

(D01) 30 Χρόνια Εξωπλανητών

[90 βαθμοί]

Αυτό το πρόβλημα διερευνά ορισμένες πτυχές των δύο κύριων μεθόδων ανίχνευσης εξωπλανητών: την ακτινική ταχύτητα και τη διάβαση. Σε όλο αυτό το πρόβλημα θα εξετάσουμε ένα συγκεκριμένο σύστημα ενός μόνο πλανήτη (P) σε κυκλική τροχιά με ακτίνα a γύρω από ένα αστέρι ηλιακού τύπου (S). Θα αναφερόμαστε σε αυτό το σύστημα ως «σύστημα SP».

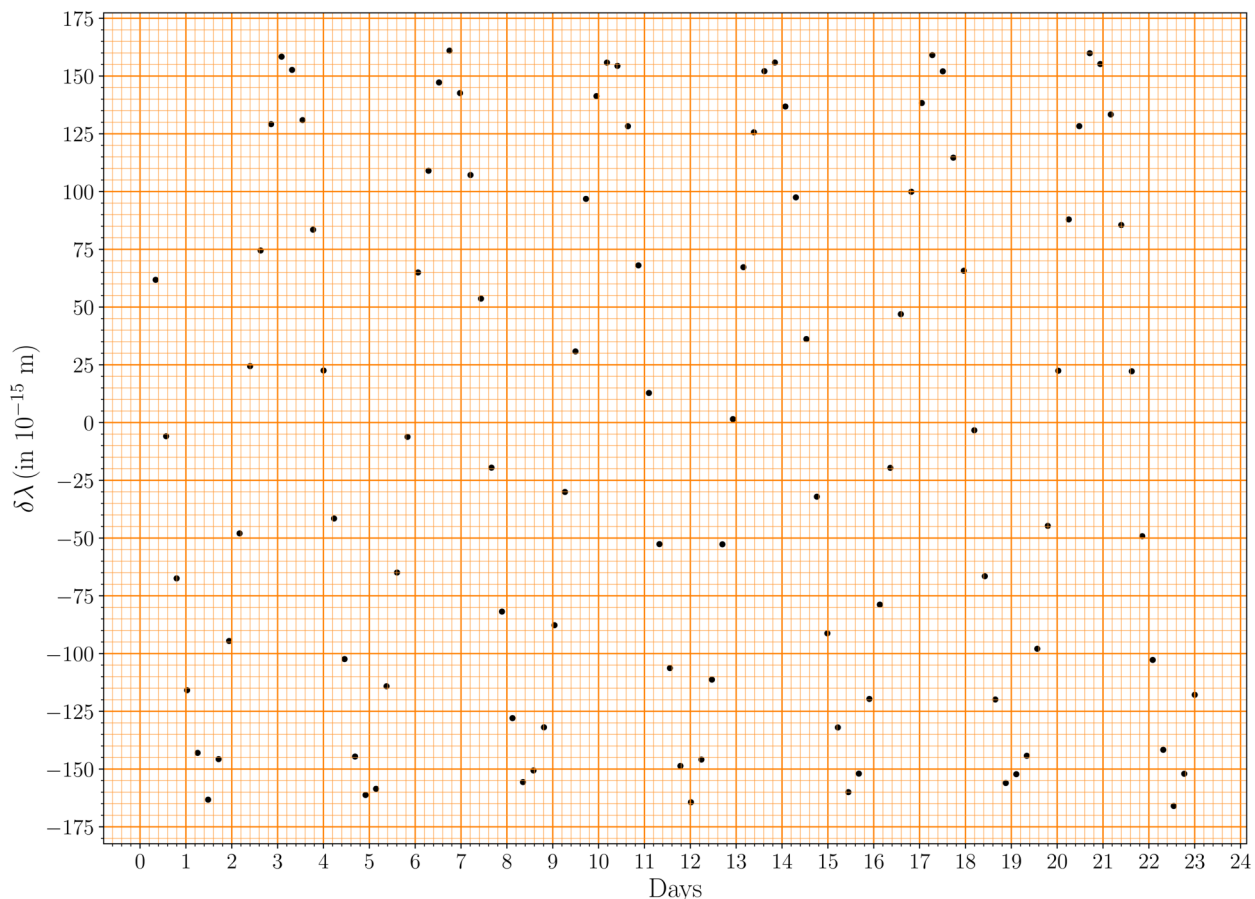
- (D01.1) Το φαινόμενο μέγεθος στο οπτικό (V-band) του αστέρα S είναι 7.65 ± 0.03 mag, η παράλλαξη είναι 20.67 ± 0.05 milliarcsecond και η βολομετρική διόρθωση (BC) είναι -0.0650 mag. Έτσι, το αστέρι έχει υψηλότερη βολομετρική φωτεινότητα από ό,τι V-band φωτεινότητα.

Εκτιμήστε τη μάζα του αστεριού, M_s (σε μονάδες $M_\odot$), υποθέτοντας ότι ισχύει μια σχέση μάζας - [8]
φωτεινότητας ($M - L$) της μορφής $L \propto M^4$. Εκτιμήστε επίσης την αβεβαιότητα στο M_s . Μπορεί να
χρησιμοποιήσετε τη σχέση $d \ln x / dx = 1/x$.

Μέθοδος ακτινικής ταχύτητας

Η μέθοδος της ακτινικής ταχύτητας χρησιμοποιεί τη μετατόπιση Doppler $\delta\lambda \equiv \lambda_{\text{obs}} - \lambda_0$ μεταξύ του παρατηρούμενου μήκους κύματος λ_{obs} και του μήκους κύματος σε ηρεμία λ_0 μιας γνωστής φασματικής γραμμής για την ανίχνευση ενός εξωπλανήτη και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει το $\delta\lambda$ για τη γραμμή Fe I ($\lambda_0 = 543.45 \times 10^{-9}$ m) ως συνάρτηση του χρόνου όπως παρατηρήθηκε για το σύστημα SP.



Το ημιπλάτος (semi-amplitude) ακτινικής ταχύτητας K ορίζεται ως $K \equiv (v_{r, \text{max}} - v_{r, \text{min}})/2$ όπου $v_{r, \text{max}}$ και $v_{r, \text{min}}$ είναι οι μέγιστες και ελάχιστες ακτινικές ταχύτητες αντίστοιχα. Για μια κυκλική πλανητική τροχιά, το ημιπλάτος K μπορεί να γραφτεί ως:

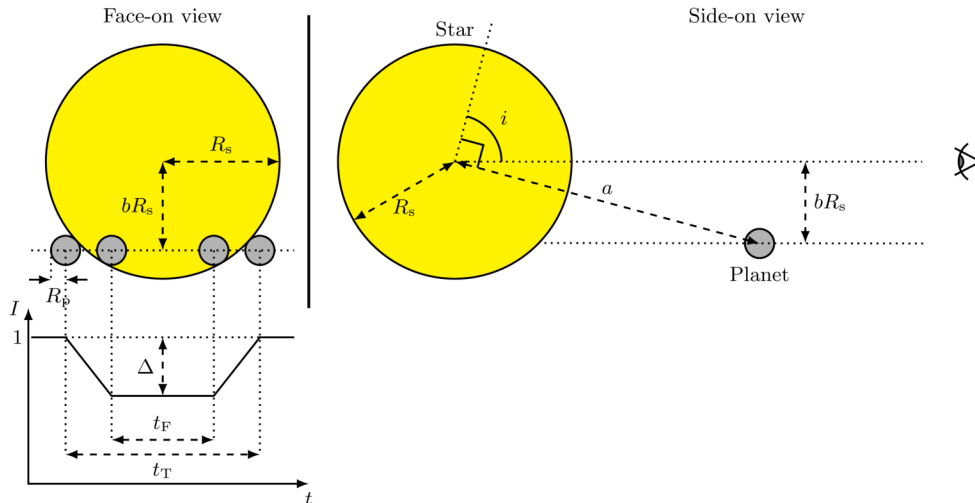
$$K = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_s)^{2/3}}$$

όπου T είναι η περίοδος, i είναι η κλίση της πλανητικής τροχιάς (γωνία μεταξύ της καθέτου του τροχιακού επιπέδου του πλανήτη και της ευθείας οπτικής παρατήρησης του παρατηρητή), και M_p και M_s είναι οι μάζες του πλανήτη και του αστέρα, αντίστοιχα.

- (D01.2) Το παραπάνω γράφημα βρίσκεται επίσης στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων (όπου είναι περιστραμμένο κατά 90 deg). Χρησιμοποιήστε το γράφημα στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων για να απαντήσετε στα ακόλουθα.
- (D01.2a) Σχεδιάστε μια ομαλή καμπύλη που σχετίζεται με τα παρατηρούμενα δεδομένα που φαίνονται στο γράφημα. [2]
- (D01.2b) Επιλέξτε κατάλληλα σημεία στην καμπύλη που σχεδιάσατε και χρησιμοποιήστε κατάλληλες μεθόδους για να προσδιορίσετε τα T και K μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες. Όλα τα σημεία δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των T και K πρέπει να εμφανίζονται στον πίνακα στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων. Χρησιμοποιήστε τον υπόλοιπο Πίνακα για να δείξετε τους ενδιάμεσους υπολογισμούς σας, με κατάλληλες επικεφαλίδες. [11]
- (D01.2c) Βρείτε την ελάχιστη μάζα του πλανήτη $M_{p, \min}$ (σε $M_\odot$) και την αντίστοιχη αβεβαιότητά της, υποθέτοντας $M_p \ll M_s$. [5]
- (D01.2d) Χρησιμοποιώντας την τιμή $M_{p, \min}$ που εκτιμήθηκε στο μέρος (D01.2c), υπολογίστε την ελάχιστη τιμή του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς του πλανήτη, $a_{\min}$ σε au, καθώς και την αβεβαιότητά της. [4]

Μέθοδος διέλευσης (χωρίς σκίαση χείλους)

Το σχηματικό διάγραμμα μιας διέλευσης πλανήτη (όχι υπό κλίμακα) φαίνεται παρακάτω. Αρχικά, θα υποθέσουμε ότι ο αστρικός δίσκος έχει ομοιόμορφη μέση ένταση με κάποιο εγγενή θόρυβο λόγω του ίδιου του αστέρα.



Η καμπύλη φωτός της κανονικοποιημένης έντασης I ως συνάρτηση του χρόνου t φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα της παραπάνω διέλευσης. Η μέση αστρική ένταση εκτός της διέλευσης λαμβάνεται ως μονάδα. Η μέγιστη μείωση στην ένταση δίνεται από το Δ στην κανονικοποιημένη καμπύλη φωτός. Για έναν ομοιόμορφα φωτεινό αστρικό δίσκο, η ακτίνα του πλανήτη R_p σχετίζεται με το Δ από την σχέση

$$\left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = \Delta$$

όπου R_s είναι η ακτίνα του αστέρα.

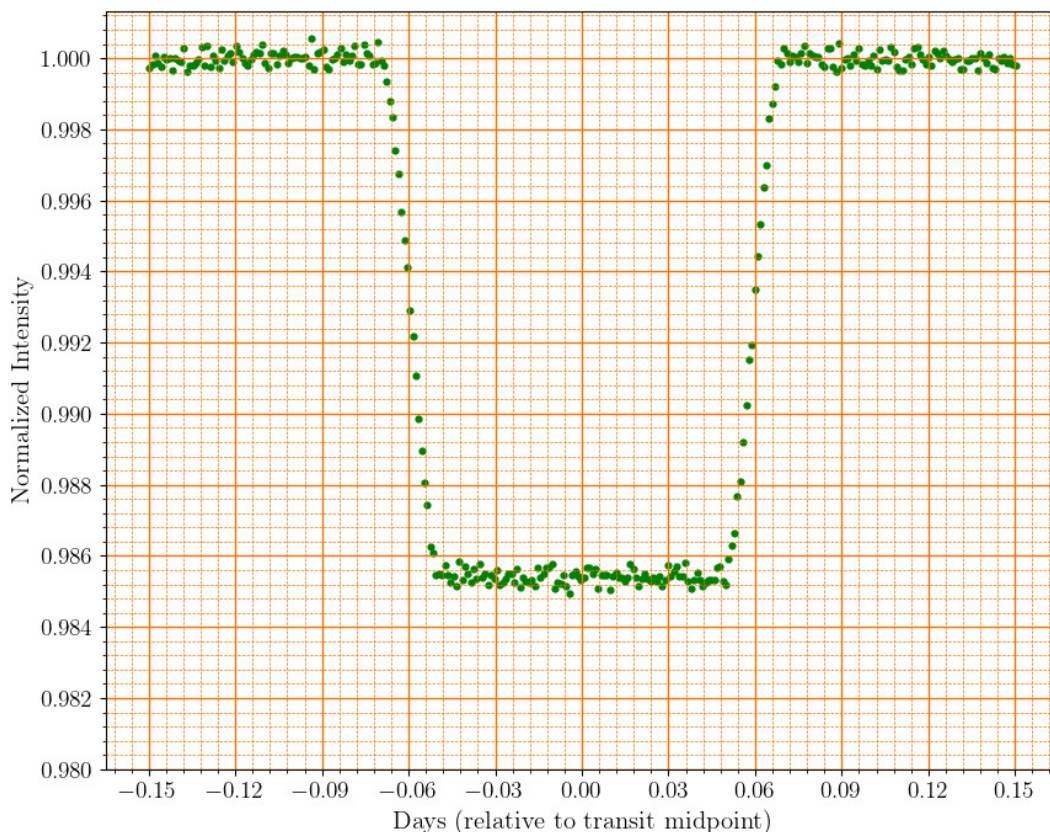
Η συνολική διάρκεια της διέλευσης (όταν μέρος του πλανήτη ή ολόκληρος ο πλανήτης καλύπτει τον αστρικό δίσκο) δίνεται από τον t_T , ενώ t_F δίνει τη διάρκεια όταν ο πλανήτης βρίσκεται πλήρως μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Η «παραμέτρος πρόσκρουσης» b είναι η προβλεπόμενη απόσταση μεταξύ του πλανήτη και του κέντρου του αστρικού δίσκου στο μέσο της διέλευσης σε μονάδες της αστρικής ακτίνας R_s .

Για μια τροχιά αστέρα-πλανήτη που είναι σχεδόν παράλληλη στο επίπεδο οράσεως, η παράμετρος πρόσκρουσης δίνεται από τον τύπο

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

- (D01.3) Για το σύστημα SP, ξέρουμε ότι η ακτίνα του αστεριού είναι ($R_{\text{s}} = 1.20R_{\odot}$), και η διάβαση του πλανήτη είναι πράγματι ορατή. Χρησιμοποιώντας την ελάχιστη τροχιακή ακτίνα $a_{\min}$ που εκτιμήθηκε στο μέρος (D01.2d), βρείτε την ελάχιστη τιμή $i_{\min}$ της γωνίας κλίσης. [3]

Υποθέτοντας έναν αστρικό δίσκο ομοιόμορφης φωτεινότητας, η καμπύλη φωτός διέλευσης θα μοιάζει με αυτήν που φαίνεται παρακάτω.



- (D01.4) Χρησιμοποιώντας την δοθείσα καμπύλη φωτός, απαντήστε στις ακόλουθες ερωτήσεις. Η παραπάνω καμπύλη φωτός δίνεται επίσης στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων.

- (D01.4a) Υπολογίστε τις τιμές των t_T και t_F σε ημέρες σημειώνοντας τις κατάλληλες μετρήσεις στο γράφημα. [3]

- (D01.4β) Εκτιμήστε τη μέση τιμή του Δ σημειώνοντας τις κατάλληλες μετρήσεις στο γράφημα και, ως εκ τούτου, βρείτε την R_p σε μονάδες $R_{\odot}$. [2]

- (D01.4c) Προσδιορίστε την τιμή του i σε μοίρες υποθέτοντας ότι η τροχιακή ακτίνα είναι $a_{\min}$. [2]

Εισάγοντας την σκίαση χείλους

Μέχρι στιγμής έχουμε υποθέσει ότι ο αστρικός δίσκος είναι ομοιόμορφα φωτεινός. Στην πραγματικότητα, η παρατηρούμενη φωτεινότητα του αστρικού δίσκου δεν είναι ομοιόμορφη και αυτό συμβαίνει λόγω της «σκίασης χείλους» — ενός οπτικού φαινομένου όπου το κεντρικό τμήμα του αστρικού δίσκου φαίνεται φωτεινότερο από την άκρη ή, αλλιώς, «χείλος».

Το φαινόμενο σκίασης χείλους μπορεί να μετρηθεί από τη σχετική ένταση $J(\theta) \equiv \frac{I(\theta)}{I(0)}$, όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της κάθετου προς την αστρική επιφάνεια σε ένα σημείο και της γραμμής που ενώνει τον παρατηρητή με αυτό το σημείο, $I(\theta)$ είναι η παρατηρούμενη ένταση του αστρικού δίσκου σε αυτό το σημείο, και $I(0)$ είναι η ένταση στο κέντρο του αστρικού δίσκου. Για έναν μακρινό παρατηρητή, η θ ποικίλλει από $\theta = 0$ (κέντρο του δίσκου) έως $\theta \approx 90^\circ$ (άκρη του δίσκου).

(D01.5) Ο παρακάτω πίνακας δίνει την μετρημένη τιμή $J(\theta)$ σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος για τον Ήλιο. Θα υποθέσουμε ότι το ίδιο προφίλ σκίασης χείλους ισχύει και για το άστρο S.

θ	$J(\theta)$	θ	$J(\theta)$	θ	$J(\theta)$	θ	$J(\theta)$
0°	1.000	20°	0.971	40°	0.883	70°	0.595
10°	0.994	25°	0.950	50°	0.794	80°	0.475
15°	0.984	30°	0.943	60°	0.724	90°	0.312

Το προφίλ σκίασης χείλους μπορεί να μοντελοποιηθεί με έναν τετραγωνικό τύπο:

$$J(\theta) = 1 - a_1(1 - \cos \theta) - a_2(1 - \cos \theta)^2,$$

όπου οι a_1 και a_2 είναι δύο σταθερές.

Θα εκτιμήσουμε τους άγνωστους συντελεστές a_1 και a_2 από τα δεδομένα, κατασκευάζοντας ένα διάγραμμα με κατάλληλες μεταβλητές.

(D01.5a) Επιλέξτε ένα ζεύγος μεταβλητών (x_1, y_1) που είναι κατάλληλες συναρτήσεις των θ και J , τις οποίες θέλετε να απεικονίσετε κατά μήκος των αξόνων x και y αντίστοιχα για να προσδιορίσετε τις a_1 και a_2 . Γράψτε τις εκφράσεις για τις x_1 και y_1 . [2]

Αν χρειάζεται να ορίσετε επιπλέον μεταβλητές για επιπλέον γραφήματα, ορίστε τις ως (x_2, y_2) , κ.λπ.

(D01.5b) Καταγράψτε σε πίνακα τις τιμές που είναι απαραίτητες για τα διαγράμματά σας. [4]

(D01.5c) Σχεδιάστε τις μεταβλητές που μόλις προσδιορίσατε στο χαρτί γραφημάτων που σας δόθηκε (σημειώστε το γράφημά σας ως "D01.5c"). [7]

(D01.5d) Εξάγετε τις a_1 και a_2 από το διάγραμμα. Δεν χρειάζονται αβεβαιότητες στις τιμές. [7]

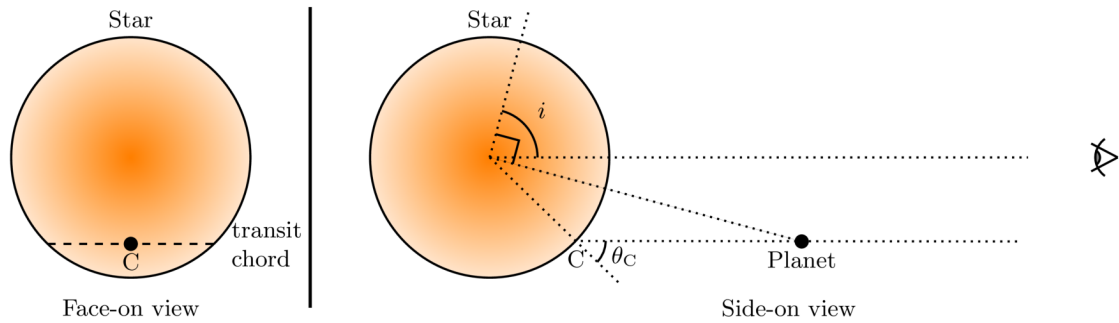
Διάβαση παρουσία σκίασης χείλους

Τώρα, εξετάζουμε πλανητικές διελεύσεις πάνω σε έναν αστρικό δίσκο με σκίαση χείλους. Παρουσία σκίασης χείλους, την οποία θα μοντελοποιήσουμε με τον τετραγωνικό τύπο $J(\theta)$ που δίνεται παραπάνω, η μέση παρατηρούμενη ένταση ολόκληρου του αστρικού δίσκου (χωρίς καμία διέλευση) $\langle I \rangle$ δίνεται από την σχέση:

$$\langle I \rangle = \left(1 - \frac{a_1}{3} - \frac{a_2}{6} \right) I(0)$$

Επιπλέον, η μείωση του φωτός που προκαλείται από τον διερχόμενο πλανήτη εξαρτάται πλέον όχι μόνο από το σχετικό μέγεθος του πλανήτη και του αστέρα, $\left(\frac{R_p}{R_s} \right)$, αλλά και από το προφίλ έντασης του αστρικού δίσκου κατά μήκος της γραμμής διέλευσης, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τη γωνία κλίσης i .

Το σχηματικό διάγραμμα παρακάτω (όχι υπό κλίμακα) δείχνει τη διάταξη. Σημειώστε ότι το λαμπρότερο μέρος του αστεριού εμφανίζεται σε πιο σκούρα απόχρωση, ενώ ο πλανήτης εμφανίζεται ως μαύρη κουκκίδα.



Εδώ η σχέση μεταξύ του $\left(\frac{R_p}{R_s}\right)$ και του μετρούμενου Δ από την καμπύλη φωτός είναι

$$\Delta = \frac{I(\theta_C)}{\langle I \rangle} \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2,$$

όπου $I(\theta_C)$ είναι η ένταση του αστρικού δίσκου στο μέσο της χορδής διέλευσης (σημείο C στο παραπάνω σχήμα), και θ_C είναι η γωνία μεταξύ της γραμμής όρασης και της κάθετου στην επιφάνεια σε αυτό το σημείο. Για ένα δεδομένο αστέρι, η ίδια τιμή του Δ μπορεί να παραχθεί από πολλούς συνδυασμούς του μεγέθους του πλανήτη R_p και της γωνίας κλίσης i .

- (D01.6) Είναι δυνατό να προσδιοριστούν μοναδικά τόσο η R_p όσο και η i χρησιμοποιώντας δεδομένα από καμπύλες φωτός διάβασης σε δύο μήκη κύματος, ας πούμε, λ_B (μπλε) και λ_R (κόκκινο). Οι συντελεστές σκίασης των άκρων για αυτά τα δύο μήκη κύματος δίνονται παρακάτω:

Μήκος κύματος	a_1	a_2
λ_B	0.82	0.05
λ_R	0.24	0.20

(D01.6a)

[2]

Επιλέξτε τη σωστή πρόταση από τις παρακάτω, η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της μέγιστης μείωσης της έντασης κατά τη διάβαση Δ για το λ_B και τη γωνία κλίσης (i) της τροχιάς και σημειώστε την με (✓) στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων.

- A. Η Δ αυξάνεται με τη μείωση του i .
- B. Η Δ μειώνεται με τη μείωση του i .
- C. Η Δ είναι ανεξάρτητη από i .

- (D01.6b) Η μέγιστη μείωση της έντασης κατά τη διάβαση (Δ) για το σύστημα SP μετρήθηκε να είναι 0.0182 και 0.0159 για λ_B και λ_R αντίστοιχα. [4]

Σχεδιάστε σχηματικές καμπύλες διέλευσης φωτός τόσο για το λ_B όσο και για το λ_R στο δοσμένο γράφημα και ονομάστε τις καμπύλες "B" και "R" αντίστοιχα. Υποθέστε ότι η συνολική διάρκεια διέλευσης είναι η ίδια και για τα δύο μήκη κύματος. Οι καμπύλες δεν χρειάζεται να είναι σε κλίμακα, αλλά θα πρέπει να αναπαριστούν σωστά τα σχήματα των καμπυλών φωτός.

- (D01.7) Παρακάτω, θα χρησιμοποιήσετε μια γραφική μέθοδο για να βρείτε τις τιμές των R_p και i για το σύστημα SP χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Δ στα λ_B και λ_R .

- (D01.7a) Γράψτε μια κατάλληλη έκφραση που να συνδέει τις σχετικές μεταβλητές που πρόκειται να απεικονιστούν. Υπόδειξη: Να έχετε την R_p και την i ή την b μεταξύ των σχετικών μεταβλητών. [6]

- (D01.7b) Να καταγράψετε σε πίνακα τις κατάλληλες ποσότητες που πρόκειται να απεικονιστούν γραφικά. [5]
- (D01.7c) Σχεδιάστε ένα κατάλληλο γράφημα και σημειώστε το ως "D01.7c". [7]
- (D01.7d) Εκτιμήστε τις τιμές R_p (σε $R_\odot$) και i (σε μοίρες) από το γράφημα. [4]
- (D01.8) Με βάση τα αποτελέσματα που βγάλατε σε αυτό το πρόβλημα, υποδείξτε αν ο πλανήτης P είναι «ΒΡΑΧΩΔΗΣ» ("ROCKY") ή «ΑΕΡΙΟΣ» ("GASEOUS"), τσεκάροντας (✓) το κατάλληλο πλαίσιο στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων. [2]

(D02) Πρόβλεψη χρόνων άφιξης στεμματικών εκτινάξεων μάζας στη Γη
[60 μονάδες]

Ο Ήλιος περιστασιακά απελευθερώνει μαγνητισμένο πλάσμα, φαινόμενο που ονομάζεται στεμματική εκτίναξη μάζας (Coronal Mass Ejections, CME). Οι CME προέρχονται από την επιφάνεια του Ήλιου και διαδίδονται προς τα έξω. Η ακριβής πρόβλεψη των χρόνων άφιξης τους στη Γη είναι ζωικής σημασίας για την κατανόηση και τον μετριασμό των πιθανών επιπτώσεων τους στους δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Σε αυτό το πρόβλημα, στοχεύουμε να προβλέψουμε τους χρόνους άφιξης των CME αναπτύσσοντας ένα εμπειρικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα 10 CME. Σε όλο αυτό το πρόβλημα, η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του Ήλιου και της Γης λαμβάνεται ως $214R_{\odot}$.

Υποθέστε ότι ο Ήλιος δεν περιστρέφεται. Οι CMEs παρουσιάζουν μεταβλητή επιτάχυνση καθόλη τη διάδοσή τους. Στα δύο πρώτα μέρη αυτού του προβλήματος, υποθέτουμε ότι η περιοχή μεταξύ Ήλιου και Γης είναι κενή.

CMEs μέσα στο κενό

- (D02.1) Η αρχική ταχύτητα u στην ηλιακή επιφάνεια ($= 1R_{\odot}$), η τελική ταχύτητα v κατά την άφιξη στη Γη, και ο χρόνος άφιξης στη Γη μετά την αναχώρηση από την επιφάνεια του Ήλιου (σε ώρες) τ δίνονται για 10 CME στον ακόλουθο πίνακα.

CME	u	v	τ
Όνομα	(km s^{-1})	(km s^{-1})	(h)
CME-A	804	470	74,5
CME-B	247	360	127,5
CME-C	523	396	103,5
CME-D	830	415	71,0
CME-E	665	400	104,5
CME-F	347	350	101,5
CME-G	446	375	99,5
CME-H	155	360	97,0
CME-I	1016	515	67,0
CME-J	683	410	54,0

- (D02.1a) Υπολογίστε τη μέση επιτάχυνση a για κάθε CME σε m s^{-2} .

[3]

- (D02.1b) Υποθέτουμε ένα εμπειρικό μοντέλο για την επιτάχυνση a_{model} ενός CME, το οποίο εξαρτάται από την αρχική του ταχύτητα u ως $a_{\text{model}} = m \left(\frac{u}{u_0} \right) + \alpha$, όπου η a_{model} εκφράζεται σε m s^{-2} , η u εκφράζεται σε km s^{-1} και η $u_0 = 1.00 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$.

Προσδιορίστε τις σταθερές m και α και τις σχετικές αβεβαιότητές τους χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο γράφημα (σημειώστε το γράφημά σας ως «D02.1b»).

[15]

- (D02.1c) Για κάθε CME, βάλτε την a_{model} σε m s^{-2} σε πίνακα. Στη συνέχεια, υπολογίστε την απόκλιση της μέσης τετραγωνικής ρίζας (rms) των επιταχύνσεων δa_{rms} μεταξύ της υπολογισμένης επιτάχυνσης, a και των τιμών του μοντέλου, a_{model} .

[4]

- (D02.2) Εξετάζουμε δύο άλλες CME: τις CME-1 και CME-2, οι οποίες έχουν αρχικές ταχύτητες $u = 1044 \text{ km s}^{-1}$ και 273 km s^{-1} αντίστοιχα.

(D02.2a) Χρησιμοποιώντας το εμπειρικό μοντέλο που προκύπτει στην (D02.1b), υπολογίστε τους προβλεπόμενους χρόνους άφιξης στη Γη, $\tau_{1,m}$ και $\tau_{2,m}$ (σε ώρες), για τις CME-1 και CME-2 αντίστοιχα. [4]

(D02.2b) [2]

Οι παρατηρούμενοι χρόνοι άφιξης στη Γη των CME-1 και CME-2 είναι 46.0 ώρες και 74.5 ώρες αντίστοιχα. Το εμπειρικό μοντέλο θεωρείται ΕΓΚΥΡΟ (VALID) για μια συγκεκριμένη CME εάν ο προβλεπόμενος χρόνος άφιξης του είναι εντός του 20% του παρατηρούμενου χρόνου άφιξης του. Διαφορετικά, ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΕΓΚΥΡΟ (NOT VALID). Υποδείξτε την εγκυρότητα του μοντέλου για κάθε CME σημειώνοντας (✓) το κατάλληλο πλαίσιο στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων.

CMEs παρουσία ηλιακού ανέμου

Στην πραγματικότητα, στον χώρο μεταξύ Ήλιου και Γης υπάρχει ηλιακός άνεμος, ο οποίος ασκεί μια δύναμη οπισθέλκουσα στις CME. Αυτή η δύναμη μπορεί είτε να επιβραδύνει είτε να επιταχύνει μια CME, ανάλογα με την ταχύτητα της CME σε σχέση με αυτήν του ηλιακού ανέμου. Για να λάβουμε υπόψη την επιρροή του ηλιακού ανέμου, θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο «μόνο οπισθέλκουσας» για αποστάσεις $R_{\text{obs}}(t) \geq R_0$, όπου R_0 είναι η απόσταση πέρα από την οποία η δύναμη οπισθέλκουσας γίνεται η κυρίαρχη δύναμη που επηρεάζει την κίνηση της CME.

Η απόσταση από την επιφάνεια του Ήλιου, όπως προσδιορίζεται από το μοντέλο «μόνο οπισθέλκουσας» $R_D(t)$ και η ταχύτητα $V_D(t)$ μιας CME σε αυτό το μοντέλο δίνονται ως

$$R_D(t) = \frac{S}{\gamma} \ln [1 + S\gamma(V_0 - V_s)(t - t_0)] + V_s(t - t_0) + R_0$$

$$V_D(t) = \frac{V_0 - V_s}{1 + S\gamma(V_0 - V_s)(t - t_0)} + V_s$$

όπου $\gamma = 2 \times 10^{-8} \text{ km}^{-1}$, V_s είναι η σταθερή ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, R_0 και V_0 είναι η απόσταση και η ταχύτητα αντίστοιχα τη χρονική στιγμή t_0 , και S είναι η παράμετρος πρόσημου. $S = 1$ αν $V_0 > V_s$ και $S = -1$ αν $V_0 \leq V_s$.

(D02.3) Οι παρακάτω πίνακες δείχνουν την παρατηρούμενη ακτινική απόσταση από την επιφάνεια του Ήλιου $R_{\text{obs}}(t)$ (μετρούμενη σε $R_\odot$), ως συνάρτηση του χρόνου t (σε ώρες), για δύο CME: CME-3 και CME-4. Το τελευταίο σημείο δεδομένων σε κάθε πίνακα (D5 και P8, αντίστοιχα) αντιστοιχεί στην ώρα άφιξης της αντίστοιχης CME στη Γη. Για αυτό το μέρος, υποθέστε $V_s = 330 \text{ km s}^{-1}$.

CME-3			CME-4		
Σημείο δεδομένων	t (σε h)	$R_{\text{obs}}(t)$ (σε $R_\odot$)	Σημείο δεδομένων	t (σε h)	$R_{\text{obs}}(t)$ (σε $R_\odot$)
D1	0.200	6.36	P1	1.00	4.00
D2	0.480	7.99	P2	3.00	6.00
D3	1.22	11.99	P3	4.00	9.00
D4	1.49	13.51	P4	5.00	11.0
D5	58.05	214	P5	21.0	43.0
			P6	50.0	100
			P7	85.0	170
			P8	111	214

Θα αξιολογήσουμε εάν το μοντέλο «μόνο οπισθέλκουσας» προβλέπει ικανοποιητικά τους χρόνους άφιξης αυτών των CME. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο, πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή του t_0 και των αντίστοιχων R_0 και V_0 .

- (D02.3a) Για την CME-3, ας λάβουμε υπόψη τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις: [6]
 (C1) Ο t_0 λαμβάνεται ως το μέσο του διαστήματος D1 – D2
 (C2) Ο t_0 λαμβάνεται ως το μέσο του διαστήματος D3 – D4
 Υποθέστε ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή σε κάθε συγκεκριμένο διάστημα D1–D2 και D3–D4, αλλά μπορεί να διαφέρει μεταξύ των δύο διαστημάτων.
 Χρησιμοποιώντας τις t_0 , R_0 και V_0 , υπολογίστε τη διαφορά μεταξύ της παρατηρούμενης και της προβλεπόμενης ακτινικής απόστασης $\delta R_D \equiv R_{\text{obs}}(t) - R_D(t)$ σε μονάδες $R_\odot$ στις $t = 58.05$ h, για καθεμία από τις δύο περιπτώσεις.
- (D02.3b) Υπολογίστε την $R_D(t)$ στα σημεία P5, P6, P7, και P8 μεταξύ του Ήλιου και της Γης για την CME-4 για τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις, υιοθετώντας διαδικασία παρόμοια με την (D02.3a): [4]
 (C3) Ο t_0 λαμβάνεται ως το μέσο του διαστήματος P1 – P2
 (C4) Ο t_0 λαμβάνεται ως το μέσο του διαστήματος P3 – P4.
- (D02.3c) Σχεδιάστε την καμπύλη $R_D(t)$ (σε $R_\odot$) έναντι της t (σε ώρες) για τις δύο περιπτώσεις, C3 και C4, για την CME-4 στα σημεία P5, P6, P7, και P8 (σημειώστε το γράφημά σας ως "D02.3c"). Στο ίδιο γράφημα, σχεδιάστε ομαλές καμπύλες της $R_D(t)$ για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις. Για αυτό το μέρος, πάρτε το εύρος του άξονα x από 0 έως 180 hr. [10]
- (D02.3d) Χρησιμοποιώντας το γράφημα, εκτιμήστε την απόλυτη διαφορά $|\delta\tau|$ μεταξύ του πραγματικού χρόνου άφιξης της CME-4 στη Γη και του χρόνου άφιξης του που προβλέπεται από το μοντέλο «μόνο οπισθέλκουσας», για καθεμία από τις περιπτώσεις C3 και C4. [4]
- (D02.3e) Υποδείξτε αν η ακόλουθη πρόταση είναι ΣΩΣΤΗ (TRUE) ή ΛΑΘΟΣ (FALSE), σημειώνοντας (✓) το κατάλληλο κουτάκι στο Φύλλο Συνοπτικών Απαντήσεων (δεν απαιτείται γραπτή αιτιολόγηση): [1]
 «Οι δυνάμεις οπισθέλκουσας που ασκούνται από τον ηλιακό άνεμο στις CME καθίστανται κυρίαρχες για την CME-3 σε προγενέστερο χρόνο σε σύγκριση με την CME-4».
- (D02.4) Θεωρήστε την οπισθέλκουσα ως την κυρίαρχη δύναμη που ασκείται στις 10 CME στο μέρος D02.1. Υποθέστε ότι το μοντέλο «μόνο οπισθέλκουσας» εφαρμόζεται από την επιφάνεια του Ήλιου ($R_0 = 1 R_\odot$) και πέραν αυτού, για όλες τις CME. [7]
 Εκτιμήστε και καταγράψτε την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου V_s σε km s^{-1} για κάθε CME. Επιπλέον, εκτιμήστε τη μέση ταχύτητα του ηλιακού ανέμου $V_{s, \text{avg}}$ και για τις 10 CME.