ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 3, No 1 (2020)

Κυνήγι Εξωπλανητών

Ανδρέας Βατίστας Βατίστας, Θανάσης Βασίλαινας Βασίλαινας, Εμμέλεια Βουτιέρου, Φωτεινή-Μαρία Δραβίλλα, Γιώργος Καλπαξής, Ρένια Μενέγου, Παναγιώτης Μιχάλαινας, Ιάσονας Παυλόπουλος, Δήμητρα Πίνα, Θωμάς Πιτσαργιώτης, Γιώργος Τσακίρης, Στέλιος Φραγκουδάκης, Δρ. Σωτήριος Τσαντίλας

doi: 10.12681/osj.22398

Copyright © 2020, Ανδρέας Βατίστας Βατίστας, Θανάσης Βασίλαινας Βασίλαινας, Εμμέλεια Βουτιέρου, Φωτεινή-Μαρία Δραβίλλα, Γιώργος Καλπαξής, Ρένια Μενέγου, Παναγιώτης Μιχάλαινας, Ιάσονας Παυλόπουλος, Δήμητρα Πίνα, Θωμάς Πιτσαργιώτης, Γιώργος Τσακίρης, Στέλιος Φραγκουδάκης, Δρ. Σωτήριος Τσαντίλας

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Βατίστας Α. Β., Βασίλαινας Θ. Β., Βουτιέρου Ε., Δραβίλλα Φ.-Μ., Καλπαξής Γ., Μενέγου Ρ., Μιχάλαινας Π., Παυλόπουλος Ι., Πίνα Δ., Πιτσαργιώτης Θ., Τσακίρης Γ., Φραγκουδάκης Σ., & Τσαντίλας Δ. Σ. (2020). Κυνήγι Εξωπλανητών. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(1). https://doi.org/10.12681/osj.22398

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 01/06/2025 21:59:38

Open Schools Journal for Open Science

Volume 4

Κυνήγι Εξωπλανητών

Ανδρέας Βατίστας[1], Θανάσης Βασίλαινας[1], Εμμέλεια Βουτιέρου[1], Φωτεινή-Μαρία Δραβίλλα[1], Γιώργος Καλπαξής[1], Ρένια Μενέγου[1], Παναγιώτης Μιχάλαινας[1], Ιάσονας Παυλόπουλος[1], Δήμητρα Πίνα[1], Θωμάς Πιτσαργιώτης[1], Γιώργος Τσακίρης[1], Στέλιος Φραγκουδάκης[1], Δρ. Σωτήριος Τσαντίλας[2]

[1]Ζάννειο Πειραματικό Λύκειο Πειραιά, Αττική, Ελλάδα
[2] Μαθηματικός, Αστροφυσικός, Ζάννειο Πειραματικό Λύκειο Πειραιά, Αττική, Ελλάδα

Περίληψη

Από το 2009 το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler καταγράφει τις μικρές ελαττώσεις (εκλείψεις) στο φως μακρινών αστέρων που οφείλονται στη διάβαση (transit) πλανητών από μπροστά τους. Σκοπός μας είναι να εντοπίσουμε πλανήτες σε τροχιά γύρω από μακρινά άστρα από τα δεδομένα της αποστολής Kepler, χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο των Διαβάσεων με τη βοήθεια δύο προγραμμάτων που έχει γράψει η ομάδα μας σε γλώσσα C. Εφόσον εντοπιστούν και επιβεβαιωθούν οι διαβάσεις, προχωρούμε στην ανάλυση των χαρακτηριστικών του πλανήτη: Ακτίνα, κλίση, απόσταση από το αστέρι, και κυρίως αν βρίσκεται στη λεγόμενη «κατοικήσιμη ζώνη» πράγμα που θα κάνει δυνατή τη διατήρηση ζωής.

Λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των πλανητών σε σχέση με το αστέρι τους, ο εντοπισμός αυτός είναι εξαιρετικά δύσκολος. Παρόλα αυτά έχουμε ήδη εντοπίσει έναν τέτοιο εξωπλανήτη σε τροχιά γύρω από τον αστέρα KIC 1432789 τα χαρακτηριστικά του οποίου ανέλυσε η ομάδα μας για πρώτη φορά.

Λέξεις κλειδιά

Αποστολή Kepler, Εξωπλανήτης, διάβαση, καμπύλη φωτός, KIC 1432789

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η αναζήτηση εξωπλανητών γίνεται με διάφορες μεθόδους. Οι πιο διαδεδομένες είναι οι παρακάτω.

- Μέθοδος των Διαβάσεων (Transit Method)

Όταν ένας πλανήτης περάσει μπροστά από το άστρο του (διάβαση), προκαλεί μια αμυδρή ελάττωση του φωτός του η οποία και καταγράφεται σε ένα διάγραμμα χρόνου – φωτός που ονομάζεται καμπύλη φωτός (ΚΦ). Ο εντοπισμός και η μελέτη τέτοιων ελαττώσεων μπορεί να φανερώσει την ύπαρξη και τα χαρακτηριστικά των πλανητών.

Η Μέθοδος των Διαβάσεων είναι αυτή που επιλέξαμε για να κάνουμε την έρευνά μας.

- Μέθοδος Ακτινικών Ταχυτήτων (Radial Velocity Method)

Ένας πλανήτης σε τροχιά αναγκάζει το άστρο του να κάνει μικρές κινήσεις όπως περίπου ένας σφυροβόλος που περιστρέφει τη σφύρα γύρω από το σώμα του. Ως αποτέλεσμα, το άστρο κάποιες φορές κινείται προς τα εμάς και κάποιες άλλες απομακρύνεται. Όταν κινείται προς τα εμάς, το φάσμα του φωτός που μας στέλνει παρουσιάζει μία μετατόπιση προς το μπλε, ενώ όταν απομακρύνεται προς το κόκκινο. Αυτό ονομάζεται *Φαινόμενο Doppler*, και μπορεί να φανερώσει την ύπαρξη εξωπλανήτη.

- Ακριβής απεικόνιση (Direct imaging)

Σε σπάνιες περιπτώσεις είναι δυνατόν να φωτογραφίσουμε απ' ευθείας τον εξωπλανήτη. Επειδή όμως το φως του είναι πολύ πιο αμυδρό από αυτό του αστέρα του, η μέθοδος είναι επιτυχής μόνο σε περιπτώσεις αμυδρών αστέρων φωτογραφημένων στο υπέρυθρο και με τη βοήθεια στεμματογράφου που προκαλεί τεχνητή έκλειψη του αστέρα.

Βασικές Εξισώσεις

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήσαμε για να εξάγουμε τις τροχιακές παραμέτρους και τις παραμέτρους της διάβασης είναι οι ακόλουθες (Seager & Mallén, 2003):

1. Το βάθος της διάβασης *ΔF*, όπου το *F* ορίζεται ως η ολική παρατηρούμενη ροή ακτινοβολίας, ενώ R_P, R_* είναι η πλανητική και η αστρική ακτίνα αντίστοιχα.

$$\Delta F = \frac{F_{no\,transit} - F_{transit}}{F_{no\,transit}} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

2. Ο Τρίτος Νόμος του Κέπλερ, όπου *P* είναι η τροχιακή περίοδος, G η Σταθερά της Παγκόσμιας Έλξης, M_P, M_* η μάζα του πλανήτη και του αστέρα αντίστοιχα, και *α* η τροχιακή ακτίνα.

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_* + M_p)}$$

3. Η παράμετρος *b* (Impact parameter) η οποία καθορίζει τη μορφή της διάβασης, όπου t_T, t_F είναι η ολική διάρκεια της έκλειψης και η διάρκεια του επίπεδου τμήματός της αντίστοιχα.

$$b=\left[\frac{\left(1-\sqrt{\Delta F}\right)^2-\left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2\left(1+\sqrt{\Delta F}\right)^2}{1-\left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2}\right]^{1/2}$$

4. Η κλίση της τροχιάς του πλανήτη, i,

$$i=\cos^{-1}\left(b\frac{R_*}{a}\right)$$

5. Τα όρια της Κατοικήσιμης Ζώνης (Selsis et al, 2007)

$$l_{in}=\left(l_{in,sun}-a_{in}T_*-b_{in}T_*^2\right)\left(\frac{L}{L_{sun}}\right)^{1/2}$$

$$l_{out}=\left(l_{out,sun}-a_{out}T_*-b_{out}T_*^2\right)\left(\frac{L}{L_{sun}}\right)^{1/2}$$

όπου
$a_{in}=2.7619\times10^{-5}$, $b_{in}=3.8095\times10^{-9}$,
$a_{out}=1.3786\times10^{-4}$, $b_{out}=1.4286\times10^{-9}$,
T_{eff} είναι η θερμοκρασία του αστέρα
και $T_*=T_{eff}-5700$
Επίσης τα l_{in} και l_{in} είναι σε *AU* (Αστρονομικές Μονάδες), ενώ το T_{eff}είναι σε *K*.
Οι τιμές των $l_{in,sun}$ και $l_{out,sun}$ βασίζονται στα κριτήρια που έχουν επιλεγεί για τον καθορισμό των ορίων της κατοικήσιμης ζώνης (KZ). Ο Πίνακας 1 δίνει τα όρια για την τωρινή KZ του δικού μας ηλιακού συστήματος τα οποία βασίζονται στα κριτήρια του «πρώιμου Άρη» και της «πρόσφατης Αφροδίτης», και στα μοντέλα ακτινοβολίας – μεταφοράς με νεφοσκέπαση 0, 50 και 100%.

	Κριτήριο Αφροδίτης	Νέφη 0%	Νέφη 50%	Νέφη 100%
$l_{in,sun}$ (AU)	0.72	0.84-0.95	0.68-0.76	0.46-0.51
$l_{out,sun}$ (AU)	Κριτήριο Άρη	Νέφη 0%	Νέφη 50%	Νέφη 100%
	1.77	1.67	1.95	2.4

Πίνακας 1: Όρια της κατοικήσιμης ζώνης του Ηλιακού μας συστήματος

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

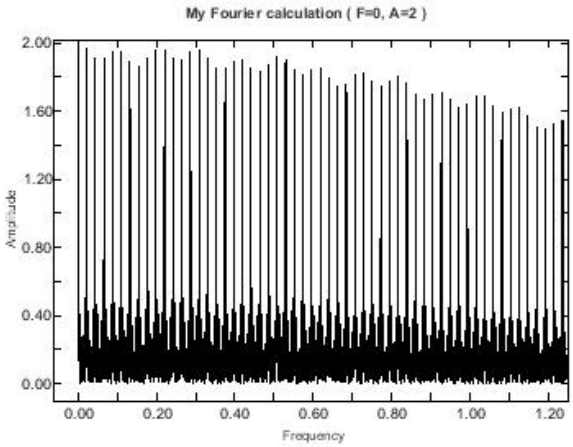
Λήψη δεδομένων

Για την απόκτηση των δεδομένων, χρησιμοποιήσαμε το "NASA Exoplanet Archive" στο οποίο μπορεί κανείς να βρει όλες τις καμπύλες φωτός της αποστολής Kepler της NASA. Αυτή η βάση δεδομένων είναι ελεύθερα προσβάσιμη μέσω του διαδικτύου στη σελίδα:

http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html

Ανάλυση δεδομένων

Η ανάλυση των καμπυλών φωτός (ΚΦ) πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δύο προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή σε γλώσσα C που γράφτηκαν από την ομάδα μας. Το πρώτο που ονομάζεται pltrack1 (Planet Tracker 1), χρησιμοποιείται για τον αρχικό εντοπισμό φαινομένων εκλείψεων και γενικότερα τμημάτων των ΚΦ στα οποία η καταγεγραμμένη ποσότητα του φωτός παρουσιάζει «ύποπτη» μείωση. Το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί ένα αρχείο με το όνομα out.dat στο οποίο καταγράφονται οι χρόνοι των σημείων της ΚΦ που ανήκουν σε πιθανές εκλείψεις. Στη συνέχεια, επεξεργαζόμαστε το out.dat με το πρόγραμμα Period04 (Lenz & Breger, 2005), το οποίο εκτελεί Ανάλυση Fourier ώστε να εντοπιστούν περιοδικότητες στη χρονοσειρά του out.dat. Κι αυτό διότι για να επιβεβαιωθεί μια έκλειψη δεν αρκεί να παρατηρηθεί μια **ελάττωση του φωτός**, αλλά θα πρέπει να είναι και **περιοδική**. Στην περίπτωση που εντοπιστεί τέτοια περιοδικότητα, το διάγραμμα της Fourier έχει την χαρακτηριστική μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Ανάλυση Fourier της ΚΦ του αστέρα KIC 11904151

Η συχνότητα ***ν*** που αντιστοιχεί στην πρώτη από αριστερά κατακόρυφη «γραμμή» μας δίνει την τροχιακή περίοδο ***T*** του πιθανού εξωπλανήτη σύμφωνα με τον τύπο $T = \frac{1}{\nu}$, ενώ οι υπόλοιπες συχνότητες που εμφανίζονται είναι οι αρμονικές της αρχικής. Το γεγονός ότι στην ανάλυση Fourier παρουσιάζεται τόσο μεγάλος αριθμός αρμονικών είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι έχει γίνει το «φιλτράρισμα» των σημείων μέσω του pltrack1 και αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου που έχουμε αναπτύξει αφού κάνει πολύ χαρακτηριστική τη μορφή του διαγράμματος και επομένως πολύ εύκολο τον εντοπισμό των πλανητικών διαβάσεων. Το δεύτερο πρόγραμμά μας, pltrack2 (Planet Tracker 2), μας βοηθάει να εντοπίσουμε και να αναλύσουμε τις εκλείψεις, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ: KIC 1432789

Χαρακτηριστικά

Ο KIC 1432789 είναι ένας αστέρας που βρίσκεται σε απόσταση $1199^{+315.691}_{-128.591}$ parsecs (σχεδόν 3910 έτη φωτός) από τη Γη. Έχει ηλικία $4.07^{+2.72}_{-2.30}$ δισεκατομμυρίων ετών, λίγο νεότερος από τον Ήλιο ο οποίος είναι 4.6 δισεκατομμυρίων ετών. Επιπλέον, οι διαστάσεις του είναι παρόμοιες με αυτές του Ήλιου μας.

Πρόσφατα (Morton et al., 2016) το σύστημα του KIC 1432789 χαρακτηρίστηκε ότι διαθέτει επιβεβαιωμένο εξωπλανήτη, αλλά **μόνο στατιστικά**, αφού εκτιμήθηκε ότι υπάρχει λιγότερο από 1%

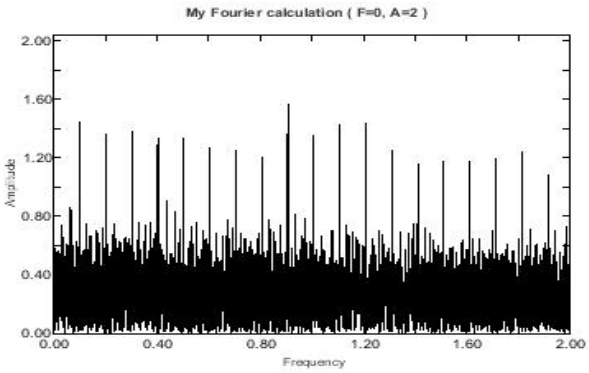
πιθανότητα να μην έχει πλανήτη. Επιλέξαμε να ερευνήσουμε αυτήν την περίπτωση αφού μέχρι τότε δεν είχαν ανακαλυφθεί οι τροχιακές και πλανητικές παράμετροι του συστήματος.

Ανάλυση

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης εφαρμόσαμε το πρόγραμμα pltrack1 στην ΚΦ με τη μορφή LC_WHITE με τις ακόλουθες παραμέτρους:

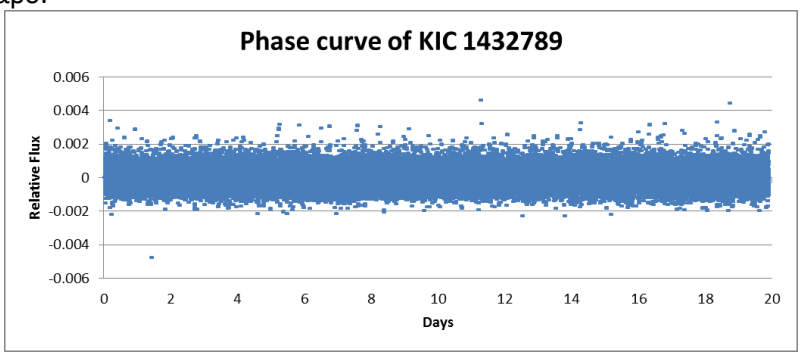
- Sliding window width=10
- CE Threshold=-1

Στο αρχείο out.dat που προέκυψε εφαρμόσαμε ανάλυση Fourier και εντοπίσαμε τη βασική συχνότητα 0.100655 $days^{-1}$ και τις αρμονικές της που φαίνονται στο Σχήμα 2. Η περίοδος που αντιστοιχεί είναι 9.93493 *days*.

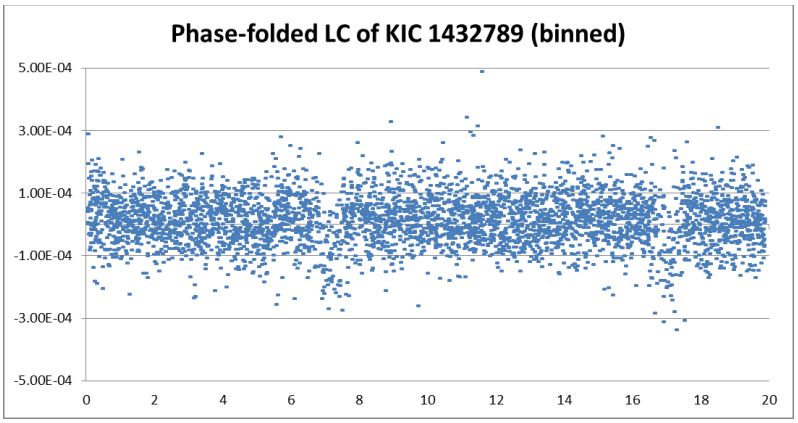


Σχήμα 2: Ανάλυση Fourier της ΚΦ του αστέρα KIC 1432789

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του pltrack2 «διπλώσαμε» ολόκληρη την ΚΦ σε πλάτος 2 περιόδων ώστε να φανερωθεί η μορφή της έκλειψης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 3 και 4. Όπως μπορεί να δει κανείς, οι εκλείψεις είναι εμφανείς μόνο στο Σχήμα 4 όπου έχει γίνει binning, δηλαδή τα δεδομένα έχουν ομαδοποιηθεί και έχουν βγει μέσοι όροι ανά 30 μετρήσεις, ώστε το διάγραμμα να είναι πιο καθαρό.

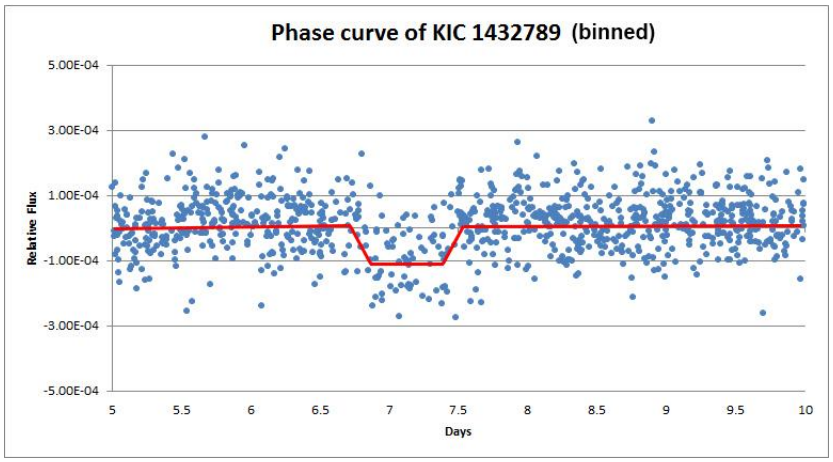


Σχήμα 3: Η καμπύλη φάσης του αστέρα KIC 1432789. Παρατηρήστε ότι οι εκλείψεις δεν είναι ορατές.



Σχήμα 4: Η καμπύλη φάσης του αστέρα KIC 1432789 (binned). Δύο εκλείψεις είναι ορατές κατά τις ημέρες 7 και 17, οι οποίες απέχουν ακριβώς μία περίοδο.

Στο δεύτερο διάγραμμα εφαρμόσαμε τραπεζοειδές γραμμικό μοντέλο για να εξάγουμε τα χαρακτηριστικά της έκλειψης σύμφωνα με τις εξισώσεις που έχουμε αναφέρει. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 5: Ανάλυση της έκλειψης με τη βοήθεια γραμμικού μοντέλου.

KIC 1432789 – Ανάλυση Χαρακτηριστικών Εξωπλανήτη	
Τροχιακή περίοδος P (days)	9.93493
Διάρκεια Διάβασης (hours)	19.30
Λόγος ακτίνων (R_p/R_*)	0.010954
Κλίση i (deg)	87.06
Λόγος απόστασης προς αστρική ακτίνα, a/R_*	18.95
Impact parameter b	0.9728
Παράμετροι Εξωπλανήτη	
Μάζα πλανήτη M_p (Earth masses)	-
Ακτίνα πλανήτη R_p (Earth radii)	1.24
Μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς (AU)	0.0916

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά του εξωπλανήτη του KIC 1432789

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των δεδομένων της αποστολής Kepler για τον αστέρα KIC 1432789, προέκυψε ότι σε τροχιακή απόσταση 0.0916 AU (αστρονομικών μονάδων) περιστρέφεται εξωπλανήτης με ακτίνα λίγο μεγαλύτερη από αυτή της Γης. Η απόσταση από το άστρο του όμως είναι εξαιρετικά μικρή. Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις για την KZ του KIC 1432789, παίρνουμε ότι αυτή βρίσκεται μεταξύ 0.7839 AU και 1.9158 AU. Συνεπώς, πρόκειται για ένα πολύ θερμό εξωπλανήτη, ο οποίος βρίσκεται εκτός της KZ και πολύ κοντά στο άστρο του, αποκλείοντας έτσι την ύπαρξη ζωής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Lenz, Patrick and Breger Michel. (2005). Period04 User Guide. *Communications in Asteroseismology,* 146, 53-136.
[2] Morton et al. (2016). False Positive Probabilities for all Kepler Objects of Interest: 1284 Newly Validated Planets and 428 Likely False Positives. *The Astrophysical Journal*, 822(2), article id. 86, 15.
[3] NASA Exoplanet Archive. (2018).
http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html
(Προσπελάστηκε 26-03-2018).

[4] Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. (2003). A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. *The Astrophysical Journal*, 585(2), 1038-1055.

[5] Selsis, F.; Kasting, J. F.; Levrard, B.; Paillet, J.; Ribas, I.; Delfosse, X. (2007). Habitable planets around the star Gliese 581? *Astronomy and Astrophysics*, 476(3), 1373-1387.