κρόνου, ίση με $R_{\text{Saturn}} = 58232 \text{ km}$ και τέλος, εσώτερη και εξώτερη ακτίνα δακτυλίων, ίσες με $R_{\text{in}} \simeq 65232 \text{ km}$ και $R_{\text{out}} \simeq 138232 \text{ km}$, αντίστοιχα.

Η καμπύλη φωτός που παρήχθη, καθώς και οι καμπύλες των μοντέλων που εφαρμόστηκαν στα τεχνητά δεδομένα, φαίνονται στο διάγραμμα 4.21. Από το γράφημα αυτό, φαίνεται πως το ποσοστό ελάττωσης της φωτεινής ροής λόγω της διάβασης του Κρόνου είναι ίσο με $\sim 3.29\%$. Επίσης, για να είναι πιο ευκρινής η διαφοροποίηση μεταξύ των μοντέλων, παρουσιάζεται το ίδιο γράφημα, σε μεγέθυνση 4.22.

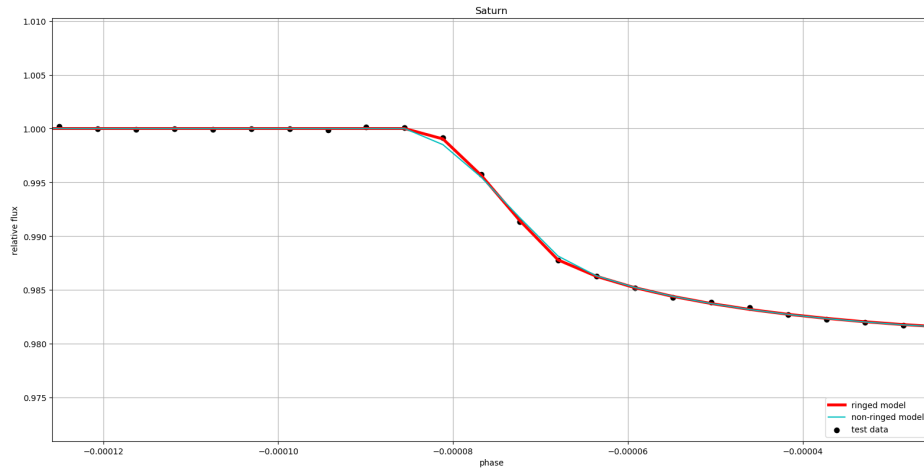


Εικόνα 4.20 – Σχηματική απεικόνιση της κεντρικής διάβασης του Κρόνου μπροστά από τον ηλιακό δίσκο - αν αυτή μπορούσε να παρατηρηθεί.



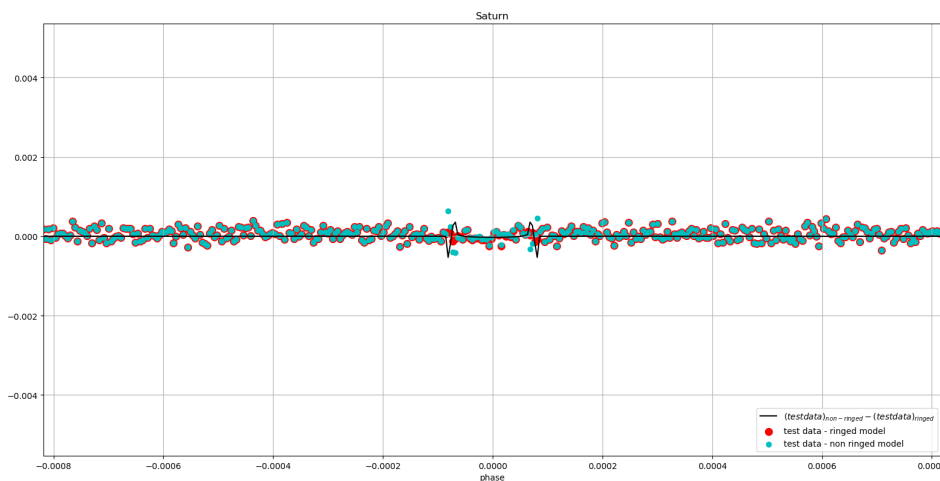
Εικόνα 4.21 – Η καμπύλη φωτός του Ήλιου -αν μπορούσε να παρατηρηθεί- κατά τη διάβαση του Κρόνου. Παρουσιάζονται τα τεχνητά δεδομένα (μαύρα σημεία) καθώς και η προσαρμογή δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Από το διάγραμμα αυτό, γίνεται φανερό ότι στις περιοχές γύρω από τη φάση $\phi \sim \pm 0.00008$, τα δύο μοντέλα δεν συμπίπτουν μεταξύ τους. Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν στην συνεισφορά του δακτυλίου στην αποκοπή τμήματος του ηλιακού δίσκου.



Εικόνα 4.22 – Μεγέθυνση της καμπύλης φωτός του προηγούμενου διαγράμματος ώστε να φανεί η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Ακόμη, στο διάγραμμα 4.23 παρουσιάζονται τα residuals, δηλαδή η διαφορά μεταξύ «δεδομένων» και καθενός μοντέλου. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στο μοντέλο με δακτύλιο, ενώ τα γαλάζια στο μοντέλο για σφαιρικό πλανήτη - χωρίς δακτύλιο. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των residuals μάλιστα, υπολογίζεται η ποσότητα χ^2 για τα δύο μοντέλα. Όπως ήταν αναμενόμενο, το χ^2 λαμβάνει μικρότερη τιμή στην περίπτωση του μοντέλου που λαμβάνει υπόψη δακτύλιο και συνεπώς, αυτό είναι που εφαρμόζεται καλύτερα στα «δεδομένα» σε σχέση με το μοντέλο χωρίς δακτύλιο. Επιπρόσθετα για τον εντοπισμό της διαφωνίας μεταξύ των δύο θεωρητικών καμπυλών, σχεδιάζεται στο ίδιο διάγραμμα η μεταξύ τους διαφορά (μαύρη καμπύλη στο διάγραμμα 4.23). Από αυτήν, φαίνονται οι αιχμές που σχηματίζονται κατά την είσοδο και κατά την έξοδο του δακτυλίου μπροστά από τον ηλιακό δίσκο.



Εικόνα 4.23 – Σύθεση των διαγραμμάτων των residuals και της διαφοράς μεταξύ των δύο μοντέλων.

Στον πίνακα 4.5 συγκεντρώνονται οι τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα θεωρητικά μοντέλα, όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία του fitting. Με βάση τους υπολογισμούς, το πάχος δακτυλίων προκύπτει να είναι $\Delta r = 1.17507 R_{Saturn}$. Οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν είναι πολύ κοντά στις τιμές των πραγματικών τιμών των R_p , R_s , R_{in} , R_{out} που είναι γνωστές για τον πλανήτη Κρόνο. Συνεπώς, με τη φωτομετρική ακρίβεια που θεωρήθηκε στην παραγωγή των τεχνητών δεδομένων (η οποία είναι εντός των ορίων της ευαισθησίας του Kepler) καθώς και με το συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιεί η παρούσα εργασία, είναι δυνατόν να ανιχνευθεί ένας δακτύλιος όπως αυτός του Κρόνου. Επίσης, το μοντέλο για σφαιρικό πλανήτη, θεωρεί ότι η βύθιση στην καμπύλη φωτός προέρχεται από πλανήτη μεγάλης ακτίνας και όχι εξαιτίας της παρουσίας δακτυλίων. Αυτό έχει σαν συνέπεια να υπερεκτιμά την ακτίνα του πλανήτη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η υπερεκτίμηση ανέρχεται στο 88.37%.

Πίνακας 4.5 – *Best-fit parameters για τον πλανήτη Κρόνο, αν μπορούσε να παρατηρηθεί η διάβασή του μπροστά από τον ηλιακό δίσκο.*

| Saturn | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------|
| orbital period [days] | 10759.2 | | |
| model | ringed | non-ringed | input |
| $R_p[km]$ | 59862.82 ± 12305.43 | 112762.19 ± 84.25 | 58232 |
| $R_s[km]$ | 695875.60 ± 472.99 | 695804.79 ± 504.51 | 696340 |
| $R_{in}[km]$ | 68165.18 ± 18937.98 | – | 65232 |
| $R_{out}[km]$ | 138499.01 ± 1240.74 | – | 138232 |
| χ^2 | 1.86093×10^{-5} | 2.48316×10^{-5} | – |

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση Παρατηρησιακών Δεδομένων

5.1 Κριτήρια επιλογής υποψήφιων πλανητών

Μερικές παρατηρησιακές επιπτώσεις της παρουσίας δακτυλίων γύρω από τους εξωπλανήτες καθώς και κάποια από τα κριτήρια επιλογής υποψηφίων πλανητών είναι τα εξής:

- Ασυμμετρία στην καμπύλη φωτός: σύμφωνα με τους Dyudina et al (2005) [9] αναμένεται η ύπαρξη δακτυλίων να παράγει ασυμμετρία στην παρατηρούμενη ροή του μητρικού αστέρα. Με άλλα λόγια, το γεγονός ότι δεν υπάρχει απόλυτη συμμετρία σε μια καμπύλη φωτός μπορεί να αποτελέσει ένδειξη για την ύπαρξη δακτυλίου γύρω από τον υπό μελέτη πλανήτη.
- Μη αναμενόμενα μικρή πυκνότητα του πλανήτη. Ανωμάλως μικρές πυκνότητες θεωρούνται όσες είναι από 0.3 gr/cm^3 και μικρότερες. Μικρή πυκνότητα σημαίνει ότι ενδεχομένως έχει υπερεκτιμηθεί το μέγεθός του πλανήτη κατά τον υπολογισμό του με κάποια από τις μεθόδους εντοπισμού εξωπλανητών. Αυτό ίσως συμβαίνει εξαιτίας της παρουσίας δακτυλίων γύρω του.
- Μεγάλη τροχιακή περίοδος/ μεγάλος ημιάξονας (της τάξης $\sim 1.4 \text{ AU}$ και άνω). Αυτό φαίνεται λογικό, αν αναλογιστεί κανείς τις αποστάσεις και τους ημιάξονες των γιγάντων πλανητών του ηλιακού συστήματος (Δίας στα 5.2 AU , Κρόνος στα 9.58 AU , Ουρανός στα 19.2 AU και Ποσειδώνας στα 30.1 AU). Οι δακτύλιοι συνήθως αναζητούνται γύρω από πλανήτες με μεγάλη περίοδο περιφοράς, διότι, αν ο πλανήτης βρίσκεται κοντά στον κεντρικό αστέρα (και άρα έχει μικρή περίοδο), αναμένεται εν γένει οι δακτύλιοι να είναι ασταθείς. Σε μεγάλες όμως αποστάσεις από το μητρικό τους αστέρα, οι πλανήτες δέχονται εξασθενημένη την επίδραση των παλιρροϊκών δυνάμεων, πράγμα που συνεπάγεται ότι οι πλανήτες αυτοί, μπορούν να έχουν επαρκώς μεγάλη ακτίνα Hill που να δύναται να φιλοξενεί δακτυλίους. Έτσι, οι δακτύλιοι αυτοί, θα διαθέτουν ποικίλους προσανατολισμούς και θα ευνοείται η ανίχνευσή τους. Επίσης, αν η απόσταση πλανήτη - αστέρα είναι μικρή, η αυξημένη θερμοκρασία, δεν θα επιτρέπει την ύπαρξη παγωμένων αντικειμένων στους δακτυλίους. Είναι γνωστό ότι οι περισσότεροι εξωπλανήτες των οποίων η ύπαρξη έχει επιβεβαιωθεί, βρίσκονται εντός της γραμμής πάγου. Παρ' όλο που οι παγωμένοι δακτύλιοι φαίνεται να μην μπορούν να υπάρξουν εντός του ορίου αυτού, η ύπαρξη «θερμών» βραχιδών δακτυλίων σε αποστάσεις της τάξης του $\simeq 0.1 \text{ AU}$, δεν αποκλείεται.

- Το μεγάλο βάθος του ελαχίστου της καμπύλης φωτός, το οποίο αν αποδοθεί ολοκληρωτικά σε πλανήτη μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένο συμπέρασμα ότι πρόκειται για πλανήτη μεγαλύτερων διαστάσεων. Ωστόσο, η βύθιση πιθανά να αποδίδεται όχι σε μεγάλη ακτίνα πλανήτη, αλλά εν μέρει στον ίδιο τον πλανήτη και εν μέρει σε σύστημα δακτυλίων που αυτός φιλοξενεί. Λέγοντας μεγάλη βύθιση, σημειώνεται εδώ ότι χαρακτηριστικά, κατά τη διάβαση του Κρόνου -αν αυτή μπορούσε να παρατηρηθεί- η φωτεινή ροή του θα ελαττωνόταν κατά $\sim 3.29\%$ (βλ. διάγραμμα 4.21).
- Μικρές τιμές εκκεντρότητας: Όσο μικρότερη η εκκεντρότητα (κοντά στο μηδέν) εννοείται η φιλοξενία δακτυλίων, αφού δεν υπάρχει μεταβλητότητα στο βαθμό επίδρασης του μητρικού αστέρα. (Αν η εκκεντρότητα είναι μεγάλη, άλλοτε ο αστέρας θα ασκεί εντονότερες δυνάμεις στον πλανήτη και άλλοτε ασθενέστερες).

Παρ' όλο που τα παραπάνω δεν επιβεβαιώνουν την ύπαρξη των εξωδακτυλίων, αποτελούν κριτήρια για υποψήφιους πλανήτες φέροντες δακτυλίους ώστε να μελετηθούν πιο διεξοδικά και να ερευνηθούν περαιτέρω.

Στην εργασία αυτή, θα μελετηθούν μακροπερίοδοι πλανήτες, οι οποίοι δυνητικά διατηρούν δακτυλίους σε τροχιά γύρω τους. Επειδή μάλιστα, η αποστολή Kepler που μελετά τις πλανητικές διαβάσεις έχει ευαισθησία στον εντοπισμό πλανητών με τροχιακές περιόδους πολύ μικρότερες από αυτές του Δία και του Κρόνου, για την αντιμετώπιση αυτής της έλλειψης μακροπεριόδων εξωπλανητών, αναζητούμε ανάμεσα στις μετρήσεις του Kepler καμπύλες φωτός στις οποίες έχει καταγραφεί μόνο μία ή δύο διαβάσεις. Συνεπώς, κάποιιοι από αυτούς τους πλανήτες που επιλέχθηκαν έχουν μία μόνο παρατηρήσιμη διάβαση (single transit events) και άλλοι δύο (double transit events).

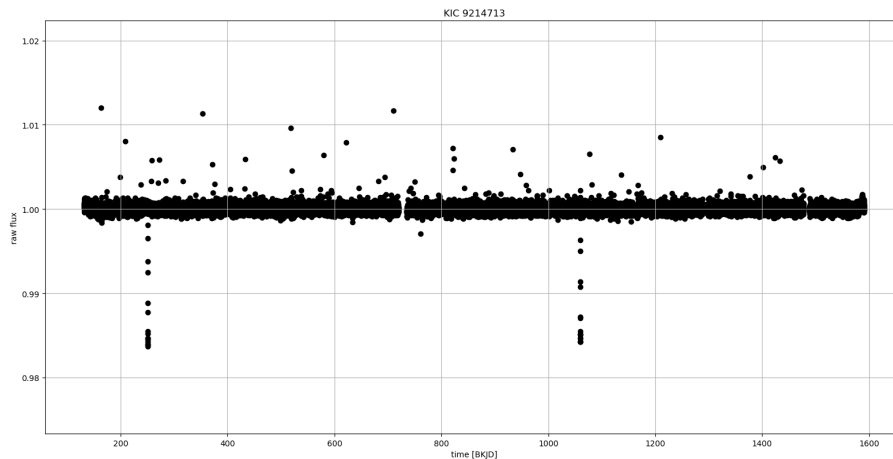
Υπολογιστικά

5.2 Αρχική επεξεργασία των δεδομένων

Στην ενότητα αυτή καθώς και στις επόμενες, παρουσιάζονται τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων για τον εντοπισμό ενδείξεων που υποστηρίζουν ότι οι υποψήφιοι πλανήτες πιθανά φιλοξενούν δακτυλίους. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler και είναι διαθέσιμα στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>. Για όσους πλανήτες δεν ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα στην διεύθυνση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που υπάρχουν στις ιστοσελίδες <https://exoplanets.nasa.gov> και www.exoplanet.eu, τα οποία και πάλι ελήφθησαν από το τηλεσκόπιο Kepler. Αφού έχει επιλεχθεί κάποιος πλανήτης με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν νωρίτερα, και έχουν συλλεχθεί τα δεδομένα, η αρχική τους μορφή (για τυχαίο αστέρα) είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 5.1.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η φωτεινή ροή του μητρικού αστέρα συναρτήσει του χρόνου. Με τον όρο φωτεινή ροή εννοείται η ενέργεια που εκπέμπει ο αστέρας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Ο αστέρας θεωρείται σαν πηγή που εκπέμπει σταθερά και για να γίνουν αντιληπτές οποιεσδήποτε μεταβολές στην εκπομπή του, συνήθως χρησιμοποιείται η σχετική ροή. Το μέγεθος αυτό δεν είναι άλλο παρά η ροή του αστέρα ανά πάσα χρονική στιγμή, κανονικοποιημένη όμως ως προς τη μέση τιμή της ροής. Οι άλλοτε ισχυρότερες και άλλοτε ασθενέστερες ελαττώσεις της σχετικής ροής οφείλονται συνήθως σε διαβάσεις πλανητών μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Το διάγραμμα που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται καμπύλη φωτός του αστέρα.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.1, αρχικά τα δεδομένα αντιστοιχούν σε ευρεία χρονική κλίμακα, στην οποία παρατηρούνται διάφορες διαβάσεις ή εκλείψεις. Θα πρέπει λοιπόν, να επι-



Εικόνα 5.1 – Διάγραμμα της φωτεινής ροής του αστέρα KIC 9214713 (τυχαία επιλογή) συναρτήσει του χρόνου. Οι διάφορες ελαττώσεις που εμφανίζονται στο διάγραμμα οφείλονται πιθανώς σε διαβάσεις πλανητών μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Έχει γίνει κανονικοποίηση στη μονάδα.

λεχθούν και να κρατηθούν μόνο οι μετρήσεις που αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές γύρω από την διάβαση που μελετάται κάθε φορά. Το τμήμα του κώδικα που γράφτηκε για την παρούσα εργασία και που εκπληρώνει το σκοπό αυτό, φαίνεται παρακάτω.

```

1 import pandas as pd
2
3 period=854.083                                #[days]
4 first_transit=335.236                          #transit epoch [BKJD]
5 second_transit=first_transit+period
6
7 data = pd.read_csv("KIC10525077_raw.csv", sep=';') #raw data from Kepler
8 data1=data.loc[(data['time']<first_transit+1) & (data['time']>first_transit
9 -1)]
10 data2=data.loc[(data['time']<second_transit+1) & (data['time']>
11 second_transit-1)]
12 frames=[data1, data2]
13 pd.concat(frames).to_csv(r'C:\Users\Pc-2\Desktop\code\
14 KIC10525077b_onlytransit.csv', index = None, header=True, sep=';')
15
16 dataOT = pd.read_csv("KIC10525077b_onlytransit.csv", sep=';')

```

Το τμήμα του κώδικα που φαίνεται παραπάνω δέχεται σαν είσοδο το αρχείο με τα ανεπεξέργαστα δεδομένα, από αυτά επιλέγει μόνο τα δεδομένα γύρω από την πρώτη και δεύτερη διάβαση και τα αποθηκεύει σε ένα νέο αρχείο.

Επόμενο στάδιο στην επεξεργασία δεδομένων είναι η διαδικασία του detrending. Η φωτομετρική ακρίβεια του τηλεσκοπίου Kepler είναι τέτοια που οι χαμπύλες φωτός παρουσιάζουν μετρήσιμη μεταβλητότητα εξαιτίας της δραστηριότητας του εκάστοτε αστέρα. Αυτή η μεταβλητότητα χαρακτηρίζεται ως trend και θα πρέπει να αφαιρεθεί κατά τη μελέτη πλανητικών διαβάσεων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η εντολή detrend της ενότητας signal της βιβλιοθήκης SciPy:

```

1 from scipy import signal
2 detrend=signal.detrend(dataOT['flux'])

```

Ακολουθώς, γίνεται μετατροπή του χρόνου σε φάση. Με γνωστή την τροχιακή περίοδο του πλανήτη που τίθεται υπό μελέτη και με γνωστό το χρόνο της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης αυτού μπροστά από τον αστρικό δίσκο, θα πρέπει να μετατραπεί ο οριζόντιος άξονας του παραπάνω διαγράμματος από χρόνο, σε φάση. Η μετατροπή γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Phi = \frac{t - t_o}{P} - \text{int} \left[\frac{t - t_o}{P} \right] \quad (5.1)$$

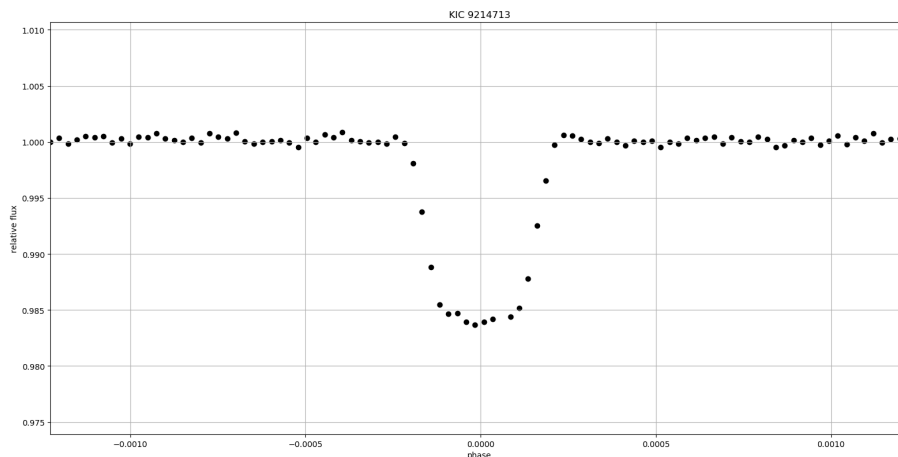
όπου t_o είναι η χρονική στιγμή της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης και P η τροχιακή περίοδος του πλανήτη. Ο συμβολισμός «int» σηματοδοτεί το δεκαδικό κομμάτι της ποσότητας εντός των παρενθέσεων. Με αυτόν τον τρόπο, όλα τα ακριβώς όμοια τμήματα του διαγράμματος της φωτεινής ροής του αστέρα, θα συμπέσουν με τα όμοιά τους. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως *phase folding*.

Το τμήμα του κώδικα που γράφτηκε για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής φαίνεται παρακάτω:

```

1 transit_epoch=first_transit # [BKJD]
2
3 dataOT['phase']=pd.Series([])
4 for i in range(len(dataOT['time'])):
5     dataOT['phase'][i]=(dataOT['time'][i]-transit_epoch)/period -(dataOT['
6     time'][i]-transit_epoch)//period
7     if dataOT['phase'][i]>0.5:
8         dataOT['phase'][i]=dataOT['phase'][i]-1
9     else:
10        dataOT['phase'][i]=dataOT['phase'][i]
```

Παρακάτω, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας του phase folding δίνεται ως παράδειγμα ένα ενδεικτικό διάγραμμα φάσης (διάγραμμα 5.2). Σε αυτό εικονίζεται η σχετική ροή του μητρικού αστέρα KIC 9214713 κατά τη διάβαση ενός πλανήτη που φιλοξενεί. Σημειώνεται ότι άξονας της φάσης έχει μετατοπιστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε η φάση μηδέν να αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της διάβασης του πλανήτη.



Εικόνα 5.2 – Διάγραμμα φάσης για τη φωτεινή ροή του αστέρα KIC 9214713 (τυχαία επιλογή) κατά τη διάβαση πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο.

5.2.1 Προσδιορισμός έκκεντρης ανωμαλίας

Αφού τα παρατηρησιακά δεδομένα έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, είναι έτοιμα ώστε να προσαρμοστεί σε αυτά το θεωρητικό μοντέλο διαβάσεων. Για να εφαρμοστεί το μοντέλο (όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4), πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός της θέσης του υπό μελέτη πλανήτη συναρτήσει του χρόνου. Πρώτο βήμα για τον υπολογισμό αυτό, αποτελεί ο προσδιορισμός της έκκεντρης ανωμαλίας για κάθε χρονική στιγμή t . Θα πρέπει με άλλα λόγια να λυθεί η εξίσωση Kepler:

$$M = E - e \sin E \quad (5.2)$$

όπου:

E η έκκεντρη ανωμαλία,

e η εκκεντρότητα της τροχιάς

και $M = n(t - t_p) = \frac{2\pi}{P}(t - t_p)$ η μέση ανωμαλία, με t_p να είναι ο χρόνος διάβασης από το περίαστρο της τροχιάς και P η τροχιακή περίοδος.

Για να είναι γνωστή καταρχάς, η μέση ανωμαλία, θα πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός του χρόνου διάβασης, t_p , του πλανήτη από το περίαστρο της τροχιάς του. Ο υπολογισμός του χρόνου t_p προϋποθέτει να είναι γνωστή η εποχή της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης (t_{ft} ή t_o : first transit epoch) και πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης:

$$t_p = t_{ft} - \frac{P}{2\pi} [E(t_{ft}) - e \sin E(t_{ft})] \quad (5.3)$$

όπου η ποσότητα $E(t_{ft})$ αποτελεί την έκκεντρη ανωμαλία τη χρονική στιγμή της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης. Αυτή, έχει τιμή που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E(t_{ft}) = 2 \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \tan \left(\frac{f(t_{ft})}{2} \right) \right] \quad (5.4)$$

Η αληθής ανωμαλία τη στιγμή της πρώτης παρατηρήσιμης διάβασης, $f(t_{ft})$ έχει τιμή:

$$f(t_{ft}) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \omega, & \omega \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{5\pi}{2} - \omega, & \omega > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

Στη σχέση αυτή η γωνία ω ονομάζεται όρισμα του περιάστρου και συνήθως στις πλανητικές διαβάσεις θεωρείται ίση με 0° . Αυτή η τιμή υιοθετείται και στην παρούσα εργασία. Με γνωστά όλα τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί η έκκεντρη ανωμαλία για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, μέσω της εξίσωσης 5.2.

Για την επίλυση της εξίσωσης 5.2, θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω η **μέθοδος Newton-Raphson**. Πρόκειται για τη γνωστότερη επαναληπτική μέθοδο και βασίζεται στην εξής γεωμετρική ιδέα:

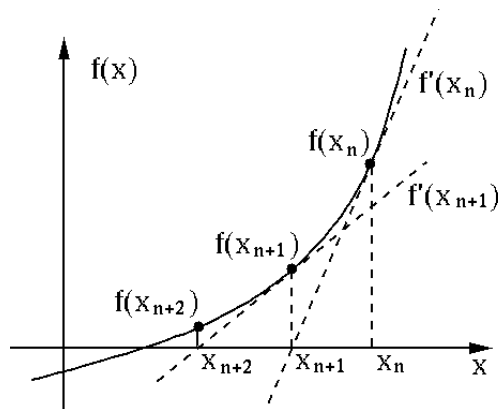
Έστω η εξίσωση $f(x) = 0$ με λύση x_* και έστω x_n μια προσέγγιση της λύσης αυτής. Η εφαπτομένη της f στο σημείο $(x_n, f(x_n))$ έχει εξίσωση:

$$y = f(x_n) + (x - x_n)f'(x_n) \quad (5.5)$$

και τέμνει τον x-άξονα (σχήμα 5.3) στο σημείο:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5.6)$$

Αυτή είναι μια νέα προσέγγιση της λύσης x_* , καλύτερη της προσέγγισης x_n . Προϋπόθεση



Εικόνα 5.3 – Γεωμετρική ερμηνεία της μεθόδου Newton-Raphson.

βέβαια, για να ορίζεται το x_{n+1} είναι να ικανοποιείται η συνθήκη $f'(x_n) \neq 0$. Η βελτίωση της προσέγγισης μπορεί να γίνει αντιληπτή αν θεωρήσει κανείς το εξής ανάπτυγμα:

$$f(x_*) = f(x_n) + (x_* - x_n)f'(x_n) + \frac{1}{2}(x_* - x_n)^2 f''(\xi) \quad (5.7)$$

όπου ξ σημείο μεταξύ των x_n, x_* . Αφού $f(x_*) = 0$, από την εξίσωση αυτή, προκύπτει:

$$x_* = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} - \frac{1}{2}(x_* - x_n)^2 \frac{f''(\xi)}{f'(x_n)} \quad (5.8)$$

Εφόσον, x_n βρίσκεται στη γειτονιά του x_* , από την εξίσωση 5.8 φαίνεται ότι η λύση 5.6 είναι καλύτερη προσέγγιση της x_* συγκριτικά με την προσέγγιση x_n .

Σύμφωνα με τη λογική που αναπτύχθηκε στην παράγραφο αυτή, υπάρχει αντίστοιχη αναδρομική σχέση για την λύση της εξίσωσης Kepler. Στην προκειμένη περίπτωση, η αναδρομική σχέση είναι της μορφής:

$$E_n = E_{n-1} - \frac{E_{n-1} - e \sin E_{n-1} - M}{1 - e \cos E_{n-1}} \quad (5.9)$$

και με βάση αυτή, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές της έκκεντρης ανωμαλίας κατά τη διάρκεια της περιφοράς του εκάστοτε πλανήτη γύρω από τον μητρικό αστέρα.

5.2.2 Υπολογισμός συντεταγμένων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το επόμενο και τελευταίο στάδιο του προσδιορισμού της θέσης του πλανήτη. Με γνωστή την έκκεντρότητα ($e = 0$) καθώς και με γνωστές τις τιμές της έκκεντρης ανωμαλίας, μπορούν να υπολογιστούν οι συνιστώσες του διανύσματος θέσης του πλανήτη ως προς το κέντρο του αστέρα (εστία της τροχιάς) και σε σύστημα όπου οι δύο από τους άξονες ορίζουν το τροχιακό επίπεδο (επίπεδο $\xi\eta$). Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$[\xi, \eta, \zeta] = [\alpha(\cos E - e), \alpha\sqrt{1 - e^2} \sin E, 0] \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια, αυτές οι συνιστώσες θα πρέπει να μετατραπούν από το σύστημα $\xi\eta\zeta$ στο σύστημα xyz όπως αυτό ορίστηκε στο κεφάλαιο 4. Αυτό γίνεται μέσω των πινάκων στροφής:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Omega & -\sin\Omega & 0 \\ \sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\omega & -\sin\omega & 0 \\ \sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

όπου Ω το μήκος του αναβιβάζοντος συνδέσμου, ω το όρισμα του περιάστρου και i η κλίση του τροχιακού επιπέδου ως προς την ευθεία παρατήρησης. Η παραπάνω σχέση-εκπεφρασμένη συναρτήσει των πινάκων στροφής- τελικά δίνει για τα X_p, Y_p, Z_p του πλανήτη τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} X_p(t) &= \frac{\alpha(1-e^2)}{1+e\cos f(t)} \sin(f(t)+\omega)\sin i \\ Y_p(t) &= \frac{\alpha(1-e^2)}{1+e\cos f(t)} [-\cos(f(t)+\omega)\cos\Omega + \sin(f(t)+\omega)\sin\Omega\cos i] \\ Z_p(t) &= \frac{\alpha(1-e^2)}{1+e\cos f(t)} [-\cos(f(t)+\omega)\sin\Omega - \sin(f(t)+\omega)\cos\Omega\cos i] \end{aligned} \quad (5.12)$$

Η κλίση i του τροχιακού επιπέδου, εφόσον -όπως έχει αναφερθεί ήδη στο κεφάλαιο 4- οι διαβάσεις θεωρούνται κεντρικές, είναι γνωστή και ίση με $\simeq 90^\circ$ για την τροχιά του κάθε πλανήτη. Αυτή η παραδοχή γίνεται διότι όταν η γωνία αυτή έχει τιμή κοντά στις $\simeq 90^\circ$, τότε ευνοείται η παρατήρηση μιας πλανητικής διάβασης. Επιπρόσθετα, η γωνία Ω (μήκος αναβιβάζοντος συνδέσμου) υπολογίζεται αν λυθεί το εξής σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} L_x &= L\sin\Omega\sin i \\ L_y &= -L\cos\Omega\sin i \\ L_z &= L\cos i \\ L_x^2 + L_y^2 + L_z^2 &= L^2 \end{aligned} \quad (5.13)$$

όπου L η στροφορμή του πλανήτη, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$L = \sqrt{GM_s\alpha}\sqrt{1-e^2} \quad (5.14)$$

όπου $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας.

Επίσης, η αληθής ανωμαλία για κάθε χρονική στιγμή t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f(t) = 2\tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \left(\frac{E(t)}{2} \right) \right] \quad (5.15)$$

Με την διαδικασία αυτή λοιπόν υπολογίζεται η θέση του πλανήτη ως προς το κέντρο του μητρικού του αστέρα για κάθε χρονική στιγμή t . Για την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας, γράφτηκε κώδικας σε γλώσσα Python:

```

1 from scipy.optimize import fsolve
2
3 def planetary_position(t):
4     if arg_of_periastron < np.pi/2:
5         f_frst_trnst = np.pi/2 - arg_of_periastron #true anomaly for the
6         time of first transit
7     else:
8         f_frst_trnst = 5*np.pi/2 - arg_of_periastron

```

```

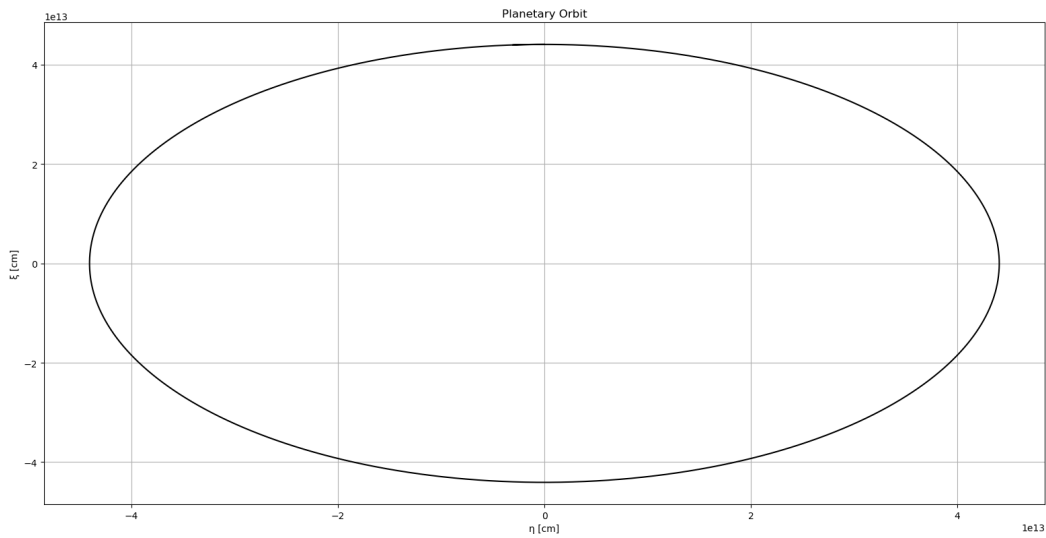
9      #eccentric anomaly for the time of first transit
10     E_frst_trnst=2*np.arctan(np.sqrt((1-e)/(1+e))*np.tan(f_frst_trnst/2))
11
12     if E_frst_trnst<0:
13         E_frst_trnst+=2*np.pi
14
15     #time of periastron passage
16     tp= first_transit-period / (2*np.pi)*(E_frst_trnst-e*np.sin(E_frst_trnst
17     ))
18
19     M = 2 * np.pi / period * (t - tp)    #mean anomaly
20     Eold = M
21     flag = False
22     Enew = 0
23     for indicator in range(100):         # set arbitrary limit of iterations
24         Enew = Eold - (Eold - e*np.sin(Eold) - M) / (1-e*np.cos(Eold))
25         flag = (np.abs(Enew - Eold) < 10 ** (-7)).all()
26         if flag:
27             break
28         else:
29             Eold = Enew
30
31     f=2*np.arctan(np.sqrt((1+e)/(1-e))*np.tan(Enew/2))    #true anomaly as
a function of t
32
33     r=a*(1-e**2)/(np.ones_like(f)+e*np.cos(f))
34
35     #calculating angular momentum components and longitude of ascending
node
36     L=np.sqrt(G*Ms*a)*np.sqrt(1-e**2)
37     Lz=L*np.cos(orb_inclination)
38
39     #calculating Lx, Ly, Omega by solving the 3x3 system
40     def SolveSystem(q):
41         Lx = q[0]
42         Ly = q[1]
43         Omega = q[2]
44         F = np.empty((3))
45         F[0] = Lx-L*np.sin(Omega)*np.sin(orb_inclination)
46         F[1] = Ly-L*np.cos(Omega)*np.sin(orb_inclination)
47         F[2] = Lx**2+Ly**2+Lz**2-L**2
48         return F
49     qGuess = np.array([1,1,1])
50     q = fsolve(SolveSystem,qGuess)
51     Omega=q[2]
52
53     #coordinates observed from Earth
54     Xp=r*(-np.cos(f+arg_of_periastron)*np.sin(Omega)-np.sin(f+
arg_of_periastron)*np.cos(Omega)*np.cos(orb_inclination))
55     Yp=r*(sin(f(t)+arg_of_periastron )*np.sin(orb_inclination)
56     Zp=r*(-np.cos(f+arg_of_periastron)*np.cos(Omega)+np.sin(f+
arg_of_periastron)*np.sin(Omega)*np.cos(orb_inclination))
57     return Xp, Yp, Zp

```

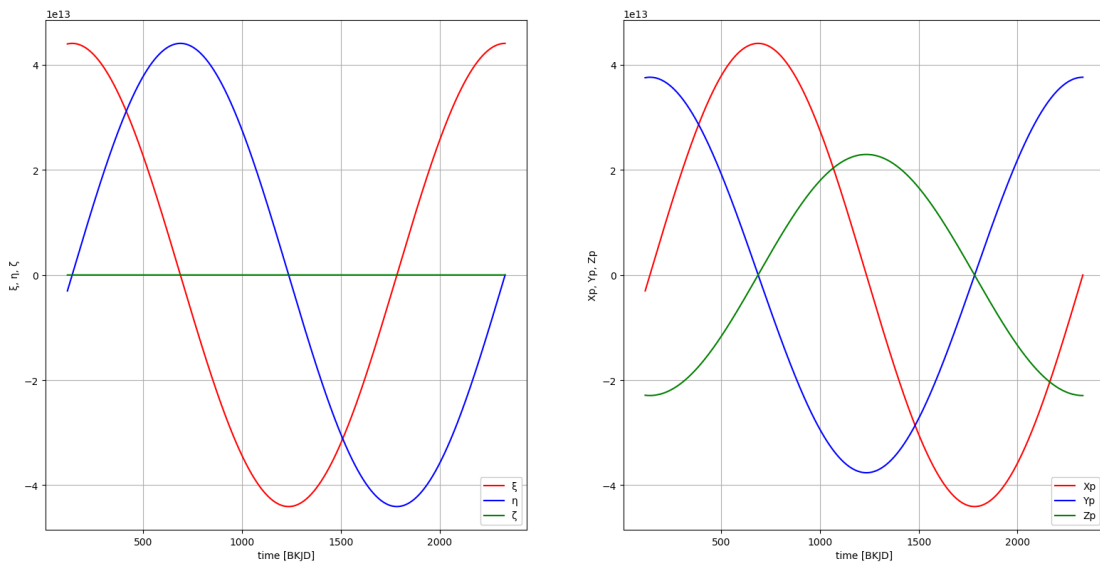
Παρατίθενται εδώ μερικά ενδεικτικά διαγράμματα (5.4 και 5.5) με τα αποτελέσματα του υπολογισμού των συντεταγμένων για τυχαίο πλανήτη με περίοδο $P = 2190.7 \text{ days}$ και μεγάλο ημιάξονα $a = 2.9 \text{ AU}$.

Από την εικόνα 5.4 είναι φανερό ότι το τροχιακό επίπεδο στο σύστημα συντεταγμένων $\xi\eta\zeta$ ταυτίζεται με το επίπεδο $\xi\eta$. Αντίστοιχα, από την εικόνα 5.5 φαίνεται η ημιτονοειδής μορφή

των συνιστωσών του διανύσματος θέσης. Αυτή, έχει περιοδικότητα όση η τροχιακή περίοδος και η μορφή αυτή είναι αναμενόμενη αν αναλογιστεί κανείς την παρουσία του συνημιτόνου και του ημιτόνου στη σχέση 5.10.



Εικόνα 5.4 – Η τροχιά του πλανήτη στο σύστημα συντεταγμένων $\xi\eta$. Στο σύστημα αυτό, εξ ορισμού το επίπεδο $\xi\eta$ ταυτίζεται με το τροχιακό επίπεδο.



Εικόνα 5.5 – Οι συντεταγμένες του πλανήτη συναρτήσει του χρόνου στο σύστημα συντεταγμένων $\xi\eta\zeta$ και στο σύστημα xyz .

5.3 Εφαρμογή (fitting) μοντέλου

Στην ενότητα αυτή, θα περιγραφεί η διαδικασία εφαρμογής θεωρητικού μοντέλου σε παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η μέθοδος εξαγωγής κάποιων από τις παραμέτρους του συστήματος με βάση το fitting. Το μοντέλο (Ohta et al (2009) [16]) για face-on ring ($\theta = 90^\circ$ και $\phi = 0^\circ$) που θα εφαρμοστεί στα δεδομένα έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Για την εφαρμογή του στα δεδομένα, στην εργασία αυτή θα διακριθούν δύο περιπτώσεις:

-Στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο θα αφορά σφαιρικό πλανήτη -χωρίς δακτυλίους- και συνεπώς, θα αντιστοιχεί σε οπτικό βάθος $\tau = 0$ και ακτίνες δακτυλίου $R_{in} = R_{out} = R_p$. Οι παράμετροι που αναμένεται να υπολογιστούν κατά το fitting είναι οι: R_p και R_s .

-Στην δεύτερη περίπτωση το μοντέλο θα αφορά πλανήτη που φέρει σύστημα δακτυλίων και μάλιστα αυτοί θεωρούνται εντελώς αδιάφανοι. Τότε, $\tau = 1$, ενώ οι ακτίνες R_{in}, R_{out} αποτελούν παραμέτρους που θα εξαχθούν από τη διαδικασία του fitting, μαζί με τις R_p και R_s .

Το τμήμα του κώδικα που ορίζει τα δύο μοντέλα παρατίθεται παρακάτω, ενώ όλες οι εμπλεκόμενες συναρτήσεις υπάρχουν στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.

```
1 #Ringed Model
2 def Rmodel(t, Rp, Rs, Rin, Rout):
3     tau=1
4     gps=Rp/Rs
5     gis=Rin/Rs
6     gos=Rout/Rs
7     Agps=A(t, gps, Rp, Rs, Rin, Rout)
8     Agos=A(t, gos, Rp, Rs, Rin, Rout)
9     Agis=A(t, gis, Rp, Rs, Rin, Rout)
10    return (np.pi*(1-u1/3-u2/6)-Agps-(1-np.exp(-tau))*(Agos-Agis))/(np.pi
11           *(1-u1/3-u2/6))
12
13 #Non-Ringed Model
14 def NRmodel(t, Rp, Rs):
15     Rin=Rp
16     Rout=Rp
17     tau=0
18     gps=Rp/Rs
19     gis=Rin/Rs
20     gos=Rout/Rs
21     Agps=A(t, gps, Rp, Rs, Rin, Rout)
22     Agos=A(t, gos, Rp, Rs, Rin, Rout)
23     Agis=A(t, gis, Rp, Rs, Rin, Rout)
24    return (np.pi*(1-u1/3-u2/6)-Agps-(1-np.exp(-tau))*(Agos-Agis))/(np.pi
25           *(1-u1/3-u2/6))
```

Ο στόχος είναι να εφαρμοστούν και τα δύο μοντέλα στις μετρήσεις του τηλεσκοπίου Kepler για διάφορους πλανήτες και να εντοπιστεί ποιο από τα δύο μοντέλα εφαρμόζει καλύτερα στα δεδομένα του κάθε υποψήφιου πλανήτη. Αν για παράδειγμα, η βέλτιστη καμπύλη που εφαρμόζει στα δεδομένα είναι αυτή που αντιστοιχεί σε σφαιρικό πλανήτη, τότε μάλλον θα πρέπει να αποκλειστεί το ενδεχόμενο φιλοξενίας δακτυλίων. Αν πάλι υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ των δεδομένων αυτών και του μοντέλου, και επιπλέον, το μοντέλο που αντιστοιχεί σε πλανήτη που φέρει δακτυλίους εφαρμόζει καλύτερα στα δεδομένα, αυτό θα δώσει μια ένδειξη για την ύπαρξη δακτυλίου καθώς επίσης και ένα έναυσμα για περαιτέρω μελέτη του συγκεκριμένου πλανήτη.

Με δεδομένες τις εκφράσεις των δύο μοντέλων, και με χρήση της εντολής `curve fit` της ενότητας `optimize` της βιβλιοθήκης SciPy της Python, γίνεται στη συνέχεια fitting των μοντέλων αυτών στα παρατηρησιακά δεδομένα και υπολογίζονται οι σχετικές παράμετροι καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα. Το τμήμα του κώδικα που εκτελεί τον υπολογισμό αυτό, φαίνεται παρακάτω:


```

1 from scipy.optimize import curve_fit
2 #Ringed model Fitting
3 p0=[0.00033900257 , 0.00325669, 0.000431093318, 0.000478857]
4 popt, pcov = curve_fit(Rmodel, t, y, p0, bounds=((0, 0, 0, 0)
5 , (0.0009,0.009,0.0009,0.001)), maxfev=1000)
6 errors=np.sqrt(np.diag(pcov))
7 chi_sqr_R=sum((y-Rmodel(t,*popt))**2)
8 #-----#
9 #Non-ringed model Fitting
10 p00=[0.00032900257 , 0.00325669]
11 poptt, pcovv = curve_fit(NRmodel, t, y, p00, bounds=((0, 0),(0.1,0.1)),
12 maxfev=1000)
13 err=np.sqrt(np.diag(pcovv))
14 chi_sqr_NR=sum((y-NRmodel(t,*poptt))**2)

```

Επιπρόσθετα, για να υπάρχει μια εκτίμηση της συμφωνίας των μοντέλων με τα παρατηρησιακά δεδομένα, υπολογίστηκαν για καθένα από αυτά τα residuals μέσω της σχέσης:

$$Res[F] \equiv F^{obs} - F^{best-fit} \quad (5.16)$$

όπου F^{obs} είναι η παρατηρησιακά μετρούμενη ροή για κάθε χρονική στιγμή και $F^{best-fit}$ είναι η τιμή του καλύτερα εφαρμοζόμενου μοντέλου πάνω σε αυτή, για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Ακόμη για να εκτιμηθεί ποιο από τα δύο μοντέλα εφαρμόζει καλύτερα στα δεδομένα, υπολογίστηκε στην εργασία αυτή η ποσότητα χ^2 , μέσω της σχέσης:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (Res[i])^2 \quad (5.17)$$

όπου N το πλήθος των δεδομένων.

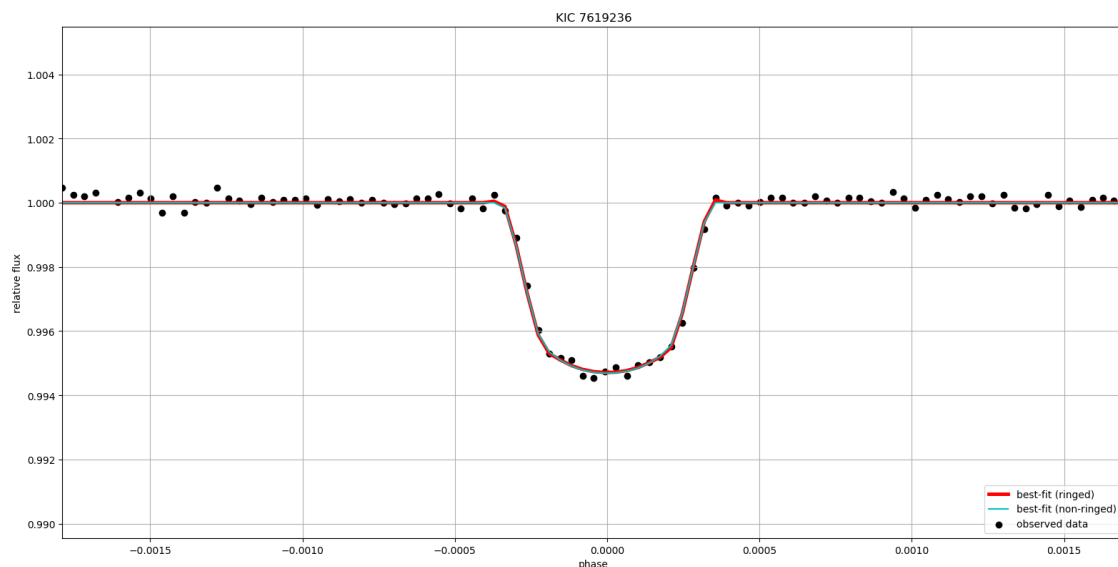
Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

Παρακάτω τίθενται υπό μελέτη οι καμπύλες φωτός των αστέρων: *KIC 7619236*, *KIC 850 5215*, *KIC 3962440*, *KIC 9214713*, *KIC 3230491*, *KIC 10460629*, *KIC 3239945*, *KIC 113 42550*, *KIC 12356617* κατά τη διάβαση πλανητών μπροστά από τους αστρικούς δίσκους. Αυτοί οι πλανήτες χαρακτηρίζονται ως μακράς περιόδου και είχαν μια ή δύο παρατηρήσιμες διαβάσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας του τηλεσκοπίου Kepler. Μάλιστα, έχουν προταθεί σαν υποψήφιοι πλανήτες που δυνητικά διαθέτουν σύστημα δακτυλίων από τους Wang et al (2015) [21]. Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται τα σχετικά αποτελέσματα.

6.1 KIC 7619236

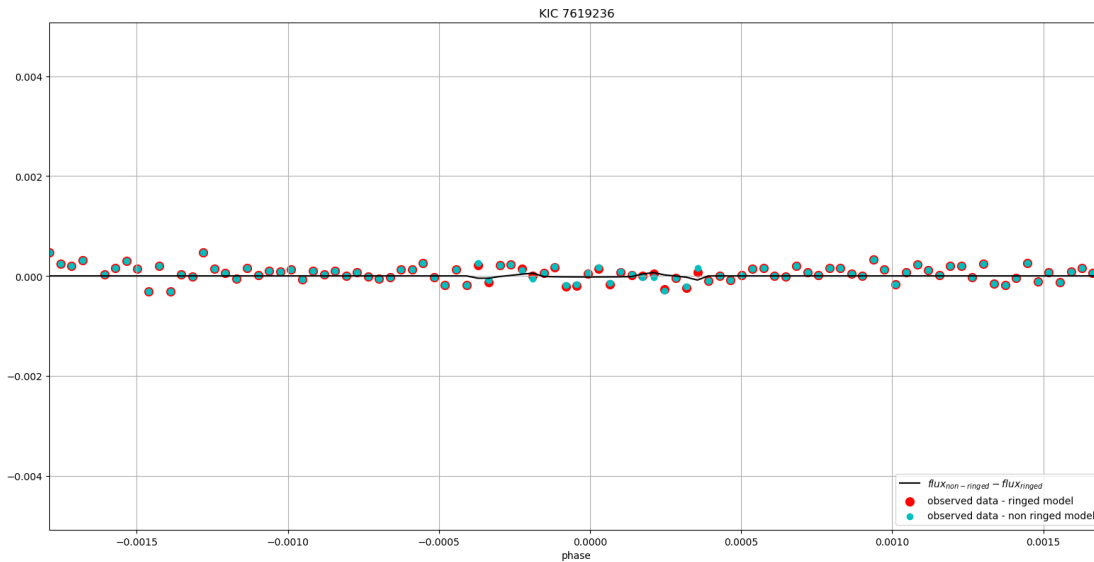
Στην ενότητα αυτή αναλύεται η μελέτη ενός πλανήτη με τροχιακή περίοδο 562.17 days ο οποίος περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 7619236. Ο συγκεκριμένος αστέρας είναι παρόμοιος με τον Ήλιο, έχοντας μάζα $M_s = 1.02 \pm 0.09 M_\odot$, όπου M_\odot η μάζα του Ήλιου και θερμοκρασία $T = 5589 \pm 102$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Ο πλανήτης αυτός επιλέχθηκε ως υποψήφιος εξωπλανήτης με δακτύλιο, σύμφωνα με τα



Εικόνα 6.1 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα *KIC 7619236* κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

κριτήρια που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η καμπύλη φωτός του μητρικού αστέρα κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν στα παρατηρησιακά δεδομένα από το τηλεσκόπιο Kepler, ενώ οι δύο καμπύλες αντιστοιχούν στα θεωρητικά μοντέλα (best-fit curves) που εφαρμόστηκαν σε αυτά. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί σε μοντέλο για πλανήτη που φέρει δακτύλιο, ενώ η γαλάζια σε μοντέλο που αφορά σφαιρικό πλανήτη (χωρίς δακτύλιο).

Για την εκτίμηση του βαθμού συμφωνίας των δύο μοντέλων με τα παρατηρησιακά δεδομένα (βέλτιστη προσαρμογή - best fit), σχεδιάζεται το διάγραμμα των residuals συναρτήσει της φάσης (γαλάζια και κόκκινα σημεία στο διάγραμμα 6.2). Τα residuals δεν είναι τίποτα άλλο, παρά η διαφορά μεταξύ των παρατηρήσεων και του καθενός μοντέλου. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται πως η εφαρμογή του μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη -χωρίς δακτύλιο- δεν φανερώνει καμιά εποπτική ένδειξη ανωμαλιών που να οφείλονται σε είσοδο/έξοδο δακτυλίου μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί και από τους Ohta et al (2009) [16] το σήμα που προκαλούν οι δακτύλιοι μπορεί να αποκρύπτεται αν αυτοί εντοπίζονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του πλανήτη. Με την εφαρμογή λοιπόν, μοντέλου που περιλαμβάνει δακτύλιο, η εικόνα διαφοροποιείται και μπορούν να εντοπιστούν ενδείξεις ύπαρξης δακτυλίων. Χρησιμοποιώντας τώρα τα residuals και εφαρμόζοντας τη σχέση 5.17, υπολογίζεται η ποσότητα χ^2 , η οποία αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης των δύο μοντέλων. Το μοντέλο που χαρακτηρίζεται από μικρότερο χ^2 , εφαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου πλανήτη, για το μοντέλο με δακτύλιο (ringed model) το χ^2 λαμβάνει την τιμή 2.55199×10^{-6} , ενώ για το μοντέλο χωρίς δακτύλιο (non-ringed model), αυτό ισούται με 2.57495×10^{-6} . Συνεπώς, το ringed model εφαρμόζεται καλύτερα στα παρατηρησιακά δεδομένα, συγκρινόμενο με το non-ringed model. Εφόσον τώρα, έχει προσδιοριστεί ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ



Εικόνα 6.2 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 7619236 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

του κάθε μοντέλου και των παρατηρήσεων, λαμβάνεται η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων και σχεδιάζεται η σχετική καμπύλη στο ίδιο διάγραμμα 6.2, το οποίο φαίνεται παραπάνω. Από αυτή την καμπύλη γίνεται φανερό ότι στις περιοχές δεξιά και αριστερά από την διάβαση, καθώς και στη γειτονιά του ελαχίστου της καμπύλης φωτός, τα δύο μοντέλα συμφωνούν (η

διαφορά τους είναι μηδενική). Όμως, στην περιοχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε φάση $\phi \sim \pm 0.00025$, παρατηρείται ελάχιστη μεν - μη μηδενική δε - διαφορά μεταξύ των τιμών της σχετικής ροής που δίνουν τα δύο μοντέλα. Οι περιοχές αυτές του διαγράμματος χρονικά αντιστοιχούν λίγο μετά την έναρξη και λίγο πριν τη λήξη της διάβασης. Από τις τιμές της διαφοράς αυτής, μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με το αν ο πλανήτης χρήζει περαιτέρω παρατήρησης ώστε να διερευνηθεί αν τελικά φέρει δακτύλιο. Στην προκειμένη περίπτωση, οι τιμές αυτές είναι σχεδόν μηδενικές, πράγμα που σημαίνει ότι αν υπήρχε δακτύλιος, θα ήταν πολύ μικρής ακτίνας και συνεπώς, η συνεισφορά του θα ήταν μηδαμινή. Πράγματι, σύμφωνα με την εφαρμογή του μοντέλου, εάν υπήρχε δακτύλιος, αυτός θα εκτεινόταν σε αποστάσεις μεταξύ $R_{in} = 1.52092 R_p$ και $R_{out} = 1.56454 R_p$. Η διαφορά αυτών των ακτίνων δίνει την ακτίνα του δακτυλίου, η οποία ισούται με $\Delta r = 0.04361 R_p$.

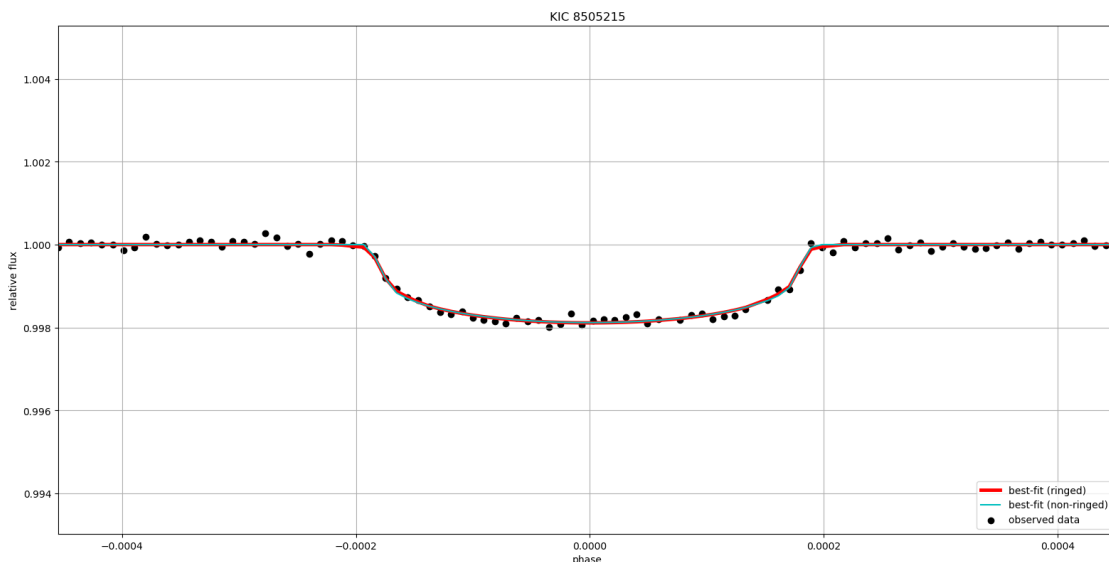
Τέλος, τα αποτελέσματα του προσδιορισμού των παραμέτρων με βάση τη διαδικασία της προσαρμογής των δύο μοντέλων στα δεδομένα, συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 – *Best-fit parameters για τον KIC 7619236.*

| KIC 7619236 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 562.17253 \pm 0.00379 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.71306 \pm 0.03701 | 0.68369 \pm 0.00312 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.91377 \pm 0.00211 | 0.91323 \pm 0.00210 |
| $R_{in} [R_J]$ | 1.08451 \pm 0.36485 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.11561 \pm 0.33627 | – |
| χ^2 | 2.55199 $\times 10^{-6}$ | 2.57495 $\times 10^{-6}$ |

6.2 KIC 8505215

Στη συνέχεια, θα αναλυθεί η περίπτωση πλανήτη που περιφέρεται με τροχιακή περίοδο 2190.70 days γύρω από τον αστέρα KIC 8505215. Ο αστέρας αυτός έχει μάζα $M_s = 0.71 \pm 0.05 M_\odot$ και θερμοκρασία $T = 4965 \pm 95$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>], πράγμα που σημαίνει ότι είναι παρόμοιος με τον Ήλιο. Η καμπύλη φωτός κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη φαίνεται στο διάγραμμα 6.3. Παρατηρείται ότι η καμπύλη είναι αρκετά συμμετρική. Σε περίπτωση όμως που υπάρχει δακτύλιος, αναμένεται να

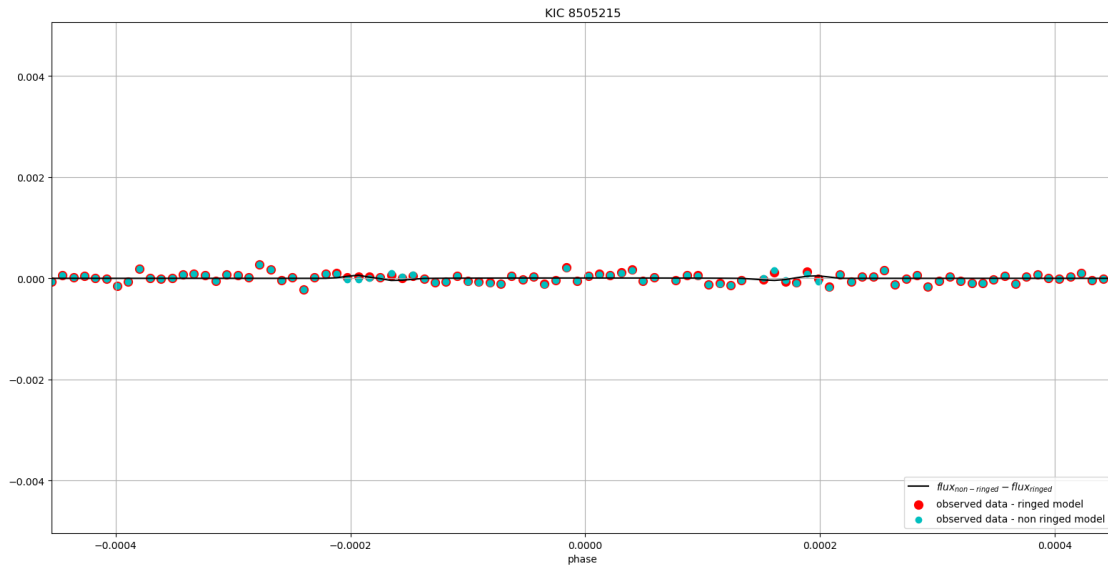


Εικόνα 6.3 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 8505215 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

σημειωθεί ασυμμετρία λίγο μετά την έναρξη ή λίγο πριν την λήξη της διάβασης (Dyudina et al, 2005 [9]). Επιπλέον, το σήμα της διάβασης είναι αρκετά «ρηχό». Γενικά, αναμένεται αν ο πλανήτης είναι μεγάλης ακτίνας ή/και αν διαθέτει σύστημα δακτυλίων, το ποσοστό του φωτός που αποκόπτεται να είναι μεγάλο και συνεπώς η βύθιση της καμπύλης φωτός να είναι ισχυρή. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, στην προκειμένη περίπτωση το σήμα αυτό πιθανότατα δεν μπορεί να οφείλεται σε δακτύλιο, καθώς όταν υπάρχει δακτύλιος αναμένεται η ελάττωση της φωτεινής ροής να είναι έντονη. Βέβαια, για να είναι σίγουρο το συμπέρασμα αυτό απαιτούνται περαιτέρω παρατηρήσεις. Υπενθυμίζεται εδώ ότι έχουν γίνει παραδοχές στην εφαρμογή των μοντέλων, οι οποίες και επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσε η ρηχή βύθιση της καμπύλης φωτός να οφείλεται σε μη κεντρική διάβαση, στην εργασία αυτή όμως, έχει υποτεθεί ότι οι διαβάσεις είναι όλες κεντρικές.

Ακόμη, στο διάγραμμα 6.4, φαίνονται τα residuals συναρτήσει της φάσης (κόκκινα και γαλάζια σημεία για το μοντέλο με δακτύλιο και για το μοντέλο χωρίς δακτύλιο, αντίστοιχα). Με βάση τις τιμές αυτών, υπολογίζεται και πάλι το χ^2 για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά. Σύμφωνα με τον υπολογισμό λοιπόν της ποσότητας αυτής, και όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.2, το ringed-model έχει τη βέλτιστη εφαρμογή στα παρατηρησιακά δεδομένα, καθώς έχει μικρότερο χ^2 σε σχέση με την τιμή του χ^2 για το non-ringed model. Παρ' όλα αυτά, το αποτέλεσμα αυτό είναι αμφισβητήσιμο, καθώς στην προκειμένη περίπτωση τα δεδομένα προέρχονται από μία μόνο παρατηρήσιμη διάβαση. Για την εξαγωγή ενός πιο αξιόπιστου συμπεράσματος, απαιτούνται περισσότερες παρατηρήσεις. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, σχεδιάζονται

στο ίδιο διάγραμμα οι τιμές της μεταξύ τους διαφοράς συναρτήσει της φάσης (μαύρη καμπύλη). Πράγματι, παρατηρώντας την καμπύλη αυτή, δεν φαίνεται να υπάρχει διαφωνία μεταξύ των



Εικόνα 6.4 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 8505215 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

δύο μοντέλων. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή μοντέλου που αφορά πλανήτη με δακτύλιο, προσδιορίζει τις παραμέτρους ως εξής: εάν υπάρχει, ο δακτύλιος εκτείνεται σε αποστάσεις μεταξύ $R_{in} = 3.08504 R_p$ και $R_{out} = 3.12975 R_p$. Η διαφορά αυτών των ακτίνων δίνει το πάχος του, το οποίο ισούται με $\Delta r = 0.04471 R_p$.

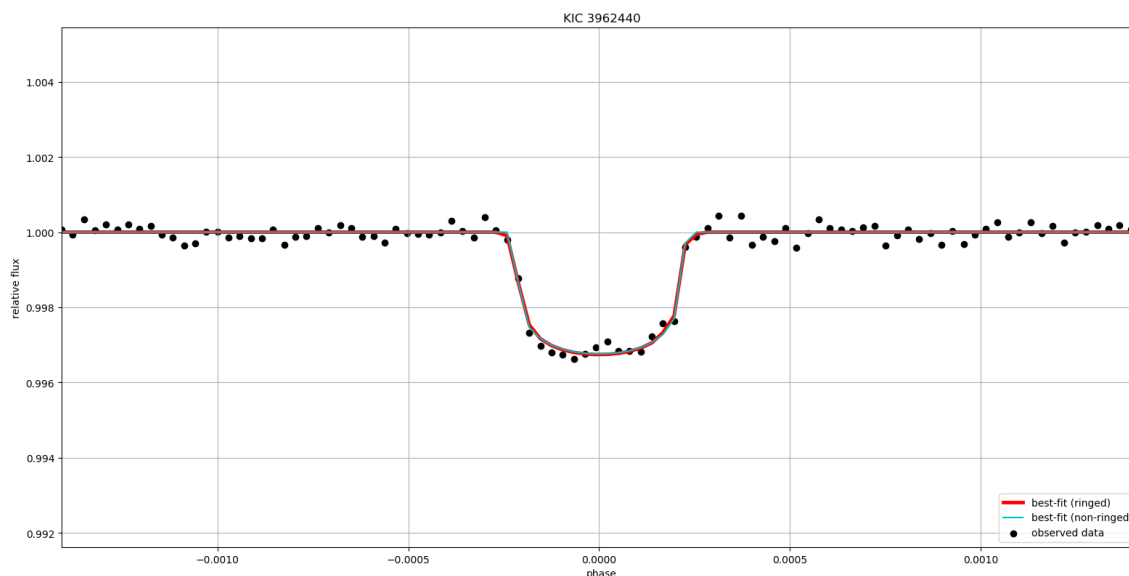
Ο πίνακας 6.2 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των δύο μοντέλων όπως υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία του fitting.

Πίνακας 6.2 – Best-fit parameters για τον KIC 8505215.

| KIC 8505215 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 2190.70104 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.34313 ± 0.02458 | 0.37132 ± 0.00169 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.90611 ± 0.00275 | 0.90638 ± 0.00256 |
| $R_{in} [R_J]$ | 1.05857 ± 0.51570 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.07391 ± 0.50054 | – |
| χ^2 | 7.14196×10^{-7} | 7.33502×10^{-7} |

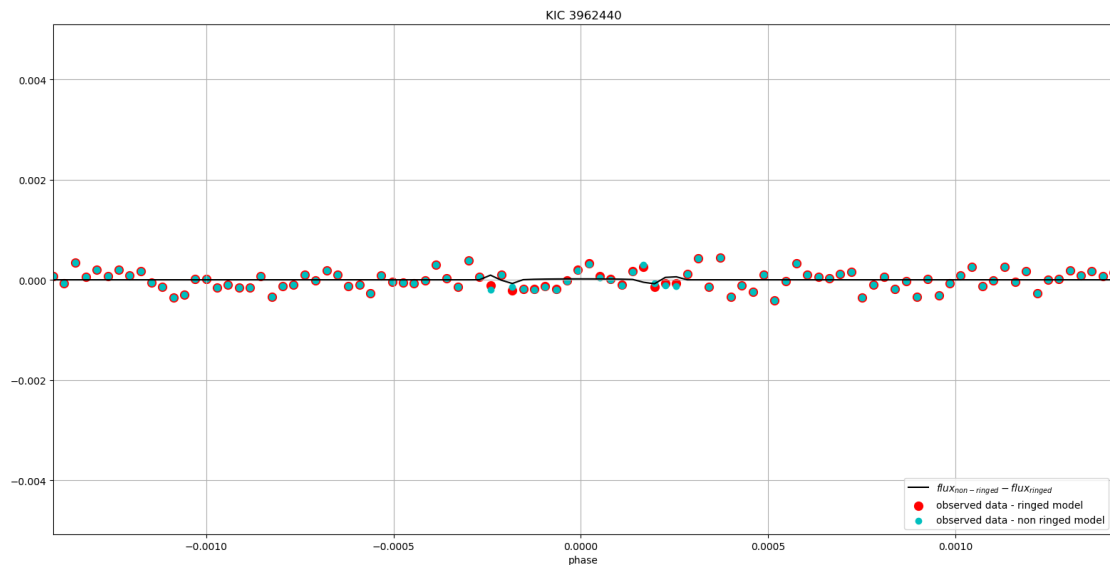
6.3 KIC 3962440

Στην ενότητα αυτή τίθεται υπό μελέτη η διάβαση ενός ακόμα πλανήτη με τροχιακή περίοδο 700.00 days. Ο πλανήτης αυτός βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τον ηλιακού τύπου αστέρα KIC 3962440. Ο αστέρας αυτός συγκεκριμένα, έχει μάζα $M_s = 1.14 \pm 0.2 M_\odot$ και θερμοκρασία $T = 6487 \pm 164$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Η σχετική καμπύλη φωτός παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.5. Το ενδιαφέρον στο διάγραμμα αυτό είναι ότι παρατηρείται ασυμμετρία. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει ένδειξη για την ύπαρξη δακτυλίου.



Εικόνα 6.5 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 3962440 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Ακολουθώντας, σχεδιάζεται το διάγραμμα της διαφοράς μεταξύ των παρατηρησιακών δεδομένων και καθενός μοντέλου συναρτήσει της φάσης. Από το διάγραμμα αυτό 6.6 καθώς και από τον πίνακα 6.3, συμπεραίνεται ότι το χ^2 λαμβάνει ελάχιστη τιμή κατά την εφαρμογή του ringed-model. Δηλαδή, και πάλι το μοντέλο που φέρει δακτύλιο προσαρμόζεται καλύτερα στα παρατηρησιακά δεδομένα συγκρινόμενο με το μοντέλο για σφαιρικό πλανήτη. Από τη μαύρη καμπύλη του ίδιου γραφήματος γίνεται φανερό ότι τα δύο μοντέλα έχουν την ίδια συμπεριφορά στην περιοχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί στην διάβαση του πλανήτη καθώς επίσης, συμφωνούν και πριν/μετά το φαινόμενο της διάβασης. Εκεί που υπάρχει ασυμφωνία είναι η περιοχή που αντιστοιχεί στον κλάδο που παριστάνει τη συνεισφορά των δακτυλίων. Αυτή είναι η περιοχή του διαγράμματος με τιμές φάσης $\phi \sim \pm 0.0002$.



Εικόνα 6.6 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 3962440 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν από την εφαρμογή των δύο μοντέλων στα δεδομένα, συνοψίζονται στον πίνακα 6.3. Από τον πίνακα αυτό, συμπεραίνεται ότι αν ο πλανήτης KIC 3962440 φιλοξενούσε δακτύλιο, αυτός θα εκτεινόταν σε αποστάσεις μεταξύ $R_{in} = 3.59291 R_p$ και $R_{out} = 3.62351 R_p$, δηλαδή, θα είχε πάχος ίσο με $\Delta r = 0.03060 R_p$.

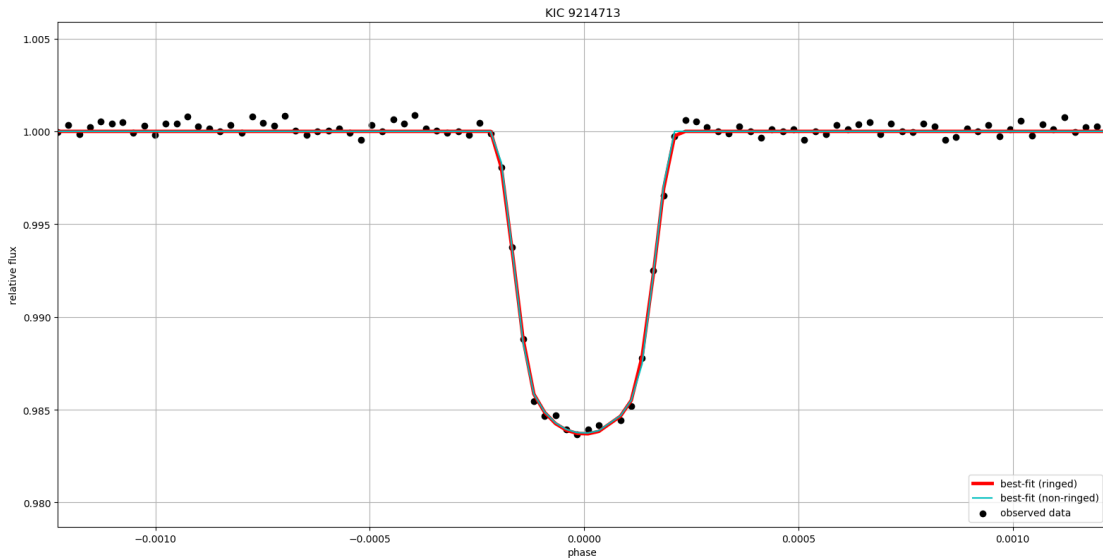
Πίνακας 6.3 – Best-fit parameters για τον KIC 3962440.

| KIC 3962440 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 700.00298 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.28264 ± 0.02104 | 0.30090 ± 0.00269 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.55910 ± 0.00352 | 0.55957 ± 0.00328 |
| $R_{in} [R_J]$ | 1.01550 ± 0.366707 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.02415 ± 0.36671 | – |
| χ^2 | 3.32941×10^{-6} | 3.36009×10^{-6} |

6.4 KIC 9214713

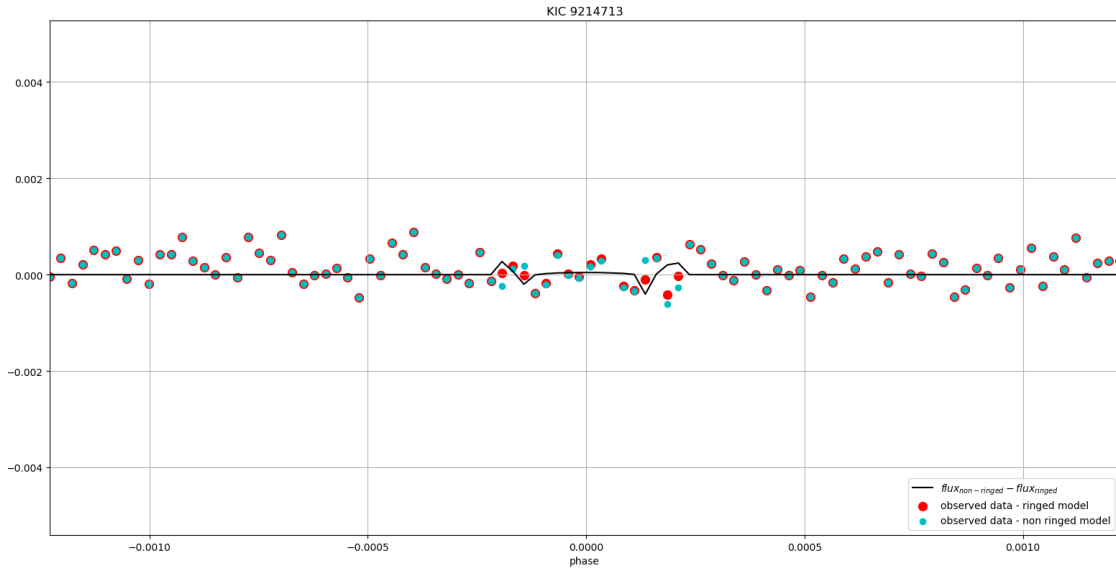
Στην ίδια λογική με τα προηγούμενα, μελετάται παρακάτω πλανήτης που περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 9214713 με τροχιακή περίοδο ίση με 809.01 days. Ο αστέρας και πάλι είναι παρόμοιος με τον Ήλιο, έχοντας μάζα $M_s = 0.99 \pm 0.14 M_\odot$ και θερμοκρασία $T = 6230 \pm 169$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Η καμπύλη φωτός που εξάγεται στην περίπτωση αυτή, εμφανίζεται παρακάτω 6.7. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια ασυνήθιστα βαθειά βύθιση της καμπύλης φωτός. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια διάβασης η φωτεινή ροή του μητρικού αστέρα ελαττώνεται κατά $\sim 1.63\%$. Συγκριτικά, στην περίπτωση του Κρόνου -αν μπορούσε να παρατηρηθεί η διάβασή του μπροστά από τον Ήλιο- η αντίστοιχη ελάττωση είναι ίση με $\sim 3.29\%$. Το γεγονός αυτό, της βαθειάς βύθισης, θα μπορούσε να υποστηρίξει το σενάριο ο πλανήτης να είναι μεγάλων διαστάσεων ή το ενδεχόμενο ο πλανήτης να φέρει σύστημα δακτυλίων. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις αποκόπτεται μεγάλο ποσοστό της φωτεινής ροής του μητρικού αστέρα και συνεπώς, η καμπύλη φωτός παρουσιάζει μεγάλη βύθιση.

Ομοίως με τα προηγούμενα, σχεδιάζεται στη συνέχεια το διάγραμμα των residuals 6.8. Με



Εικόνα 6.7 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 9214713 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

βάση τις τιμές αυτών, υπολογίζεται η ποσότητα χ^2 . Παρατηρείται ότι το χ^2 λαμβάνει την τιμή 1.08766×10^{-5} για το ringed-model, ενώ για το non-ringed model είναι ίσο με 1.12506×10^{-5} . Καλύτερο fitting είναι αυτό με το ελάχιστο χ^2 , επομένως, εφαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα το ringed-model. Τέλος, παρουσιάζεται στο ίδιο διάγραμμα η διαφορά των τιμών των δύο μοντέλων συναρτήσει της φάσης (μαύρη καμπύλη). Είναι εμφανής η ασύμμετρη διαφωνία των δύο μοντέλων λίγο μετά την έναρξη και λίγο πριν τη λήξη της διάβασης. Συγκεκριμένα, η διαφορά των δύο μοντέλων είναι της τάξης 0.00075 (όπως στην περίπτωση δακτυλίου ενδιάμεσου πάχους στη διερεύνηση του κεφαλαίου 4). Επίσης, συμφωνία υπάρχει και στις τιμές των δύο μοντέλων που αντιστοιχούν στον κλάδο που προέρχεται από τη διάβαση του σφαιρικού πλανήτη (γύρω από τη φάση $\phi = 0$). Δεξιά και αριστερά από την περιοχή αυτή, η συνεισφορά προέρχεται από τυχόν υπάρχοντες δακτυλίους. Φαίνεται λοιπόν, ότι σε αυτές τις δύο περιοχές, εκατέρωθεν της φάσης $\phi = 0$, τα δύο μοντέλα διαφωνούν.



Εικόνα 6.8 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 9214713 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

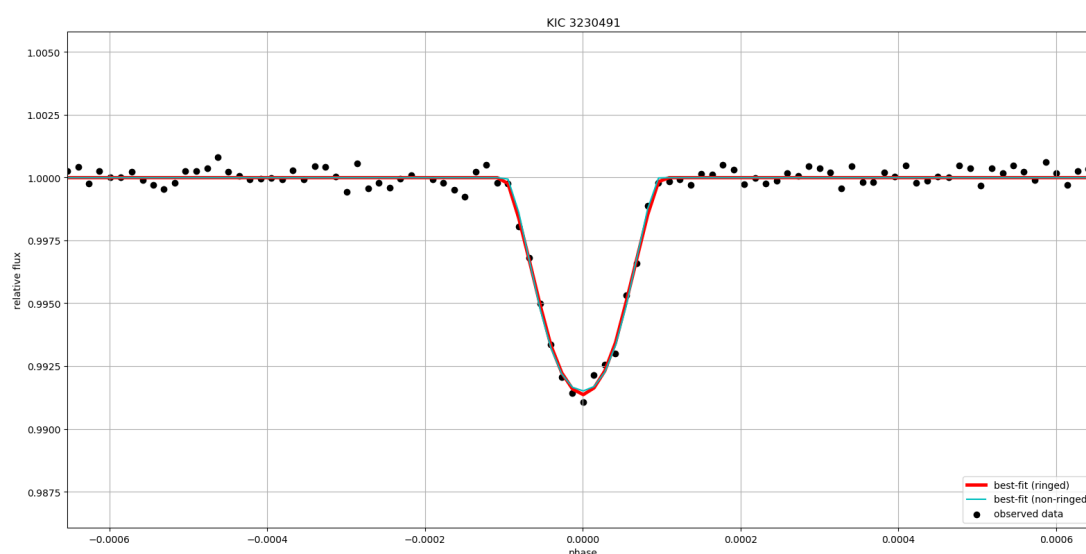
Οι τιμές των παραμέτρων των μοντέλων που εφαρμόστηκαν στα δεδομένα, συνοψίζονται στον πίνακα 6.4. Από τις τιμές αυτές, υπολογίζονται η εσωτερη και εξωτερη ακτίνα του δακτυλίου που δυνητικά φιλοξενεί ο υπό μελέτη πλανήτης, ως εξής: $R_{in} = 0.60851 R_p$, $R_{out} = 0.85604 R_p$. Συνεπώς, το πάχος του δακτυλίου, αν πράγματι αυτός υπάρχει, αναμένεται να είναι $\Delta r = 0.24754 R_p$.

Πίνακας 6.4 – Best-fit parameters για τον KIC 9214713.

| KIC 9214713 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 809.01419 ± 0.00092 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.77718 ± 0.07835 | 0.68084 ± 0.00239 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.54749 ± 0.00162 | 0.54743 ± 0.00147 |
| $R_{in} [R_J]$ | 0.47292 ± 0.10836 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 0.66530 ± 0.19966 | – |
| χ^2 | 1.08766×10^{-5} | 1.12506×10^{-5} |

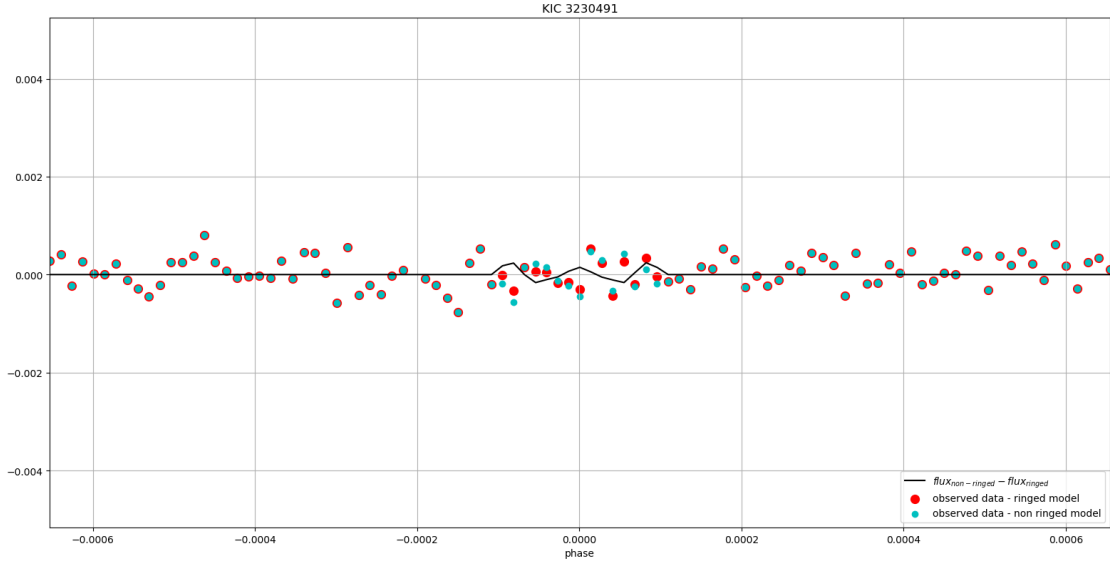
6.5 KIC 3230491

Ακολούθως παρουσιάζεται η καμπύλη φωτός του μητρικού αστέρα KIC 3230491 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη με περίοδο 1500 days. Και πάλι, οι εξωδακτύλιοι αναζητούνται γύρω από πλανήτη που περιφέρεται γύρω από αστέρα παρόμοιο με τον Ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, ο KIC 3230491 έχει μάζα $M_s = 0.83 \pm 0.08 M_\odot$ και θερμοκρασία $T = 5606 \pm 150$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Από το διάγραμμα αυτό 6.9 φαίνεται ότι υπάρχει ισχυρή βύθιση στην καμπύλη φωτός, πράγμα που υποστηρίζει είτε την ύπαρξη μεγάλης ακτίνας πλανήτη, είτε την ύπαρξη μικρότερου πλανήτη που φέρει σύστημα δακτυλίων. Το ποσοστό της ελάττωσης της φωτεινής ροής είναι $\sim 2.24\%$. Σημειώνεται ότι αν μπορούσε να παρατηρηθεί η διάβαση του Κρόνου, το αντίστοιχο ποσοστό ελάττωσης θα ήταν $\sim 3.29\%$.



Εικόνα 6.9 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 3230491 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Για να ελεγχθεί το κατά πόσο συμφωνεί καθένα από τα μοντέλα με τα παρατηρησιακά δεδομένα, σχεδιάζεται το διάγραμμα των residuals 6.10. Επιπλέον, στον υπολογισμό του χ^2 για τα δύο μοντέλα παρουσιάζεται διαφορά στο έβδομο δεκαδικό ψηφίο (πίνακας 6.5). Συγκρίνοντας τις δύο τιμές, φαίνεται ότι η μικρότερη αυτών αντιστοιχεί στο ringed model. Άρα, αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα, συγκρινόμενο με το non-ringed model. Ακόμη, στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάζεται ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ των δύο μοντέλων (μαύρη καμπύλη). Από την καμπύλη αυτή φαίνεται ότι τα δύο μοντέλα διαφωνούν όχι μόνο στις περιοχές που αντιστοιχεί η συνεισφορά των δακτυλίων, αλλά και γύρω από τη φάση $\phi = 0$. Αυτό συμβαίνει γιατί το ringed model «προβλέπει» ισχυρότερη βύθιση σε σχέση με το non-ringed model.



Εικόνα 6.10 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 3230491 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται σε καθένα από τα δύο μοντέλα υπολογίστηκαν κατά την διαδικασία του fitting. Οι τιμές τους συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.5. Οι τιμές της εσωτερης και εξώτερης ακτίνας του δυνητικά υπάρχοντος δακτυλίου είναι: $R_{in} = 1.52014 R_p$ και $R_{out} = 3.88355 R_p$, πράγμα που σημαίνει ότι αν ο δακτύλιος πράγματι υπήρχε, θα είχε πάχος $\Delta r = 2.36341 R_p$.

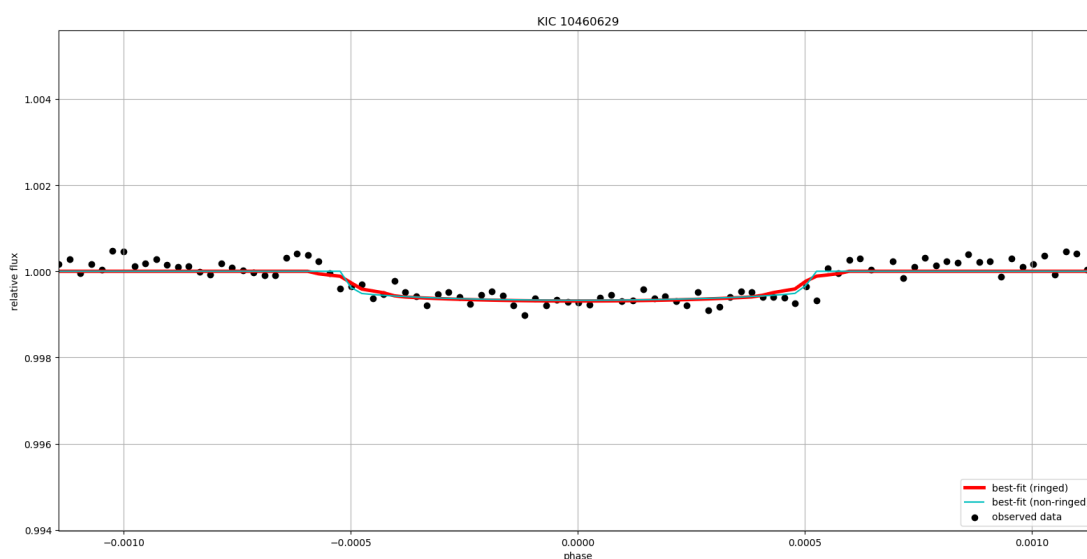
Πίνακας 6.5 – Best-fit parameters για τον KIC 3230491.

| KIC 3230491 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 1500 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p[R_J]$ | 0.19039 ± 0.08167 | 0.50689 ± 0.00739 |
| $R_s[R_\odot]$ | 0.48407 ± 0.00929 | 0.50074 ± 0.00231 |
| $R_{in}[R_J]$ | 0.28942 ± 0.13569 | – |
| $R_{out}[R_J]$ | 0.73939 ± 0.07223 | – |
| χ^2 | 9.00781×10^{-6} | 9.38513×10^{-6} |

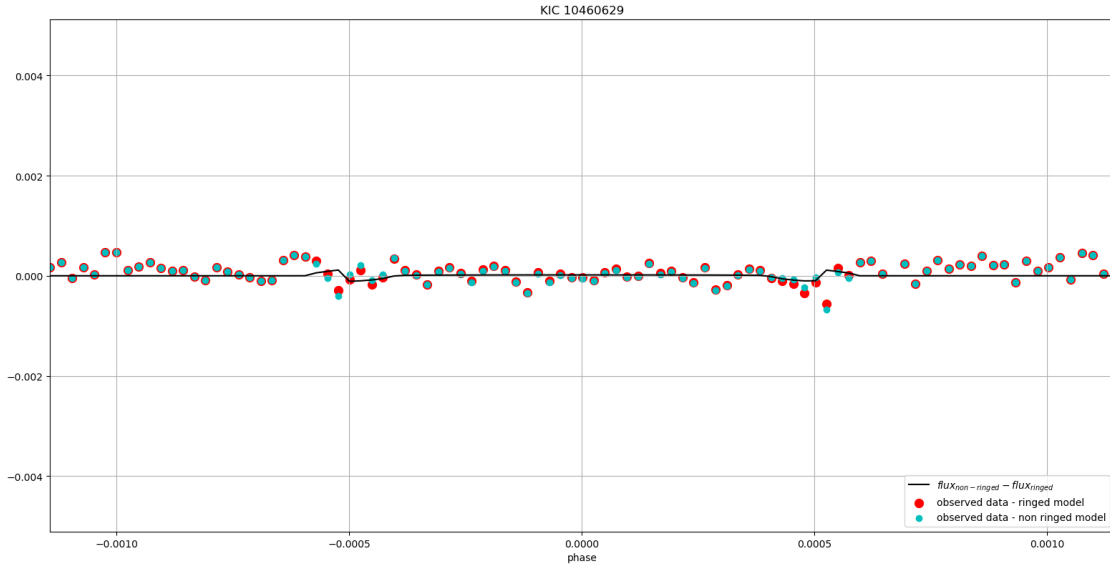
6.6 KIC 10460629

Στην ενότητα αυτή, μελετάται η ελάττωση της φωτεινής ροής του αστέρα KIC 10460629, μάζας $M_s = 1.06 \pm 0.25 M_\odot$ και θερμοκρασίας $T = 6449 \pm 163$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Η ελάττωση αυτή οφείλεται στην διάβαση του πλανήτη που φιλοξενεί, ο οποίος έχει τροχιακή περίοδο 856.67 days. Η καμπύλη φωτός που οφείλεται στη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη μπροστά από τον δίσκο του μητρικού του αστέρα, φαίνεται στο διάγραμμα 6.11. Η ελάττωση της φωτεινής ροής που φαίνεται στο διάγραμμα αυτό πιθανότατα δεν οφείλεται στην παρουσία δακτυλίου, καθώς εάν υπήρχε δακτύλιος θα έπρεπε να σημειώνεται ισχυρή ελάττωση της ροής. Βέβαια, θα μπορούσε η ρηχή καμπύλη φωτός να οφείλεται σε μη κεντρική διάβαση. Όμως, στην εργασία αυτή έχει υποτεθεί ότι οι διαβάσεις είναι όλες κεντρικές.

Όπως και στα προηγούμενα, έτσι και στην περίπτωση αυτή, παρατίθεται και το διάγραμμα 6.12 των residuals, μαζί με τη διαφορά των μοντέλων συναρτήσεως της φάσης. Ακόμη, όπως φαίνεται από τις τιμές του χ^2 (πίνακας 6.6), το μοντέλο που έχει βέλτιστη εφαρμογή στα δεδομένα είναι αυτό που θεωρεί ότι ο πλανήτης φέρει δακτύλιο. Επίσης, παρ' όλο που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βάθος της διάβασης είναι εξαιρετικά μικρό και άρα αναμένεται να μην υπάρχει δακτύλιος -όπως αιτιολογείται παραπάνω- το fitting των δύο μοντέλων δίνει τιμές σχετικής ροής που διαφωνούν μεταξύ τους (μαύρη καμπύλη στο διάγραμμα 6.12). Συνολικά, το αποτέλεσμα αυτό είναι αμφισβητήσιμο, καθώς τα δεδομένα στα οποία γίνεται η εφαρμογή μοντέλων προέρχονται από μία μόνο παρατηρήσιμη διάβαση. Για να υπάρξει μεγαλύτερη βεβαιότητα, απαιτούνται περαιτέρω παρατηρήσεις του συγκεκριμένου συστήματος.



Εικόνα 6.11 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 10460629 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).



Εικόνα 6.12 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 10460629 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

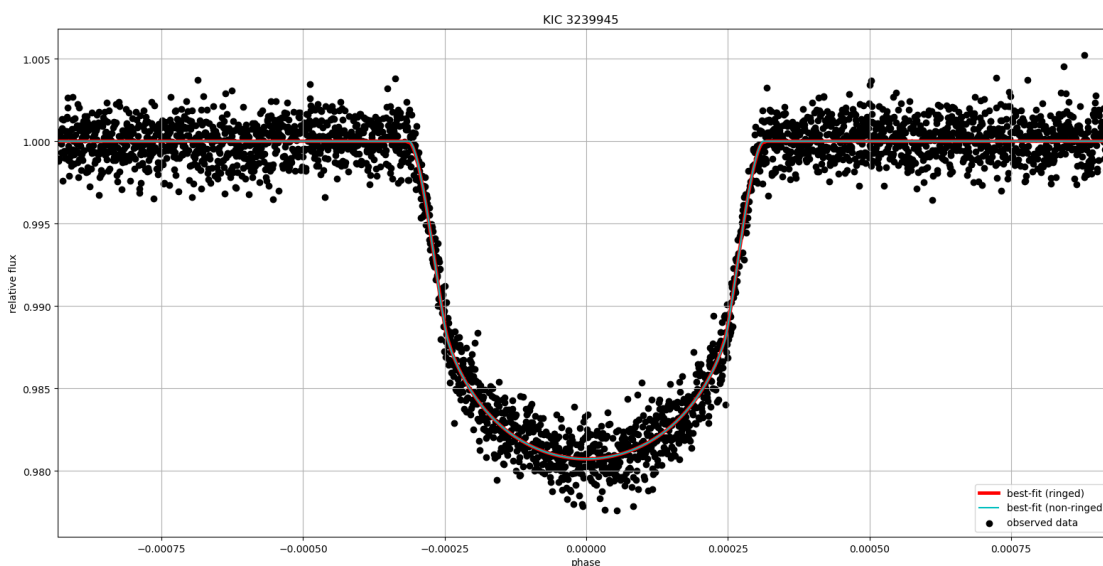
Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού των παραμέτρων, φαίνονται στον πίνακα 6.6. Η εφαρμογή μοντέλου με δακτύλιο στα δεδομένα, δίνει τις εξής τιμές στην εσωτερη και εξωτερη ακτίνα του δακτυλίου: $R_{in} = 9.72192 R_p$ και $R_{out} = 9.81291 R_p$. Αν υπήρχε συνεπώς δακτύλιος, θα είχε πάχος $\Delta r = 0.09099 R_p$.

Πίνακας 6.6 – Best-fit parameters για τον KIC 10460629.

| KIC 10460629 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 856.67212 ± 0.00959 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.22177 ± 0.08873 | 0.32162 ± 0.00910 |
| $R_s [R_\odot]$ | 1.3031 ± 0.02000 | 1.3162 ± 0.01718 |
| $R_{in} [R_J]$ | 2.15603 ± 0.50083 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 2.17621 ± 0.49244 | – |
| χ^2 | 4.37965×10^{-6} | 4.44958×10^{-6} |

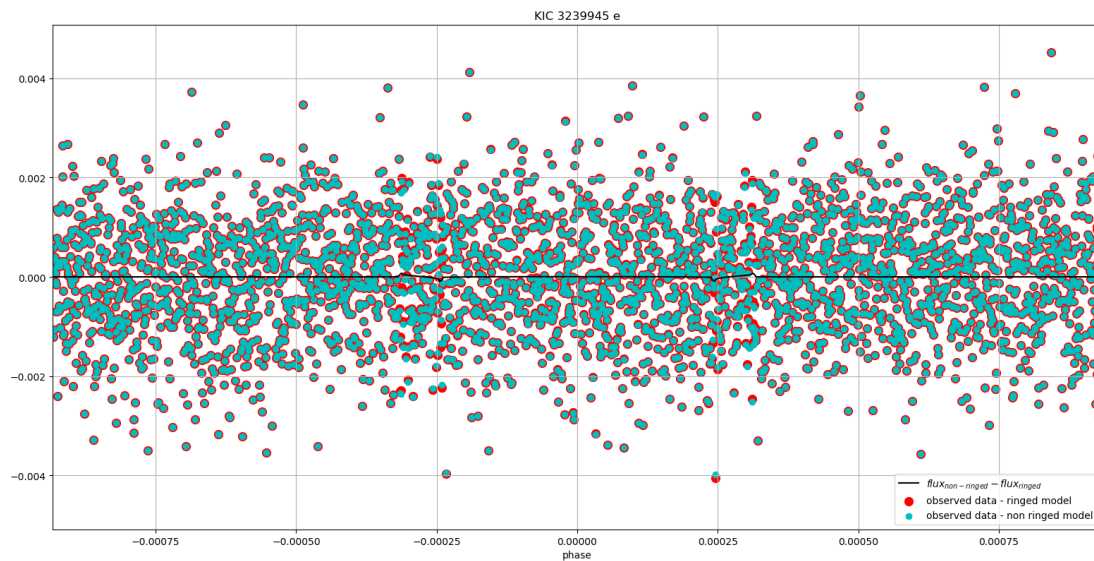
6.7 KIC 3239945

Ο επόμενος πλανήτης που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι μακροπερίοδος με περίοδο 1071.23 days και περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 3239945, ο οποίος είναι μάζας $M_s = 0.78 \pm 0.03 M_\odot$ και θερμοκρασίας $T = 4799 \pm 95$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Μοιάζει δηλαδή, με τον Ήλιο. Η διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο προκαλεί βύθιση στην καμπύλη φωτός, όπως αυτή φαίνεται στο διάγραμμα 6.13. Παρ' όλο που η ελάττωση της φωτεινής ροής είναι έντονη, η καμπύλη φωτός του συγκεκριμένου πλανήτη είναι απολύτως συμμετρική. Εάν όμως υπήρχε δακτύλιος, θα παρατηρούσαν έστω και μια μικρή ασυμμετρία λίγο μετά την έναρξη και λίγο πριν τη λήξη της διάβασης.



Εικόνα 6.13 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 3239945 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Ακόμη, από το διάγραμμα 6.14 φαίνεται ότι τα δύο μοντέλα έρχονται σε καλή συμφωνία με τα παρατηρησιακά δεδομένα (κόκκινα και γαλάζια σημεία). Για μια εκτίμηση του ποιο από τα δύο μοντέλα είναι το βέλτιστο, γίνεται ο υπολογισμός του χ^2 . Αυτός παρουσιάζει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων στο έκτο δεκαδικό ψηφίο και από τις τιμές του φαίνεται να είναι καλύτερο το fitting μοντέλου με δακτύλιο, έναντι του μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγάλες τιμές του χ^2 στην περίπτωση του συγκεκριμένου πλανήτη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές άλλων πλανητών, οφείλονται στη διασπορά των παρατηρησιακών δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, αν αναλογιστεί κανείς τα παραπάνω και επιπλέον, αν παρατηρήσει την μαύρη καμπύλη του ίδιου διαγράμματος, θα συμπεράνει ότι το ενδεχόμενο φιλοξενίας δακτυλίου θα πρέπει μάλλον να αποκλειστεί στην περίπτωση του συγκεκριμένου πλανήτη. Η μαύρη αυτή καμπύλη εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων, και από αυτή φαίνεται ότι το μοντέλο με δακτύλιο είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη.



Εικόνα 6.14 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του *KIC 3239945* και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

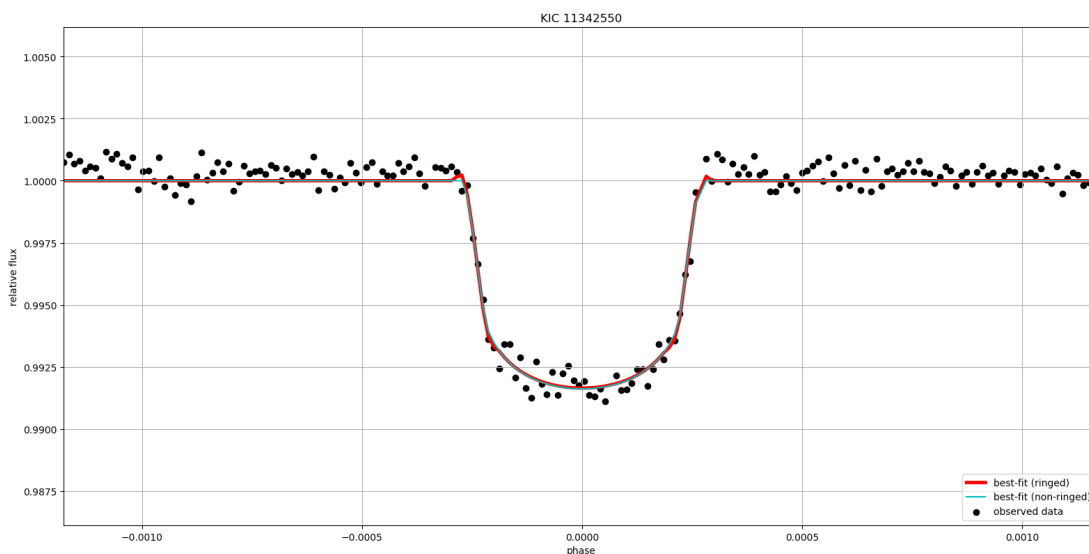
Οι παράμετροι των δύο μοντέλων, όπως υπολογίστηκαν, φαίνονται στον πίνακα 6.7. Από τις τιμές των ακτινών R_{in} , R_{out} υπολογίζεται ότι αν ο δακτύλιος υπήρχε, θα εκτεινόταν σε αποστάσεις μεταξύ $R_{in} = 1.17101 R_p$ και $R_{out} = 1.21529 R_p$. Η διαφορά αυτών των ακτίνων ισούται με $\Delta r = 0.04428 R_p$, δηλαδή αν υπήρχε δακτύλιος θα ήταν πολύ μικρής ακτίνας.

Πίνακας 6.7 – *Best-fit parameters* για τον *KIC 3239945*.

| KIC 3239945 | | |
|-----------------------|----------------------|-------------------|
| orbital period [days] | 1071.23262 ± 0.00064 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.82458 ± 0.07805 | 0.85158 ± 0.00143 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.69962 ± 0.00111 | 0.69965 ± 0.00110 |
| $R_{in} [R_J]$ | 0.96559 ± 0.42164 | — |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.00210 ± 0.33122 | — |
| χ^2 | 0.0042306 | 0.0042312 |

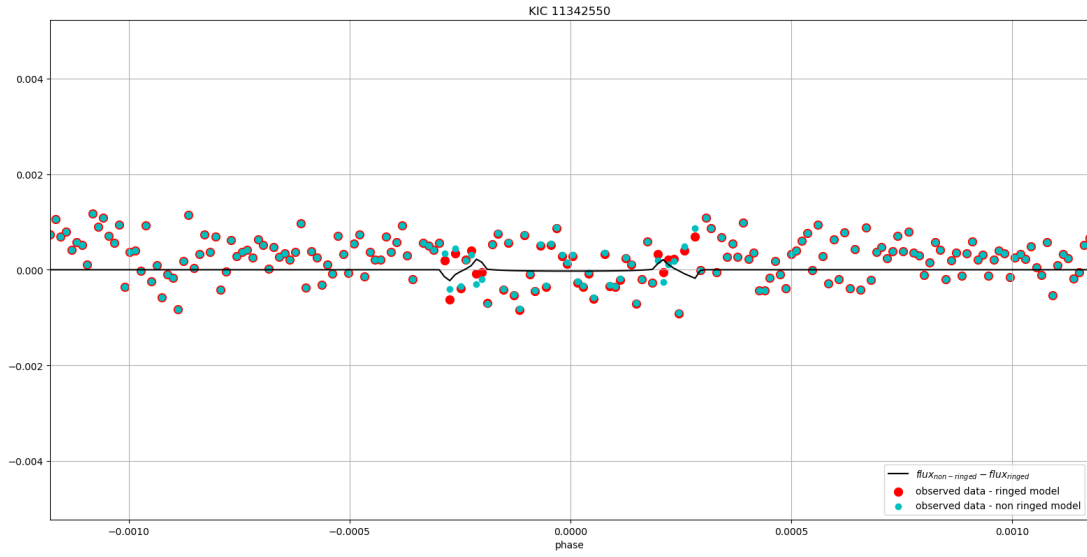
6.8 KIC 11342550

Στην ενότητα αυτή μελετάται μακροπερίοδος πλανήτη με περίοδο 1693.66 days, ο οποίος περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 11342550, μάζας $M_s = 1.06 \pm 0.13 M_\odot$ και θερμοκρασίας $T = 5923 \pm 160$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Η σχετική καμπύλη φωτός φαίνεται στο διάγραμμα 6.15. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η ασυμμετρία που υπάρχει στο μοντέλο με δακτύλιο (κόκκινη καμπύλη) και συγκεκριμένα στους κλάδους που οφείλονται στη διάβαση του δακτυλίου. Δηλαδή, ακριβώς μετά την έναρξη καθώς και ακριβώς πριν την λήξη της βύθισης.



Εικόνα 6.15 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 11342550 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Παρακάτω, στο διάγραμμα 6.16 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των τιμών ροής που δίνει το κάθε μοντέλο και των παρατηρησιακών δεδομένων. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στο μοντέλο για πλανήτη με δακτύλιο, ενώ τα γαλάζια αφορούν το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη. Από τους υπολογισμούς των διαφορών αυτών, φαίνεται ότι το καλύτερο fitting είναι αυτό που λαμβάνει υπόψη πλανήτη και δακτύλιο. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο που θεωρεί σφαιρικό πλανήτη αντιστοιχεί σε λίγο μεγαλύτερη τιμή του χ^2 και επομένως δεν είναι το βέλτιστο δυνατό. Επιπρόσθετα, παρατηρώντας την μαύρη καμπύλη του ίδιου διαγράμματος γίνεται φανερό ότι τα δύο μοντέλα (για σφαιρικό πλανήτη και για πλανήτη με δακτύλιο) εμφανίζουν διαφωνία ακριβώς στις περιοχές του διαγράμματος που αντιστοιχούν στη συνεισφορά του δακτυλίου που πιθανώς φέρει ο υπό μελέτη πλανήτης (γύρω από τις φάσεις $\phi \sim \pm 0.00025$).



Εικόνα 6.16 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του KIC 11342550 και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

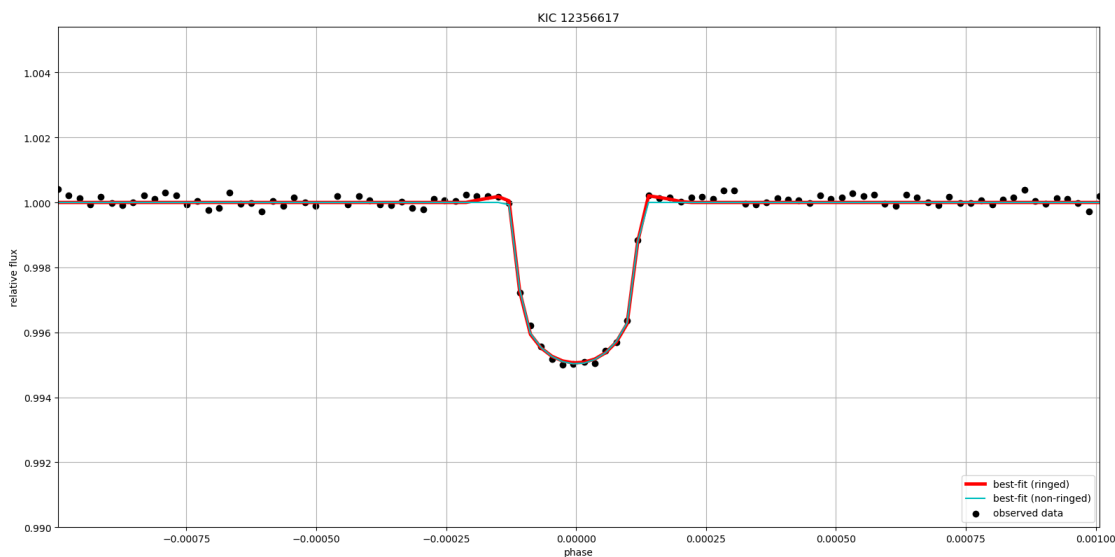
Τέλος, οι υπολογισμοί των σχετικών με τα μοντέλα παραμέτρων συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.8. Σύμφωνα με τις τιμές των R_{in} και R_{out} που είναι αντίστοιχα ίσες με $1.62929 R_p$ και $1.69984 R_p$, το πάχος του εν δυνάμει υπάρχοντος δακτυλίου θα ισούται με $\Delta r = 0.07055 R_p$.

Πίνακας 6.8 – Best-fit parameters για τον KIC 11342550.

| KIC 11342550 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 1693.66362 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.99552 ± 0.09862 | 0.92012 ± 0.00553 |
| $R_s [R_\odot]$ | 1.07891 ± 0.00494 | 1.07819 ± 0.00517 |
| $R_{in} [R_J]$ | 1.62199 ± 0.85559 | – |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.69222 ± 0.75613 | – |
| χ^2 | 4.68355×10^{-5} | 4.70720×10^{-5} |

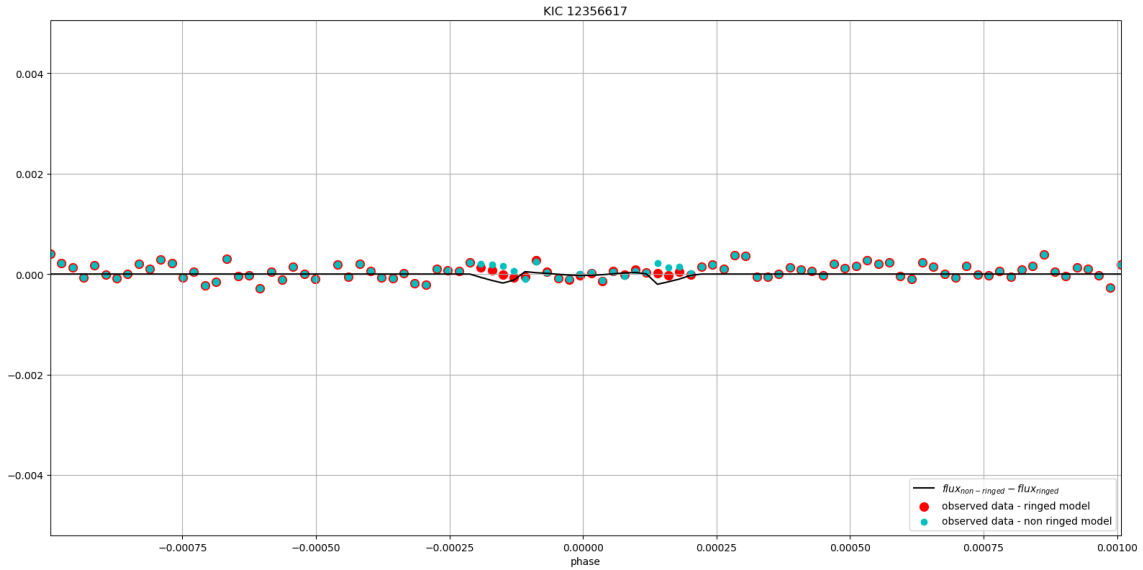
6.9 KIC 12356617

Ο τελευταίος πλανήτης που μελετάται στην εργασία αυτή έχει περίοδο 988.88 days και περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 12356617, μάζας $M_s = 1.11 \pm 0.11 M_\odot$ και θερμοκρασίας $T = 5755 \pm 112$ K [Πηγή: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. Η ελάττωση της αστρικής ροής που προκαλείται από την διάβαση του εν λόγω πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο, φαίνεται στο διάγραμμα 6.17. Από αυτό, παρατηρείται ασυμμετρία στην κόκκινη καμπύλη (μοντέλο με δακτύλιο) λίγο μετά την έναρξη και λίγο πριν τη λήξη της διάβασης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το μεγάλο βάθος διάβασης αποτελούν πιθανές ενδείξεις για την ύπαρξη δακτυλίου γύρω από τον υπό μελέτη πλανήτη. Συγκεκριμένα, το ποσοστό ελάττωσης της φωτεινής ροής κατά τη διάβαση είναι ίσο με $\sim 4.12\%$. Για σύγκριση, σημειώνεται ότι το αντίστοιχο ποσοστό στην περίπτωση του πλανήτη Κρόνου -αν βέβαια ήταν δυνατό να παρατηρηθεί η διάβασή του- θα ήταν $\sim 3.29\%$.



Εικόνα 6.17 – Η καμπύλη φωτός του αστέρα KIC 12356617 κατά τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη. Φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα καθώς και η προσαρμογή των μοντέλων: για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζιο) και για πλανήτη που φέρει δακτύλιο (κόκκινο).

Τα δύο μοντέλα που εφαρμόστηκαν στα παρατηρησιακά δεδομένα είναι σε συμφωνία με αυτά, αλλά και σε σχετική συμφωνία μεταξύ τους, όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.18. Οι μόνες περιοχές όπου παρατηρείται μια διαφωνία είναι λίγο μετά την έναρξη και λίγο πριν το πέρας της διάβασης. Βέβαια, θα πρέπει να σχολιαστεί ότι εκεί υπάρχουν ελάχιστα παρατηρησιακά σημεία και αυτό καθιστά την αξιοπιστία του fitting ελλιπή. Δηλαδή, με βάση το πλήθος των δεδομένων, δεν μπορεί να γίνει ικανοποιητική εξαγωγή συμπεράσματος από το fitting. Με βάση τους υπολογισμούς, οι τιμές του χ^2 για τα δύο μοντέλα (με δακτύλιο και χωρίς) παρουσιάζουν διαφορά στο όγδοο δεκαδικό ψηφίο. Μικρότερη από τις δύο τιμές είναι αυτή που αντιστοιχεί στο μοντέλο που υποθέτει συνεισφορά δακτυλίου, οπότε αυτό φαίνεται να είναι και το πιο ικανοποιητικό μοντέλο.



Εικόνα 6.18 – Διαφορά μεταξύ παρατηρησιακών δεδομένων του *KIC 12356617* και μοντέλου με δακτύλιο (κόκκινα σημεία) και μοντέλου για σφαιρικό πλανήτη (γαλάζια σημεία). Η μαύρη καμπύλη αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.

Ο δακτύλιος εάν υπήρχε θα εκτεινόταν σε αποστάσεις μεταξύ $R_{in} = 6.13138 R_p$ και $R_{out} = 6.14666 R_p$. Η διαφορά αυτών των ακτίνων δίνει το πάχος του δακτυλίου, το οποίο ισούται με $\Delta r = 0.01528 R_p$. Οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν κατά το fitting συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9 – *Best-fit parameters* για τον *KIC 12356617*.

| KIC 12356617 | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| orbital period [days] | 988.88111 ± 0.00091 | |
| model | ringed | non-ringed |
| $R_p [R_J]$ | 0.31329 ± 0.00666 | 0.30036 ± 0.00166 |
| $R_s [R_\odot]$ | 0.43764 ± 0.001619 | 0.43579 ± 0.00159 |
| $R_{in} [R_J]$ | 1.92009 ± 0.58909 | — |
| $R_{out} [R_J]$ | 1.92568 ± 0.58671 | — |
| χ^2 | 2.24919×10^{-6} | 2.39677×10^{-6} |

6.10 Συμπεράσματα

Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει στην ενότητα αυτή, σύγκριση αυτών με τους εξωτερικούς πλανήτες του ηλιακού συστήματος καθώς και με τους υποθετικούς πλανήτες της διερεύνησης του κεφαλαίου 4. Αναφέρεται εδώ ότι το πάχος των δακτυλίων των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού συστήματος έχει τις εξής τιμές:

$$\Delta r/R_{Jupiter} = 1.91672 \text{ για τον Δία,}$$

$$\Delta r/R_{Saturn} = 1.25361 \text{ για τον Κρόνο,}$$

$$\Delta r/R_{Uranus} = 2.36574 \text{ για τον Ουρανό και}$$

$$\Delta r/R_{Neptune} = 0.89757 \text{ για τον Ποσειδώνα.}$$

Στον παρακάτω πίνακα, στην δεύτερη στήλη συγκεντρώνονται οι τιμές του λόγου του πάχους κάθε δακτυλίου προς την ακτίνα του πλανήτη που δυνητικά τους φιλοξενεί, όπως αυτές υπολογίστηκαν. Επίσης, στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται το ποσοστό υπερεκτίμησης της ακτίνας του καθενός πλανήτη αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει δακτύλιος.

Πίνακας 6.10 – Οι τιμές του λόγου του πάχους κάθε δακτυλίου προς την ακτίνα του μητρικού του πλανήτη και του ποσοστού υπερεκτίμησης της πλανητικής ακτίνας για τις περιπτώσεις των πλανητών που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 6.

| Host Star | $\Delta r/R_p$ | Ποσοστό Υπερεκτίμησης R_p | Κατηγορία |
|---------------------|----------------|-----------------------------|-----------|
| <i>KIC</i> 7619236 | 0.04361 | 4.12% | 3 |
| <i>KIC</i> 8505215 | 0.04471 | 8.22% | 3 |
| <i>KIC</i> 3962440 | 0.03060 | 6.46% | 3 |
| <i>KIC</i> 9214713 | 0.24754 | 12.39% | 2 |
| <i>KIC</i> 3230491 | 2.36341 | 166.24% | 1 |
| <i>KIC</i> 10460629 | 0.09099 | 45.02% | 3 |
| <i>KIC</i> 3239945 | 0.04428 | 3.27% | 3 |
| <i>KIC</i> 11342550 | 0.07055 | -7.57% | 3 |
| <i>KIC</i> 12356617 | 0.01528 | -4.12% | 3 |

Σύμφωνα με την διερεύνηση του κεφαλαίου 4, οι υποθετικοί δακτύλιοι μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της ποσότητας $\Delta r/R_p$, δηλαδή, ανάλογα με το πάχος τους ως προς την ακτίνα του μητρικού τους πλανήτη. Συγκεκριμένα, όπως υπολογίστηκε:

$\Delta r/R_p \sim 10^0$ για μεγάλο πάχος δακτύλιο (κατηγορία 1),

$\Delta r/R_p \sim 10^{-1}$ για ενδιάμεσου πάχους δακτύλιο (κατηγορία 2) και

$\Delta r/R_p \sim 10^{-2}$ για λεπτό δακτύλιο (κατηγορία 3).

Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή και με βάση τα αποτελέσματα της δεύτερης στήλης του πίνακα 6.10, συμπεραίνεται σε ποια κατηγορία ανήκει καθένας από τους πλανήτες που μελετήθηκαν. Θα πρέπει μάλιστα να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη ακτίνα έχει ο υποθετικός δακτύλιος, τόσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι η υποεκτίμηση της πυκνότητας του πλανήτη ή αντίστοιχα η υπερεκτίμηση της ακτίνας του, αν υποτεθεί ότι η παρατηρούμενη βύθιση σε μια

καμπύλη φωτός οφείλεται σε σφαιρικό πλανήτη. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αυτή, το βάθος της καμπύλης φωτός θα αποδοθεί σε έναν μεγάλης ακτίνας πλανήτη, παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει και συνεισφορά δακτυλίου. Συνολικά, η κατηγορία 1 αναμένεται να χαρακτηρίζεται από μεγάλα ποσοστά υπερεκτίμησης της πλανητικής ακτίνας, η κατηγορία 2 από μικρά ποσοστά και η κατηγορία 3 από ακόμα μικρότερα. Βέβαια, αυτό δεν έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τα δεδομένα του πίνακα 6.10. Αυτό συμβαίνει διότι τα σφάλματα στους υπολογισμούς των ακτινών που πραγματοποιήθηκαν είναι σημαντικά. Βέβαια, υπενθυμίζεται ότι για την εφαρμογή των μοντέλων έχει γίνει ένα σύνολο παραδοχών, οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Επιπλέον, οι αρνητικές τιμές που εμφανίζονται στην τρίτη στήλη του πίνακα 6.10 δεν είναι λογικές. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η ακτίνα του πλανήτη όπως υπολογίστηκε κατά τη διαδικασία του fitting έχει μεγαλύτερη τιμή αν υπάρχει δακτύλιος, σε σχέση με την τιμή της σε περίπτωση που ο πλανήτης είναι σφαιρικός. Θεωρητικά όμως, αναμένεται το μοντέλο σφαιρικού πλανήτη να υπολογίζει μεγαλύτερη πλανητική ακτίνα και όχι το μοντέλο που θεωρεί δακτύλιο. Οι τιμές αυτές οφείλονται και πάλι στα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις των παραμέτρων κατά την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων στα παρατηρησιακά δεδομένα.

Αναλυτικότερα, όσοι πλανήτες ανήκουν στην κατηγορία 3, εάν πράγματι διαθέτουν δακτύλιο, αυτός αναμένεται να είναι πολύ λεπτός και συνεπώς, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4, δεν μπορεί να εξαχθεί με βεβαιότητα συμπέρασμα για το αν αυτός υπάρχει ή όχι. Θα πρέπει να πραγματοποιηθούν περισσότερες φωτομετρικές παρατηρήσεις (ώστε να υπάρχουν περισσότερα σημεία στα παραγόμενα διαγράμματα), ακόμα και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, διότι η διαπερατότητα των δακτυλίων εξαρτάται από τη σύσταση των υλικών που τους αποτελούν και συνεπώς, θα εμφανίζει μεταβλητότητα με το μήκος κύματος. Θα πρέπει να σημειωθεί βέβαια, ότι στο Ηλιακό Σύστημα δεν απαντώνται δακτύλιοι όπως αυτοί της κατηγορίας 3. Η αντιστοίχιση των πλανητών του Ηλιακού Συστήματος στις κατηγορίες που ορίστηκαν νωρίτερα θα μπορούσε να έχει ως εξής: οι Κρόνος, Δίας, Ουρανός ανήκουν στην κατηγορία 1, ενώ ο Ποσειδώνας στην κατηγορία 2. Οι δακτύλιοι της κατηγορίας 3 όπως αυτή ορίστηκε είναι εξαιρετικά λεπτού πάχους και δεν υπάρχει ανάλογό τους στο Ηλιακό Σύστημα. Συνεπώς, εξωπλανήτες που με βάση τους υπολογισμούς αναμένεται να διαθέτουν τόσο λεπτούς δακτυλίους ($\Delta r/R_p \sim 0.01$), δεν αποτελούν κατάλληλο στόχο για την αναζήτηση δακτυλίων όπως αυτών των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού συστήματος. Άρα, θα πρέπει ίσως να αποκλειστεί το ενδεχόμενο φιλοξενίας δακτυλίων γύρω από αυτούς.

Αν πάλι, ένας πλανήτης ανήκει στην κατηγορία 1 ή στην κατηγορία 2, ο υποθετικός δακτύλιος θα είναι μεγάλου ή ενδιάμεσου πάχους, αντίστοιχα και ως εκ τούτου, θα είναι πιο σαφές το «αποτύπωμά» του στην καμπύλη φωτός του μητρικού αστέρα. Αυτό θα συμβαίνει γιατί ο δακτύλιος σε αυτές τις περιπτώσεις θα αποκόπτει σημαντικό ποσοστό του αστρικού φωτός, όπως και ο πλανήτης και θα παρατηρείται σταδιακή και όχι απότομη ελάττωση της φωτεινής ροής, όπως θα συνέβαινε για σφαιρικό πλανήτη (βλ. σχήμα 4.6). Τέτοιου είδους πλανήτες έχουν ανάλογο στο ηλιακό μας σύστημα. Το ανάλογο αυτό είναι οι πλανήτες Δίας, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας. Συνεπώς, αποτελούν καλούς στόχους για μελλοντικές παρατηρήσεις που σκοπό έχουν τον εντοπισμό δακτυλίων γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες.

Σε κάθε περίπτωση όμως, απαιτούνται περισσότερα παρατηρησιακά δεδομένα. Έτσι θα υπάρχει μεγαλύτερο δείγμα σημείων στα παραγόμενα διαγράμματα και θα μπορέσουν να μειωθούν τα σφάλματα. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία αναζητούνται παγωμένοι δακτύλιοι, όπως αυτοί που συναντώνται στο Ηλιακό Σύστημα. Συνεπώς, οι υποψήφιοι για φιλοξενία δακτυλίων πλανήτες είναι μακροπερίοδοι με μεγάλο ημιάξονα τροχιάς της τάξης του $\geq 1.4 AU$. Το γεγονός αυτό όμως, αποτελεί περιορισμό για τα σημερινά δεδομένα. Τέτοιου είδους πλανήτες είχαν μόνο μία ή δύο παρατηρήσιμες διαβάσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας του διαστημικού τηλεσκοπίου Kepler και ως εκ τούτου, τα διαθέσιμα παρατηρησιακά δεδομένα είναι περιορισμένα. Σαν αποτέλεσμα, με βάση τα δεδομένα αυτά και την εφαρμογή μοντέλων

σε αυτά, δεν μπορεί να ταυτοποιηθεί η ύπαρξη ενός συστήματος δακτυλίων. Μπορούν μόνο να εντοπιστούν ενδείξεις ύπαρξης δακτυλίων, οι οποίες θα αποτελέσουν αφορμή για περαιτέρω παρατήρηση των συγκεκριμένων πλανητών.

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη

7.1 Ανακεφαλαίωση - Συγκέντρωση ευρημάτων

Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία ουράνιων αντικειμένων τα οποία αναφέρθηκαν και στο θεωρητικό τμήμα της παρούσας εργασίας και μελετήθηκαν στο υπολογιστικό τμήμα, είναι αυτά τα οποία ονομάζονται «super-puffs». Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των super-puff αντικειμένων είναι οι εξαιρετικά χαμηλές πυκνότητες που παρουσιάζουν και οι οποίες είναι της τάξης του 0.1 gr/cm^3 . Η σύσταση των αντικειμένων αυτών αποτελείται κυρίως από αέριο υδρογόνο και ήλιο, όπως και οι γίγαντες πλανήτες του δικού μας ηλιακού συστήματος. Για παράδειγμα, ο Κρόνος έχει πυκνότητα 0.7 gr/cm^3 , αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των super-puff αντικειμένων. Υπάρχουν τρία σενάρια που επιχειρούν να δώσουν μια ερμηνεία για αυτές τις μη αναμενόμενες τιμές πυκνοτήτων.

Μια ερμηνεία που μπορεί να δοθεί, είναι ότι κάποιοι από τους πλανήτες, εάν βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις από τον μητρικό τους αστέρα, είναι πιθανό να θερμάνθηκαν αρκετά και οι ατμόσφαιρές τους να υπέστησαν διαστολή και να επεκτάθηκαν ακτινικά. Η εκδοχή αυτή όμως, μάλλον δεν ευσταθεί, αφού οι πλανήτες θα έχαναν σταδιακά την ατμόσφαιρά τους – και αυτή είναι μια αργή διαδικασία. Πράγμα που σημαίνει ότι θα ήταν δυνατό να παρατηρηθεί η διαδικασία αυτή όχι μόνο στην αρχή ή στο τέλος της, αλλά και σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο. Εάν όμως ο υπό μελέτη πλανήτης βρίσκεται μακριά από τον μητρικό του αστέρα και συνεπώς, εκεί δεν επικρατούν συνθήκες αρκετά υψηλών θερμοκρασιών ώστε να διασταλεί η ατμόσφαιρα του πλανήτη αυτού, κάποια άλλη εξήγηση θα πρέπει να δοθεί.

Αν παρ' όλα αυτά κανείς επιμένει στο σενάριο ενός ασυνήθιστου πλανήτη με «φουσκωμένη» ατμόσφαιρα, θα πρέπει να φανταστεί την ατμόσφαιρα αυτή εξαιρετικά λεπτή. Είναι λογικό όμως, μια τέτοια ατμόσφαιρα να μην είναι αρκετά αδιαφανής και τότε, θα υπάρχει ασυμφωνία με την παρατήρηση του ποσοστού του αστρικού φωτός που αποκόπτει ο πλανήτης κατά τη διάβασή του. Κάποια άλλη διαδικασία θα πρέπει να αυξάνει την αδιαφάνεια. Ίσως υπάρχει κάποιος μηχανισμός που στέλνει σωματίδια σκόνης από το έδαφος του πλανήτη (αν αυτός διαθέτει) στην ατμόσφαιρά του και έτσι να αυξάνεται η αδιαφάνεια. Δεν πρέπει να αγνοηθεί όμως το γεγονός ότι η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, αφού η παρατηρούμενη ακτίνα του πλανήτη παραμένει μεγάλη. Ο παραπάνω συλλογισμός καθιστά το σενάριο συνήθους σφαιρικού πλανήτη αρκετά απίθανο.

Το δεύτερο σενάριο που προσπαθεί να δώσει απάντηση στο πρόβλημα των πυκνοτήτων, υποστηρίζει ότι υπεισέρχονται μεγάλες τιμές σφαλμάτων στις μετρήσεις των ακτίνων και μαζών των πλανητών, κάτι που επηρεάζει τον υπολογισμό των πυκνοτήτων. Όσον αφορά τον υπολογισμό των ακτίνων, αυτός πραγματοποιείται μέσω φωτομετρίας κατά τη διάβασή του πλανήτη μπροστά από τον δίσκο του μητρικού του αστέρα. Τα μεγάλα σφάλματα είναι λογικά, διότι η μεγάλη τροχιακή περίοδός τους έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχουν παρατηρησιακά δεδομένα

μόνο για μία ή δύο διαβάσεις των πλανητών, όπως στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Σχετικά με τη μάζα, στην περίπτωση εξωπλανητών, αυτή υπολογίζεται μέσω των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων του πλανήτη με τον μητρικό του αστέρα. Σίγουρα, και στις δύο αυτές μετρήσεις, υπάρχουν σφάλματα τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε υποτίμηση της πυκνότητας του αντικειμένου.

Το τρίτο σενάριο ερμηνεύει τις παρατηρούμενες πυκνότητες ως εξής: πρόκειται για μικρότερης ακτίνας πλανήτη με δακτυλίους να τον περιβάλλουν. Για να αποδώσει το σενάριο των δακτυλίων, θα πρέπει αυτοί να βρίσκονται σε επίπεδο διαφορετικό από αυτό της τροχιάς του πλανήτη. Αλλά, δεν αρκεί αυτό. Θα πρέπει τα χάσματα μεταξύ πλανήτη και δακτυλίου αλλά και μεταξύ των δακτυλίων να είναι προσανατολισμένα με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπουν στο φως του αστέρα κάποιες στιγμές να διέρχεται διαμέσου αυτών. Αυτό θα παρατηρηθεί μέσω φωτομετρίας ως αυξομειώσεις της σχετικής ροής στην καμπύλη φωτός. Όμως, και πάλι, για να παρατηρηθεί κάτι τέτοιο, θα πρέπει όχι μόνο οι δακτύλιοι να είναι αρκετά πυκνοί -ώστε να είναι ισχυρό το αποτύπωμά τους- αλλά και να υπάρχουν δεδομένα για πολλές παρατηρήσιμες διαβάσεις. Πράγμα που μέχρι σήμερα, δεν ισχύει. Το θετικό της ερμηνείας που δίνουν οι δακτύλιοι είναι η πιο λογική τιμή της ακτίνας του πλανήτη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθήθηκε το τρίτο από τα παραπάνω σενάρια, αυτό της ύπαρξης δακτυλίων. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι μακροπερίοδοι πλανήτες KIC 7619236, KIC 8505215, KIC 3962440, KIC 9214713, KIC 3230491, KIC 10460629, KIC 3239945, KIC 11342550, KIC 12356617. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φωτομετρίας διαβάσεων. Εξήχθησαν οι σχετικές καμπύλες φωτός πάνω στις οποίες εφαρμόστηκαν θεωρητικά μοντέλα για πλανήτη με/χωρίς δακτύλιο.

Συνολικά, από τους πλανήτες που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή, το πάχος του δακτυλίου που υποθετικά διαθέτει ο υπό μελέτη πλανήτης που περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 3230491 είναι συγκρίσιμο με το πάχος των δακτυλίων του Ουρανού. Επίσης, το πάχος των δακτυλίων που δυνητικά διαθέτει ο πλανήτης που μελετήθηκε και περιφέρεται γύρω από τον αστέρα KIC 9214713 όπως υπολογίστηκε είναι της τάξης του πάχους των δακτυλίων του Ποσειδώνα. Θα έλεγε λοιπόν κανείς, ότι οι συγκεκριμένοι πλανήτες χρήζουν μελλοντικών παρατηρήσεων. Όμως, το ενδεχόμενο φιλοξενίας δακτυλίων θα πρέπει μάλλον να αποκλειστεί στις περιπτώσεις των KIC 7619236, KIC 8505215, KIC 3962440, KIC 10460629, KIC 3239945, KIC 11342550, KIC 12356617 αφού ακόμη και η εφαρμογή μοντέλου με δακτύλιο έδωσε σαν αποτέλεσμα πολύ μικρό πάχος δακτυλίων, μη συγκρίσιμο με τα αντίστοιχα μεγέθη του ηλιακού συστήματος. Δηλαδή, οι πλανήτες αυτοί ανήκουν στην κατηγορία 3 όπως αυτή ορίστηκε στο κεφάλαιο 4, της οποίας κατηγορίας ανάλογο δεν υπάρχει στο Ηλιακό Σύστημα. Παρ' όλα αυτά, το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων δεν είναι επαρκές ώστε να εξαχθεί σίγουρο συμπέρασμα. Ενδείξεις όπως μεγάλο βάθος διάβασης ή ασυμμετρία στην καμπύλη φωτός ή ακόμη και η καλή προσαρμογή ενός θεωρητικού μοντέλου με δακτυλίους πάνω στα δεδομένα, δεν αρκούν ώστε να ταυτοποιηθεί η ύπαρξη δακτυλίων. Αποτελούν απλώς αφορμή για πρόσθετες μελλοντικές μελέτες και παρατηρήσεις των συγκεκριμένων πλανητών. Παρακάτω, παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 7.1 – Συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των *best-fit parameters* για τους πλανήτες που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

| planet | Ringed model | | | | | Non-Ringed model | | |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| | $R_p[R_J]$ | $R_s[R_\odot]$ | $R_{in}[R_J]$ | $R_{out}[R_J]$ | χ^2 | $R_p[R_J]$ | $R_s[R_\odot]$ | χ^2 |
| KIC 7619236 | 0.713 ± 0.037 | 0.914 ± 0.002 | 1.085 ± 0.365 | 1.116 ± 0.336 | 2.552×10^{-6} | 0.684 ± 0.003 | 0.913 ± 0.002 | 2.575×10^{-6} |
| KIC 8505215 | 0.343 ± 0.025 | 0.906 ± 0.003 | 1.059 ± 0.516 | 1.074 ± 0.501 | 7.142×10^{-7} | 0.371 ± 0.002 | 0.906 ± 0.003 | 7.335×10^{-7} |
| KIC 3962440 | 0.283 ± 0.021 | 0.559 ± 0.004 | 1.016 ± 0.367 | 1.024 ± 0.367 | 3.329×10^{-6} | 0.301 ± 0.003 | 0.559 ± 0.003 | 3.360×10^{-6} |
| KIC 9214713 | 0.777 ± 0.078 | 0.547 ± 0.002 | 0.473 ± 0.108 | 0.665 ± 0.199 | 1.088×10^{-5} | 0.681 ± 0.002 | 0.547 ± 0.001 | 1.125×10^{-5} |
| KIC 3230491 | 0.190 ± 0.082 | 0.484 ± 0.009 | 0.289 ± 0.136 | 0.739 ± 0.072 | 9.008×10^{-6} | 0.507 ± 0.007 | 0.501 ± 0.002 | 9.385×10^{-6} |
| KIC 10460629 | 0.222 ± 0.089 | 1.303 ± 0.020 | 2.156 ± 0.501 | 2.176 ± 0.492 | 4.379×10^{-6} | 0.322 ± 0.009 | 1.316 ± 0.017 | 4.449×10^{-6} |
| KIC 3239945 | 0.825 ± 0.078 | 0.699 ± 0.001 | 0.966 ± 0.422 | 1.002 ± 0.331 | 0.004 | 0.852 ± 0.001 | 0.699 ± 0.001 | 0.004 |
| KIC 11342550 | 0.996 ± 0.099 | 1.079 ± 0.005 | 1.622 ± 0.856 | 1.692 ± 0.756 | 4.68×10^{-5} | 0.920 ± 0.006 | 1.078 ± 0.005 | 4.707×10^{-5} |
| KIC 12356617 | 0.313 ± 0.007 | 0.438 ± 0.002 | 1.920 ± 0.589 | 1.926 ± 0.587 | 2.249×10^{-6} | 0.300 ± 0.002 | 0.436 ± 0.002 | 2.397×10^{-6} |

7.2 Συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Στο Ηλιακό Σύστημα οι πλανητικοί δακτύλιοι φαίνεται να είναι συχνό χαρακτηριστικό των ουράνιων σωμάτων. Όλοι οι εξωτερικοί πλανήτες φιλοξενούν σύστημα περισσότερο ή λιγότερο αμυδρών δακτυλίων. Δακτύλιοι υπάρχουν ακόμη και γύρω από αστεροειδείς (π.χ. Χαρικλώ) αλλά και γύρω από νάνους πλανήτες (π.χ. Haumea). Η ανακάλυψη δακτυλίων όμως γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες αποτελεί μια πρόκληση σήμερα. Σύμφωνα με τους Barnes & Fortney (2004) [5], Ohta et al (2009) [16], Zuluaga (2015) [22] και Akinsanmi et al (2018) [4] αναμένεται το σήμα που προκαλεί η παρουσία δακτυλίων γύρω από έναν εξωπλανήτη να είναι ανιχνεύσιμο μέσω φωτομετρίας ή/και φασματοσκοπίας. Στο παρελθόν έχουν προηγηθεί μελέτες που αναζητούσαν μέσω φωτομετρίας διαβάσεων δακτυλίου σε τροχιά γύρω από εξωπλανήτες. Σε κάποιες περιπτώσεις οι μελέτες αυτές απλώς έθεσαν περιορισμούς στις παραμέτρους των δακτυλίων (π.χ. Aizawa et al (2017), (2018) [2], [3]), ενώ σε μία μόνο περίπτωση ταυτοποιήθηκε η ύπαρξη δακτυλίου (Kenworthy & Mamajek (2015) [13]).

Αντίστοιχης λογικής αναζήτηση πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, επιλέχθηκε σύνολο πλανητών σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1 (π.χ. μεγάλη τροχιακή περίοδος, ασυνήθιστα μικρή πλανητική πυκνότητα, ασύμμετρη καμπύλη φωτός κ.α.). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο των Ohta et al (2009) [16], συντάχθηκε νέος κώδικας σε γλώσσα Python με τελικό σκοπό την εφαρμογή του μοντέλου αυτού σε παρατηρησιακά δεδομένα. Ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο αρχείο με τα παρατηρησιακά δεδομένα, επιλέγει από αυτά μόνο όσα αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές γύρω από τη διάβαση του υπό μελέτη πλανήτη, εκτελεί τη διαδικασία του detrending, μετατρέπει τον χρόνο σε φάση και υπολογίζει τις τιμές της αστρικής ροής με βάση τα μοντέλα, τα οποία στη συνέχεια προσαρμόζει στα δεδομένα. Τέλος, ο κώδικας πραγματοποιεί τον υπολογισμό των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις εξισώσεις, καθώς και τα σφάλματά τους (βλ. κεφάλαιο 5).

Στην προκειμένη περίπτωση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ληφθεί από το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler. Πριν όμως την εφαρμογή των μοντέλων στα δεδομένα, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση. Παρήχθησαν τεχνητά δεδομένα με χρήση της εξίσωσης 4.8 για δεδομένη ακτίνα πλανήτη και αστέρα και δεδομένη εσωτερη και εξωτερη ακτίνα δακτυλίων. Κάνοντας προσαρμογή των μοντέλων με/χωρίς δακτύλιο στα τεχνητά δεδομένα, υπολογίστηκαν οι παράμετροι που υπεισέρχονται στις εξισώσεις καθώς και τα σφάλματα αυτών. Με βάση τους υπολογισμούς και συγκεκριμένα με βάση τον λόγο $\Delta r/R_p$, ορίστηκαν τρεις κατηγορίες εξωπλανητών που δυνητικά φιλοξενούν σύστημα δακτυλίων. Στην κατηγορία 1 ανήκουν πλανήτες με $\Delta r/R_p \sim 10^0$ (όπως οι πλανήτες Δίας, Κρόνος, Ουρανός). Στην κατηγορία 2 ανήκουν πλανήτες με $\Delta r/R_p \sim 10^{-1}$ (όπως ο πλανήτης Ποσειδώνας). Τέλος, στην κατηγορία 3 ανήκουν πλανήτες με $\Delta r/R_p \sim 10^{-2}$, που ανάλογό τους δεν έχει παρατηρηθεί στο Ηλιακό Σύστημα. Επίσης, υποθέτοντας ότι η διάβαση του Κρόνου μπροστά από τον ηλιακό δίσκο μπορεί να παρατηρηθεί, εξετάστηκε το παραγόμενο σήμα της διάβασης αυτής. Εφαρμόστηκαν τα θεωρητικά μοντέλα, και από τους υπολογισμούς προέκυψε ότι οι μετρούμενες τιμές των παραμέτρων είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές των αντίστοιχων μεγεθών.

Σε επόμενο στάδιο, με τη χρήση του κώδικα που συντάχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εφαρμόστηκε στα δεδομένα μοντέλο με δακτύλιο και χωρίς δακτύλιο και υπολογίστηκαν οι παράμετροι των διαφόρων συστημάτων, θέτοντας περιορισμούς στις παραμέτρους των δυνητικών δακτυλίων. Με βάση τους υπολογισμούς των παραμέτρων αυτών, μπορούν να εντοπιστούν ενδείξεις ύπαρξης δακτυλίων, να καταταχθούν οι πλανήτες σε μια από τις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν νωρίτερα, και συνεπώς να εξαχθεί συμπέρασμα για το αν ένας πλανήτης αποτελεί κατάλληλο στόχο για μελλοντικές παρατηρήσεις που σκοπό έχουν την ανίχνευση εξωδακτυλίων.

7.3 Περιορισμοί στον εντοπισμό εξωδακτυλίων

Η διαδικασία εφαρμογής μοντέλων σε παρατηρησιακά δεδομένα όπως αυτή που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, βασίζεται σε κάποιες παραδοχές (βλ. κεφάλαιο 4) και συναντά κάποιους περιορισμούς.

Ένας πρώτος περιορισμός στην αναζήτηση εξωδακτυλίων είναι ότι αυτοί αναζητούνται κυρίως γύρω από μακροπερίόδους πλανήτες. Στο Ηλιακό Σύστημα, ο Κρόνος έχει περίοδο $29 \text{ yrs} \simeq 11000 \text{ days}$ και ο Δίας $12 \text{ yrs} \simeq 4380 \text{ days}$. Όμως, οι μέχρι τώρα παρατηρήσεις δεν εντοπίζουν ή αγνοούν τους πλανήτες με περίοδο $> 1000 \text{ days}$, διότι για να εντοπιστεί και να ταυτοποιηθεί ένας πλανήτης από τον χρησιμοποιούμενο αυτοματοποιημένο αλγόριθμο Transit Planet Search του τηλεσκοπίου Kepler χρειάζονται τουλάχιστον τρεις διαβάσεις. Συνεπώς, η πλειοψηφία των μέχρι τώρα επιβεβαιωμένων πλανητών έχει περιόδους μικρότερες των 1000 days . Η δυσκολία στην συστηματική αναζήτηση single-transit-events είναι ότι η πιθανότητα διάβασης είναι ανάλογη της περιόδου του πλανήτη ως $\sim P^{-5/3}$ και άρα, για τους μακροπερίόδους πλανήτες είναι μικρή. Βέβαια, η τροχιακή περίοδος που υπολογίζεται έχοντας παρατηρήσιμη μόνο μια διάβαση, συνοδεύεται με μεγάλη αβεβαιότητα (της τάξης των εκατοντάδων ημερών). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εξάρτησης της διάρκειας διάβασης από την τροχιακή περίοδο ως $\sim P^{1/3}$. Ως αποτέλεσμα, η αβεβαιότητα στην περίοδο για ένα σύστημα με μια μόνο παρατηρήσιμη διάβαση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή σε συστήματα με περισσότερες παρατηρήσιμες διαβάσεις.

Η αναζήτηση δακτυλίων γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες όμως, δεν περιορίζεται μόνο στους μακροπερίόδους πλανήτες. Είναι πιθανό, πλανήτες που βρίσκονται εγγύτερα προς τον μητρικό τους αστέρα να φιλοξενούν σύστημα βραχυδών και όχι παγωμένων δακτυλίων. Εφόσον όμως, συνήθως οι δακτύλιοι κείνται στο επίπεδο του ισημερινού του πλανήτη, η ακρίβεια που απαιτείται να έχει μια φωτομετρική ή φασματοσκοπική μέθοδος στον εντοπισμό εξωδακτυλίων, εξαρτάται από την γωνία λόξωσης του πλανήτη. Η γωνία λόξωσης (obliquity) είναι η γωνία μεταξύ του άξονα περιστροφής του πλανήτη και της καθέτου στο επίπεδο της τροχιάς του. Συνεπώς, ένα εμπόδιο στην προσπάθεια ανίχνευσης εξωδακτυλίων είναι η μικρή γωνία λόξωσης που χαρακτηρίζει τους εγγύτερους προς το μητρικό τους αστέρα πλανήτες. Επίσης, σύμφωνα με τους Schlichting et al (2011) [18] οι γωνίες λόξωσης των τελευταίων, με μάζες συγκρίσιμες ή μεγαλύτερες αυτής του Ποσειδώνα, είναι πιθανό να έχουν μεγάλες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι, τέτοιοι πλανήτες θεωρητικά, έχουν σχηματιστεί σε μεγάλες αποστάσεις από τον μητρικό τους αστέρα και έχουν φτάσει στις κοντινές αποστάσεις όπου παρατηρούνται, εξαιτίας κάποιου μηχανισμού (π.χ. συγκρούσεις μεταξύ πλανητών, πλανητική μετανάστευση).

Επίσης, οι εξωπλανήτες με μάζα συγκρίσιμη με αυτή του Ποσειδώνα ή και μεγαλύτερη, και οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιές μικρής περιόδου, εάν διέθεταν εξ αρχής δακτυλίους πάγου, αυτοί θα πρέπει να εξαχνώθηκαν κατά την προσέγγιση του πλανήτη σε εγγύτερες προς τον μητρικό αστέρα αποστάσεις και στην τελικώς παρατηρούμενη θέση του. Αυτό σημαίνει, ότι εάν εντοπιστούν εξωδακτύλιοι σε αυτές τις κοντινές αποστάσεις, αυτοί πιθανώς έχουν σχηματιστεί κοντά στην τρέχουσα τροχιά του πλανήτη. Αυτή η μελέτη μπορεί να δώσει εξηγήσεις και να τροποποιήσει τα μοντέλα δημιουργίας δακτυλίων στα πλανητικά συστήματα.

Ένα ακόμα εμπόδιο στον εντοπισμό εξωδακτυλίων αποτελεί η κλίση του τροχιακού επιπέδου, αλλά και η κλίση του επιπέδου των δακτυλίων - εάν αυτοί υπάρχουν. Συγκεκριμένα, για να παρατηρηθεί η διάβαση του πλανήτη μπροστά από τον μητρικό του αστέρα θα πρέπει η κλίση του τροχιακού επιπέδου να είναι κοντά στις 90° (edge - on transit). Ακόμη, εάν υπάρχει δακτύλιος για να είναι ισχυρό το αποτύπωμά του και άρα, για να ανιχνευθεί, θα πρέπει η γωνία λόξωσης που τον χαρακτηρίζει να είναι κοντά στις 90° , ενώ η αζιμουθιακή του γωνία (βλ. σχήμα 4.5) να είναι σχεδόν μηδενική (face - on ring, κατά τους Ohta et al 2009 [16]).

Τέλος, περιορισμό αποτελεί και η απόσταση μεταξύ παρατηρούμενου συστήματος αστέρα - πλανήτη - δακτυλίων και τηλεσκοπίου, εφόσον αυτό που παρατηρείται δεν είναι άμεσα ο δακτύλιος, αλλά ο μητρικός αστέρας, του οποίου μετράται από τους διάφορους ανιχνευτές η φωτεινή ροή. Όσο πιο μακριά βρίσκεται το υπό παρατήρηση σύστημα, τόσο αμυδρότερο θα είναι το φως που λαμβάνει το τηλεσκόπιο. Αυτό συμβαίνει γιατί ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου: η ροή ακτινοβολίας μιας πηγής είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή (η ίδια ισχύς κατανέμεται σε ολοένα και μεγαλύτερες επιφάνειες αυξανόμενης της απόστασης). Με άλλα λόγια, σύμφωνα με τα παραπάνω και εξαιτίας της παρουσίας της μεσοαστρικής ύλης που προκαλεί απορρόφηση του φωτός, όσο πιο μεγάλη η απόσταση παρατηρούμενου αντικειμένου και τηλεσκοπίου, τόσο μικρότερος θα είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio) και συνεπώς, θα καθίσταται δυσκολότερη η ανίχνευση σήματος που να οφείλεται σε τυχόν υπάρχοντες δακτυλίους.

7.4 Μελλοντικές μελέτες

Για να διαλευκανθούν τέτοιου είδους ζητήματα, όπως η ύπαρξη δακτυλίων γύρω από εξωηλιακούς πλανήτες, απαραίτητες είναι περαιτέρω παρατηρήσεις των αντικειμένων αυτών. Σύμφωνα με τους Barnes and Fortney (2004) [5], δακτύλιοι που μοιάζουν με αυτούς του Κρόνου είναι δυνατόν να ανιχνευθούν αν η φωτομετρική ακρίβεια είναι της τάξης 10^{-4} και αν επιπλέον, οι παρατηρήσεις λαμβάνονται με συχνότητα 1/15 min. Τα μεγέθη αυτά, χαρακτηρίζουν και τις παρατηρήσεις του διαστημικού τηλεσκοπίου Kepler. Συνεπώς, ο εντοπισμός παγωμένων δακτυλίων -όπως του Κρόνου- εφόσον αυτοί υπάρχουν γύρω από τους υποψήφιους εξωπλανήτες, θα πρέπει να είναι εφικτός. Βέβαια, η αναζήτηση τους γίνεται γύρω από πλανήτες με μεγάλες τροχιακές περιόδους, ώστε η θερμοκρασία να ευνοεί την διατήρησή τους. Αυτό όμως σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια του τηλεσκοπίου Kepler ελήφθησαν δεδομένα μόνο για μία ή δύο διαβάσεις των πλανητών που τους φιλοξενεί. Συνολικά, η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων είναι ικανοποιητική, όχι όμως το πλήθος τους.

Μελλοντικά, στην ταυτοποίηση των εξωδακτυλίων και στη μελέτη της φύσης τους, μπορούν να συμβάλλουν φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, αφού η διαπερατότητά τους εξαρτάται από τη σύσταση και την πυκνότητά τους και συνεπώς, αναμένεται να μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος κύματος παρατήρησης. Ακόμη, οι παρατηρήσεις θα μπορούσαν επίσης να εστιαστούν στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Σε αυτά τα μήκη κύματος, οι δακτύλιοι αναμένεται να είναι οπτικά αραίοι και τότε, η παρατηρούμενη καμπύλη φωτός θα παρουσιάζει πολύ πιο ασθενή βύθιση σε σχέση με αυτή που παρουσιάζει σε άλλα μήκη κύματος. Έτσι, παρατηρώντας τον συγκεκριμένο πλανήτη στο υπέρυθρο και σε κάποιο άλλο τμήμα του φάσματος (π.χ. ορατό, όπως οι παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου Kepler) θα καταστεί δυνατός ο εντοπισμός της διαφωνίας των δύο καμπυλών φωτός. Αυτή που θα αντιστοιχεί στο υπέρυθρο θα παρουσιάζει μικρότερη βύθιση -αφού σε τέτοια μήκη κύματος οι δακτύλιοι είναι διαφανείς. Αντιθέτως, αυτή που θα αντιστοιχεί σε ορατά μήκη κύματος θα παρουσιάζει ισχυρότερη βύθιση καθώς εκτός από τον πλανήτη, θα αποκόπτει ποσοστό του αστρικού φωτός και το σύστημα δακτυλίων. Τέτοιου είδους παρατηρήσεις, στο υπέρυθρο, πρόκειται να πραγματοποιήσει το James Webb Space Telescope (JWST), το οποίο αναμένεται να εκτοξευθεί το 2021. Το τηλεσκόπιο αυτό, λοιπόν, θα δράσει με συμπληρωματικές παρατηρήσεις σε αυτές του τηλεσκοπίου Kepler, αλλά και σε αυτές που θα πραγματοποιούν τα επίγεια τηλεσκόπια νέας γενιάς (διαμέτρου 30 m και πλέον). Αυτό, διότι στο τμήμα του φάσματος στο οποίο θα έχει μέγιστη ευαισθησία και στο οποίο θα λαμβάνει παρατηρήσεις το JWST η ευαισθησία των επίγειων τηλεσκοπίων περιορίζεται σημαντικά εξαιτίας θερμικών εκπομπών από την ατμόσφαιρα. Το τμήμα του φάσματος που αναφέρθηκε, εντοπίζεται μεταξύ 0.6 – 28.3 μm .

Όσον αφορά τις επίγειες παρατηρήσεις, αυτές θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με όρ-

γανα όπως για παράδειγμα τα τηλεσκόπια MINERVA (Miniature Exoplanet Radial Velocity Array) στην Αριζόνα. Πρόκειται για δίκτυο ρομποτικών τηλεσκοπίων που πραγματοποιούν παρατηρήσεις πλανητών και των μητρικών τους αστέρων χρησιμοποιώντας τη φωτομετρική μέθοδο των διαβάσεων και την φασματοσκοπική μέθοδο των ακτινικών ταχυτήτων. Στην πραγματικότητα, οι παρατηρήσεις αυτές είναι συμπληρωματικές των παρατηρήσεων των τηλεσκοπίων Kepler και TESS. Ακόμη, επίγειες παρατηρήσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και από το φασματοσκόπιο Keck Planet Finder (KPF) των αστεροσκοπειών Keck, στη Χαβάη. Το όργανο KPF αναμένεται να υπερέχει του τηλεσκοπίου Kepler ως προς τη φωτομετρική του ακρίβεια και θα τεθεί σε λειτουργία το 2022. Μέσω των παρατηρήσεων που θα λαμβάνει θα δίνει πληροφορίες για τα φυσικά και τροχιακά χαρακτηριστικά πολυάριθμων πλανητών των οποίων η ύπαρξη έχει επιβεβαιωθεί μέσω των παρατηρήσεων του τηλεσκοπίου Kepler. Τέτοιοι πλανήτες μπορεί να είναι super-Earths, mini-Neptunes και hot-Jupiters.

Κλείνοντας, η ανακάλυψη και μελέτη των εξωδακτυλίων, αποτελεί ενδιαφέρον πεδίο έρευνας, καθώς θα μπορούσε να δώσει πληροφορίες για ενδιαφέρουσες πλανητικές διαδικασίες, όπως επί παραδείγματι ο σχηματισμός των πλανητών και των δορυφόρων τους, αλλά και πληροφορίες για τη δομή του εσωτερικού των αντικειμένων αυτών.

Κώδικας

```
1
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5 from scipy.optimize import fsolve, curve_fit
6
7 period=1071.232624 # [days]
8 first_transit=420.286557 #transit epoch [BKJD]
9 second_transit=first_transit+period
10 a=1.86 # [AU]
11 orb_inclination=89.997*np.pi/180
12 Ms=0.776*(1.9891*10**(33)) #stellar mass [gr]
13 u1=0.627 #limb darkening
14 u2=0.1082 #coefficients
15 arg_of_periastron=0*np.pi/180 #argument
16 #of periastron
17 e=0*np.pi/180 #eccentricity
18 G= 1.4881861362557486e-37 # [AU/gr/days^2]
19 AU=149597871 #1AU=149597871 km
20 RJ=69911 # [km]
21 RSUN=696340 # [km]
22 name="KIC 3239945 e"
23
24
25 dataOT = pd.read_csv("KIC3239945e.csv", sep=';')
26 #-----#
27 #Calculating phase
28 transit_epoch=first_transit # [BKJD]
29
30 dataOT['phase']=pd.Series([])
31 for i in range(len(dataOT['time'])):
32     dataOT['phase'][i]=(dataOT['time'][i]-transit_epoch)/period -(dataOT['
33     time'][i]-transit_epoch)//period
34     if dataOT['phase'][i]>0.5:
35         dataOT['phase'][i]=dataOT['phase'][i]-1
36     else:
37         dataOT['phase'][i]=dataOT['phase'][i]
38 #-----#
39 def planetary_position(t):
40     if arg_of_periastron<np.pi/2:
41         f_frst_trnst=np.pi/2-arg_of_periastron #true anomaly for the
42         time of first_transit
43     else:
44         f_frst_trnst=5*np.pi/2-arg_of_periastron
45     #eccentric anomaly for the time of first transit
```

```

46 E_frst_trnst=2*np.arctan(np.sqrt((1-e)/(1+e))*np.tan(f_frst_trnst/2))
47
48 if E_frst_trnst<0:
49     E_frst_trnst+=2*np.pi
50
51 #time of periastron passage
52 tp= first_transit-period / (2*np.pi)*(E_frst_trnst-e*np.sin(E_frst_trnst
53 ))
54
55 M = 2 * np.pi / period * (t - tp) #mean anomaly
56 Eold = M
57 flag = False
58 Enew = 0
59 for indicator in range(100): # set arbitrary limit of iterations
60     Enew = Eold - (Eold - e*np.sin(Eold) - M) / (1-e*np.cos(Eold))
61     flag = (np.abs(Enew - Eold) < 10 ** (-7)).all()
62     if flag:
63         break
64     else:
65         Eold = Enew
66
67 f=2*np.arctan(np.sqrt((1+e)/(1-e))*np.tan(Enew/2)) #true anomaly as
a function of t
68
69 r=a*(1-e**2)/(np.ones_like(f)+e*np.cos(f))
70
71 #calculating angular momentum components and longitude of ascending
node
72 L=np.sqrt(G*Ms*a)*np.sqrt(1-e**2)
73 Lz=L*np.cos(orb_inclination)
74
75 #calculating Lx, Ly, Omega by solving the 3x3 system
76 def SolveSystem(q):
77     Lx = q[0]
78     Ly = q[1]
79     Omega = q[2]
80     F = np.empty((3))
81     F[0] = Lx-L*np.sin(Omega)*np.sin(orb_inclination)
82     F[1] = Ly-L*np.cos(Omega)*np.sin(orb_inclination)
83     F[2] = Lx**2+Ly**2+Lz**2-L**2
84     return F
85 qGuess = np.array([1,1,1])
86 q = fsolve(SolveSystem,qGuess)
87 Omega=q[2]
88
89 #coordinates observed from Earth
90 Xp=r*(-np.cos(f+arg_of_periastron)*np.sin(Omega)-np.sin(f+
arg_of_periastron)*np.cos(Omega)*np.cos(orb_inclination))
91 Zp=r*(-np.cos(f+arg_of_periastron)*np.cos(Omega)+np.sin(f+
arg_of_periastron)*np.sin(Omega)*np.cos(orb_inclination))
92 return Xp,Zp
93
94 #-----#
95 def rho(Xp, Zp, Rs): #normalized planetary position
96     return np.sqrt(Xp**2+Zp**2)/Rs
97
98 def h_p(Xp, Zp, Rs):
99     return rho(Xp, Zp, Rs)-1
100
101 def zo(Xp, Zp, gamma, Rs):

```

```

102     return (np.sqrt((gamma**2-h_p(Xp, Zp, Rs)**2)*((h_p(Xp, Zp,Rs)+2)**2-
gamma**2)))/(2*(1+h_p(Xp, Zp,Rs)))
103
104 def zeta(Xp, Zp, gamma, Rs):
105     return (h_p(Xp, Zp,Rs)**2+2*h_p(Xp, Zp, Rs)+gamma**2)/(2*(1+h_p(Xp, Zp,
Rs)))
106
107 def xo(Xp, Zp, gamma, Rs):
108     return 1-(gamma**2-h_p(Xp, Zp, Rs)**2)/(2*(1+h_p(Xp, Zp, Rs)))
109
110 def xc(Xp, Zp, gamma, Rs):
111     return xo(Xp, Zp, gamma, Rs)+0.4*(zeta(Xp, Zp, gamma, Rs)-gamma)
112
113 def gc(Xp, Zp, gamma, Rs):
114     return (1-xc(Xp, Zp, gamma, Rs)**2)*np.arcsin(np.sqrt((gamma**2-(xc(Xp,
Zp, gamma, Rs)-1-h_p(Xp, Zp, Rs))**2)/(1-xc(Xp, Zp, gamma, Rs)**2)))+np.
sqrt( 2*(1+h_p(Xp, Zp, Rs))*(xo(Xp, Zp, gamma, Rs)-xc(Xp, Zp, gamma, Rs))*(
gamma**2-(xc(Xp, Zp, gamma, Rs)-1-h_p(Xp, Zp, Rs))**2))
115
116 def W12(gamma):
117     rho = 1-gamma
118     return (1-rho**2)**(1/2) - gamma**2 * (2-rho**2) / (8*(1-rho**2)
**(3/2))
119
120 def K(gamma):
121     xc0 = 1 - 0.8*gamma
122     hp0 = -gamma
123     x0 = 1- (gamma**2-hp0**2)/(2*(2+hp0))
124     return (1-xc0**2)*np.arcsin(np.sqrt((gamma**2-(xc0-1-hp0)**2)/(1-xc0
**2)))+np.sqrt( 2*(1+hp0)*(x0-xc0)*(gamma**2-(xc0-1-hp0)**2))
125
126 def W3(Xp, Zp, gamma, Rs):
127     return (np.pi/6)*(1-xo(Xp, Zp, gamma, Rs))**2*(2+xo(Xp, Zp, gamma, Rs))
+(np.pi/2)*gamma*(gamma-zeta(Xp, Zp, gamma, Rs))*gc(Xp, Zp, gamma, Rs)/K(
gamma)*W12(gamma)
128
129 def W11(Xp, Zp, gamma, Rs):
130     return np.where((rho(Xp, Zp, Rs)<1-gamma).any(), (1-rho(Xp, Zp, Rs)**2)
**(1/2)-gamma**2*(2-rho(Xp, Zp, Rs)**2)/(8*(1-rho(Xp, Zp, Rs)**2)**(3/2)),
0
)
131
132
133 def A(t, gamma, Rp, Rs, Rin, Rout):
134     Xp, Zp= planetary_position(t)
135     return np.where(rho(Xp, Zp, Rs)<1-gamma,
136         np.pi*gamma**2*(1-u1-u2*(2-rho(Xp, Zp, Rs)**2-gamma**2/2)
+(u1+2*u2)*W11(Xp, Zp, gamma, Rs) ),
137         np.where(np.logical_and( (1-gamma<=rho(Xp, Zp, Rs)), (
rho(Xp, Zp, Rs)<=1+gamma) ),
138         (1-u1-3*u2/2)*(gamma**2*np.arccos(zeta(Xp, Zp, gamma, Rs)/
gamma)+np.arcsin(zo(Xp, Zp, gamma, Rs))-rho(Xp, Zp, Rs)*zo(Xp, Zp, gamma, Rs))
+(u2/2)*rho(Xp, Zp, Rs)*((rho(Xp, Zp, Rs)+2*zeta(Xp, Zp, gamma, Rs))*gamma**2*
np.arccos(zeta(Xp, Zp, gamma, Rs)/gamma)-zo(Xp, Zp, gamma, Rs)*(rho(Xp, Zp, Rs)
*zeta(Xp, Zp, gamma, Rs)+2*gamma**2)) +(u1+2*u2)*W3(Xp, Zp, gamma, Rs)
,
139         0))
140
141 #Ringed Model
142 def Rmodel(t, Rp, Rs, Rin, Rout):
143     tau=1
144     gps=Rp/Rs
145     gis=Rin/Rs

```

```

146     gos=Rout/Rs
147     Agps=A(t, gps, Rp, Rs, Rin, Rout)
148     Agos=A(t, gos, Rp, Rs, Rin, Rout)
149     Agis=A(t, gis, Rp, Rs, Rin, Rout)
150     return (np.pi*(1-u1/3-u2/6)-Agps-(1-np.exp(-tau))*(Agos-Agis))/(np.pi
        *(1-u1/3-u2/6))
151
152 #Non-Ringed Model
153 def NRmodel(t, Rp, Rs):
154     Rin=Rp
155     Rout=Rp
156     tau=0
157     gps=Rp/Rs
158     gis=Rin/Rs
159     gos=Rout/Rs
160     Agps=A(t, gps, Rp, Rs, Rin, Rout)
161     Agos=A(t, gos, Rp, Rs, Rin, Rout)
162     Agis=A(t, gis, Rp, Rs, Rin, Rout)
163     return (np.pi*(1-u1/3-u2/6)-Agps-(1-np.exp(-tau))*(Agos-Agis))/(np.pi
        *(1-u1/3-u2/6))
164 #-----#
165 #-----Fitting-----#
166 t=dataOT['time']
167 y=dataOT['flux']
168
169 #Ringed model Fitting
170 p0=[0.00033900257 , 0.00325669 , 0.000431093318 , 0.000478857]
171
172 popt, pcov = curve_fit(Rmodel, t, y, p0, bounds=((0, 0, 0, 0)
        ,(0.0009,0.009,0.0009,0.001)), maxfev=1000)
173 errors=np.sqrt(np.diag(pcov))
174
175
176 poptNEW=[popt[0]*AU/RJ, popt[1]*AU/RSUN, popt[2]*AU/RJ, popt[3]*AU/RJ]
177 errorsNEW=[errors[0]*AU/RJ, errors[1]*AU/RSUN, errors[2]*AU/RJ, errors[3]*
        AU/RJ]
178
179 chi_sqr_R=sum((y-Rmodel(t,*popt))**2)
180 #-----#
181 #Non-ringed model Fitting
182 p00=[0.00032900257 , 0.00325669]
183
184 poptt, pcovv = curve_fit(NRmodel, t, y, p00, bounds=((0, 0),(0.1,0.1)),
        maxfev=1000)
185 err=np.sqrt(np.diag(pcovv))
186
187 chi_sqr_NR=sum((y-NRmodel(t,*poptt))**2)
188 #-----#
189 dif=NRmodel(t,*poptt)-Rmodel(t,*popt)

```

Βιβλιογραφία

- [1] Adams, E. R., Seager, S., & Elkins-Tanton, L. (2008). Ocean planet or thick atmosphere: on the mass-radius relationship for solid exoplanets with massive atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 673(2), 1160.
- [2] Aizawa, M., Uehara, S., Masuda, K., Kawahara, H., & Suto, Y. (2017). Toward Detection of Exoplanetary Rings via Transit Photometry: Methodology and a Possible Candidate. *The Astronomical Journal*, 153(4), 193.
- [3] Aizawa, M., Masuda, K., Kawahara, H., & Suto, Y. (2018). Systematic Search for Rings around Kepler Planet Candidates: Constraints on Ring Size and Occurrence Rate. *The Astronomical Journal*, 155(5), 206.
- [4] Akinsanmi, B., Santos, N. C., Faria, J. P., Oshagh, M., Barros, S. C. C., Santerne, A., & Charnoz, S. (2020). Can planetary rings explain the extremely low density of HIP 41378 *f*?. *Astronomy & Astrophysics*, 635, L8.
- [5] Barnes, J. W., & Fortney, J. J. (2004). Transit detectability of ring systems around extrasolar giant planets. *The Astrophysical Journal*, 616(2), 1193.
- [6] Charnoz, S., Canup, R. M., Crida, A., & Dones, L. (2017). The origin of planetary ring systems. *arXiv preprint arXiv:1703.09741*.
- [7] Čuk, M., Dones, L., & Nesvorný, D. (2016). Dynamical evidence for a late formation of Saturn's moons. *The Astrophysical Journal*, 820(2), 97.
- [8] Daisaka, H., Tanaka, H., & Ida, S. (2001). Viscosity in a dense planetary ring with self-gravitating particles. *Icarus*, 154(2), 296-312.
- [9] Dyudina, U. A., Sackett, P. D., Bayliss, D. D., Seager, S., Porco, C. C., Throop, H. B., & Dones, L. (2005). Phase light curves for extrasolar Jupiters and Saturns. *The Astrophysical Journal*, 618(2), 973.
- [10] Foreman-Mackey, D., Morton, T. D., Hogg, D. W., Agol, E., & Schölkopf, B. (2016). The population of long-period transiting exoplanets. *The Astronomical Journal*,

152(6), 206.

- [11] Hedman, M. M. (2018). An Introduction to Planetary Ring Dynamics. *Planetary Ring Systems. Properties, Structure, and Evolution*, 30-48.
- [12] Heising, M. Z., Marcy, G. W., & Schlichting, H. E. (2015). A Search for Ringed Exoplanets Using Kepler Photometry. *The Astrophysical Journal*, 814(1), 81.
- [13] Kenworthy, M. A., & Mamajek, E. E. (2015). Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: sculpting by exomoons?. *The Astrophysical Journal*, 800(2), 126.
- [14] Liu, L., Cheng, X., Wang, Y., & Zhou, Z. (2019). American Astronomical Society logo American Astronomical Society logo iop-2016. png iop-2016. png A publishing partnership Formation of a Magnetic Flux Rope in the Early Emergence Phase of NOAA Active Region 12673. *The Astrophysical Journal*, 884(1).
- [15] Mayor, M., & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355-359.
- [16] Ohta, Y., Taruya, A., & Suto, Y. (2008). Predicting photometric and spectroscopic signatures of rings around transiting extrasolar planets. *The Astrophysical Journal*, 690(1), 1.
- [17] Piro, A. L., & Vissapragada, S. (2020). Exploring Whether Super-puffs can be Explained as Ringed Exoplanets. *The Astronomical Journal*, 159(4), 131.
- [18] Schlichting, H. E., & Chang, P. (2011). Warm Saturns: on the nature of rings around extrasolar planets that reside inside the ice line. *The Astrophysical Journal*, 734(2), 117.
- [19] Sucerquia, M., Alvarado-Montes, J. A., Ramírez, V., & Zuluaga, J. I. (2017). Anomalous light curves of young tilted exorings. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 472(1), L120-L124.
- [20] Tusnski, L. R. M., & Valio, A. (2011). Transit model of planets with moon and ring systems. *The Astrophysical Journal*, 743(1), 97.
- [21] Wang, J., Fischer, D. A., Barclay, T., Picard, A., Ma, B., Bowler, B. P., ... & Baranec, C. (2015). Planet Hunters. VIII. Characterization of 41 Long-Period Exoplanet Candidates from Kepler Archival Data. *The Astrophysical Journal*, 815(2), 127.

- [22] Zuluaga, J. I., Kipping, D. M., Sucerquia, M., & Alvarado, J. A. (2015). A novel method for identifying exoplanetary rings. *The Astrophysical Journal Letters*, 803(1), L14.

Διαδικτυακές πηγές

- www.exoplanet.eu
- <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- <https://exoplanets.nasa.gov>
- <http://www.openexoplanetcatalogue.com>
- <http://www.exoplanetkyoto.org>
- <https://hubblesite.org/science/exoplanets>
- <https://spaceplace.nasa.gov/>
- <https://www.esa.int>
- <https://photojournal.jpl.nasa.gov>
- <https://www.space.com>
- <https://spacenews.com>
- <https://spaceflightnow.com>
- <https://www.planetary.com>
- <https://www.skyandtelescope.com>
- <https://www.cfa.harvard.edu/minerva/>

Κατάλογος Πινάκων

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων του προβλήματος. | 39 |
| 4.2 | <i>Best-fit parameters</i> για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο μεγάλου πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days. | 43 |
| 4.3 | <i>Best-fit parameters</i> για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο ενδιάμεσου πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days. | 46 |
| 4.4 | <i>Best-fit parameters</i> για υποθετικό πλανήτη με δακτύλιο μικρού πάχους και με τροχιακή περίοδο 2100 days. | 49 |
| 4.5 | <i>Best-fit parameters</i> για τον πλανήτη Κρόνο, αν μπορούσε να παρατηρηθεί η διάβασή του μπροστά από τον ηλιακό δίσκο. | 52 |
| 6.1 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 7619236. | 67 |
| 6.2 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 8505215. | 69 |
| 6.3 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 3962440. | 71 |
| 6.4 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 9214713. | 73 |
| 6.5 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 3230491. | 75 |
| 6.6 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 10460629. | 77 |
| 6.7 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 3239945. | 79 |
| 6.8 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 11342550. | 81 |
| 6.9 | <i>Best-fit parameters</i> για τον KIC 12356617. | 83 |
| 6.10 | Οι τιμές του λόγου του πάχους κάθε δακτυλίου προς την ακτίνα του μητρικού του πλανήτη και του ποσοστού υπερεκτίμησης της πλανητικής ακτίνας για τις περιπτώσεις των πλανητών που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 6. | 84 |
| 7.1 | Συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των <i>best-fit parameters</i> για τους πλανήτες που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. | 89 |

