

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ – ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ι. ΜΙΣΛΗΣ

***ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΤΗΣ
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ & ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ
ΕΞΩΗΛΙΑΚΩΝ ΠΛΑΝΗΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ***



ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΑΥΓΟΛΟΥΠΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ ΣΕΙΡΑΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Σε όσους επιμένουν να κοιτάνε "ψηλά"

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την παρακάτω διπλωματική εργασία βοήθησαν έμμεσα ή άμεσα πολλοί άνθρωποι. Νιώθω την ανάγκη να τους ευχαριστήσω και να τους εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου. Χωρίς τη βοήθειά τους δεν θα γινόταν ποτέ πράξη αυτό το δύσκολο αλλά και φιλόδοξο εγχείρημα που αρχίσαμε πριν από τρία χρόνια περίπου και ελπίζουμε ότι θα βρει συνεχιστές. Ειδικότερα θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου **Αυγολούπη Σταύρο και Σειραδάκη Ιωάννη**. Πραγματικά η συμπαράσταση και η εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, μπορώ να πω από την εμπειρία που έχω ως φοιτητής ήταν πρωτοφανής. Τόσο το ενδιαφέρον τους για μένα όσο και το επιστημονικό πνεύμα που κατέθεταν σε κάθε συζήτηση με έχει συγκλονίσει. Τους ευχαριστώ θερμά. Θα ήταν μεγάλη παράληψη να μην εκφράσω το θαυμασμό και την ευγνωμοσύνη μου για τον αδικοχαμένο **Δρ. Αιμίλιο Χαρλαύτη**, από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, ο οποίος με δέχτηκε και με βοήθησε σε κάθε πρόβλημα που αντιμετώπιζα. Χωρίς αυτόν θα κατάφερνα πάρα πολύ λιγότερα. Θέλω να ευχαριστήσω τους **Βαγγέλη Τσορλίνη** και **Γιώργο Δήμου**, τεχνικούς του Αστεροσκοπείου Θεσσαλονίκης και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών αντίστοιχα. Χωρίς τις τεχνικές τους γνώσεις και το μεράκι τους για την Αστρονομία ο τεχνικός μας εξοπλισμός θα υστερούσε κατά πολύ. Τέλος η εμπιστοσύνη και η φιλοξενία που μας προσέφεραν εκ μέρους του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος. Ο κ. Πανουριάς Γιώργος, Δασάρχης και ο κ. Παπανικολάου Χρήστος, φύλακας του πανεπιστημιακού δάσους, βοήθησαν πάρα πολύ στην παραμονή μας εκεί κατά την διάρκεια νυχτερινών παρατηρήσεων.

Μισλής Δημήτρης

Φοιτητής Τμήματος Φυσικής

Τομέας Αστροφυσικής – Αστρονομίας και Μηχανικής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

Περιεχόμενα	
Πρόλογος	1

Κεφάλαιο 1^ο. Differential Image Motion Monitor

1.1	Εισαγωγή	2
1.2	Θεωρία DIMM	4
1.2.1	ESO METHOD	4
1.2.2	Αρχή Λειτουργίας της Μεθόδου ESO – DIMM και εξοπλισμός.....	7
1.3	Hartman Differential Image Motion Monitor (H – DIMM)	11

Κεφάλαιο 2^ο. Μετρήσεις του Seeing με την μέθοδο H – DIMM

2.1	Μετρήσεις Seeing – Εισαγωγή	13
2.2	Μετρήσεις Seeing στο Εθνικό Αστεροσκοπείο	14
2.3	Συμπεράσματα των τιμών του Κρυονερίου	24
2.4	Μετρήσεις Seeing στον Χολομώντα Χαλκιδικής	26
2.5	Συμπεράσματα από τις τιμές του Χολομώντα	45
2.6	Φαινόμενα Seeing	46
2.7	Λογισμικό και τρόπος μέτρησης	54
2.8	Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ESO DIMM και H – DIMM	55

Κεφάλαιο 3^ο. Wide Angle search for Planets

3.1	Εισαγωγή	57
3.2	Ανίχνευση έξω – ηλιακών πλανητών	58
3.2.1	Μέθοδος Φασματοσκοπίας	58
3.2.2	Μέθοδος Αστρομετρίας	59
3.2.3	Μέθοδος Φωτομετρίας	59
3.3	Εξισώσεις και φυσικά χαρακτηριστικά του Συστήματος	62
3.4	Μέθοδος WASP0 – Εξοπλισμός	71
3.4.1	Εξοπλισμός – CCD	73
3.4.2	Λογισμικό – Επεξεργασία	77
3.5	Άλλες Μέθοδοι Ανίχνευσης Πλανητών	88
3.5.1	OGLE III	88
3.5.2	STARE	91
3.5.3	ASP – Arizona Search for Planets	92

Κεφάλαιο 4^ο. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

4.1	WASP0 στην Ελλάδα – Αποτελέσματα	96
4.2	Μελλοντικές Έρευνες	106
4.3	Συμπεράσματα	109
4.4	Μερικά Φιλοσοφικά Συμπεράσματα	111

Παράρτημα

Βιβλιογραφία

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά έπρεπε να ελέγξουμε την καταλληλότητα της περιοχής στην οποία θα κάναμε τις παρατηρήσεις. Αυτό μπορέσαμε να το πετύχουμε εφαρμόζοντας τη μέθοδο DIMM (Differential Image Motion Monitor) προκειμένου να αποφανθούμε για τη συμπεριφορά του τυρβώδους της ατμόσφαιρας (seeing) στην περιοχή που επιλέξαμε.

Ο επόμενος στόχος ήταν να συνεχίσουμε την έρευνα που άρχισε στο La Palma (ING) και συνεχίστηκε στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Κρυονέρι) για την ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητών με την μέθοδο WASP (Wide Angle Search of Planets).

Και οι δύο στόχοι απαιτούσαν εξειδικευμένα επιστημονικά όργανα, τα οποία εκτός από το σκοπό για τον οποίον χρησιμοποιήθηκαν αρχικά, προσέφεραν στο Εργαστήριο Αστρονομίας του Α.Π.Θ και τη δυνατότητα συμμετοχής σε μια διεθνή συνεργασία στον Τομέα της Παρατηρησιακής Αστρονομίας.

Η περιοχή στην οποία έλαβε χώρα η παρακάτω διπλωματική ήταν το πανεπιστημιακό δάσος του Ταξιάρχη της Χαλκιδικής, με υψόμετρο 900 μέτρων. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως με κριτήριο τις παραμέτρους που εξασφάλιζαν την καλή ποιότητα των παρατηρήσεων αλλά και την ύπαρξη κατάλληλων υποδομών διαμονής εκ μέρους του τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος.

Φυσικά η δουλειά στον τομέα της αναζήτησης εξωηλιακών πλανητών όχι μόνο δεν τελειώνει ποτέ, αλλά όλο και περισσότερο θα μαγεύει τους ανθρώπους. Χαίρομαι που μαζί με τους καθηγητές μου Ιωάννης Σειραδάκης και Σταύρος Αυγολούπης, μπορέσαμε να αφήσουμε μια έτοιμη υποδομή για όποιον θελήσει να συμμετάσχει στο κυνήγι της μελέτης και των καλά κρυμμένων φωτονίων, που με τόσους κόπους και περίεργες διατάξεις οργάνων προσπαθεί ο Άνθρωπος να τα φυλακίσει και να μάθει τα μυστικά τους.

Μισλής Δημήτρης
Φοιτητής Φυσικού Τμήματος Α.Π.Θ
Τομέας Αστρονομίας – Αστροφυσικής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰

Differential Image Motion Monitor

1.1 Εισαγωγή

Ο τίτλος αυτός (Differential Image Motion Monitor) είναι η επεξήγηση των αρχικών της μεθόδους DIMM. Με αυτό τον τρόπο μπορεί κανείς να μετρήσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια το τυρβώδες της ατμόσφαιρας, το οποίο διεθνώς είναι γνωστό σαν seeing των αστείων.

Το seeing είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στους αστείες λόγω της γήινης ατμόσφαιρας. Όπως ξέρουμε τα αστεία είναι σημειακές πηγές φωτός και λόγω της τεράστιας απόστασής τους από την Γη το μέτωπο κύματος της ακτινοβολίας τους ταξιδεύει στο μέσο διάστημα. Έρχεται λοιπόν σε εμάς έτσι ώστε σε κάθε σημείο του μετώπου, οι κλίσεις να είναι παράλληλες. Έπειτα διαπερνάει την ατμόσφαιρα και συλλέγεται από το τηλεσκόπιο. Σε κάθε τηλεσκόπιο όμως εμφανίζεται ένα φαινόμενο που είναι γνωστό σαν "Όριο Περίθλασης". Σε κάθε τηλεσκόπιο υπάρχει μια ελάχιστη γωνιώδης απόσταση από την οποία μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο είδωλα και να μην τα βλέπουμε σαν ένα. Αν η γωνιώδης απόσταση των ειδώλων αυτών είναι μικρότερη από το "Όριο Περίθλασης" του τηλεσκοπίου που χρησιμοποιούμε για την παρατήρηση, τα είδωλα συγχωνεύονται σε ένα. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να παρατηρήσουμε έναν διπλό αστεία με γωνιώδη απόσταση των μελών του $\omega=1''$ του τόξου και το Όριο Περίθλασης του τηλεσκοπίου μας είναι μεγαλύτερο από $1''$, τότε ποτέ δεν θα ξεχωρίσουμε τον αστεία σαν διπλό, αλλά τα μέλη του θα είναι πάντα σε συγχώνευση. Το Όριο Περίθλασης κάθε τηλεσκοπίου εξαρτάται από την διάμετρο του πρωτεύοντος κατόπτρου (ή φακού στα διοπτρικά τηλεσκόπια) και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που παρατηρούμε (οπτικά, υπέρυθρα, ακτίνες X). Η σχέση για το Όριο Περίθλασης είναι:

$$DAWES LIMIT = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (1,1)$$

που ουσιαστικά είναι η διάμετρος του δίσκου του Airy για το είδωλο του αστεία που παρατηρούμε.

Το ενδιαφέρον όμως βρίσκεται στο τι γίνεται στην πράξη. Ας ξαναδούμε το προηγούμενο παράδειγμα. Υποθέτουμε ότι θέλουμε να παρατηρήσουμε έναν διπλό αστεία που η γωνιώδης απόσταση μεταξύ των μελών του να είναι $\omega=1''$. Ας υποθέσουμε ακόμα ότι το Όριο Περίθλασης του τηλεσκοπίου που χρησιμοποιούμε είναι $\omega=1''$. Θεωρητικά θα περιμέναμε το τηλεσκόπιο να διαχωρίσει τα δύο είδωλα και να δούμε και τα δύο μέλη του διπλού συστήματος. Αυτό όμως είναι αδύνατο όταν η παρατήρηση γίνεται στην επιφάνεια της Γης ή έστω μέσα στην ατμόσφαιρά της.

Η ατμόσφαιρα της Γης παρουσιάζει κάποιες τυρβώδεις ροές οι οποίες είναι υπεύθυνες για την καταστροφή του παράλληλου μετώπου κύματος που έρχεται από

τον αστέρα. Οι τυρβώδεις ροές προέρχονται εξ αιτίας της ανωμαλίας του εδάφους της Γης και εξ αιτίας των θερμών και ψυχρών ρευμάτων που συγκρούονται στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, αν βρισκόμαστε στην πλαγιά ενός βουνού και υπάρχει άνεμος από την αντίθετη διεύθυνση, τότε η ατμόσφαιρα στο σημείο που βρισκόμαστε παρουσιάζει τυρβώδη ροή. Επίσης, όταν ο θερμός αέρας ανεβαίνει ψηλά και συγκρούεται με ψυχρά ρεύματα πάλι έχουμε τυρβώδη ροή. Τέλος, σε κάθε άλλη σύγκρουση θερμών ρευμάτων εμφανίζονται παρόμοια φαινόμενα. Ωστόσο, δεν είναι μόνο η ατμόσφαιρα που καταστρέφει το μέτωπο κύματος, αλλά και οι μικροατέλειες των οπτικών του τηλεσκοπίου, η ατελής ευθυγράμμιση ή η ατελής εστίαση. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο, όταν το τηλεσκόπιο βρίσκεται μέσα σε θόλο. Στα αστεροσκοπεία που το τηλεσκόπιο προστατεύεται από κάποια μεταλλική σκεπή, παρατηρείται συνήθως αύξηση του seeing κατά 1,00'' με 2,00''. Αυτό συμβαίνει λόγω της δομής του θόλου και των στροβιλισμών που αυτός δημιουργεί. Το φαινόμενο αυτό θα το μελετήσουμε και παρακάτω. Τέλος οι μετρήσεις του seeing είναι συνάρτηση της ώρας παρατήρησης, αλλά και της θέσης του σημείου του ουρανού που παρατηρούμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Ως γνωστόν, η επιφάνεια της Γης και η ατμόσφαιρα πάνω από τον τόπο παρατήρησης θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια την ημέρας. Μετά την δύση του ηλίου και όσο περνάει η ώρα η επιφάνεια και η ατμόσφαιρα ισορροπούν θερμικά και ψύχονται. Κατά συνέπεια τα ρεύματα δεν διαταράσσουν την ακτινοβολία που έρχεται από τους αστέρες. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η καλύτερη ώρα παρατήρησης γίνεται τις πρωινές ώρες. Επίσης είναι γνωστό ότι σε διαφορετικά ύψη το πάχος της ατμόσφαιρας είναι διαφορετικό. Είναι καλό λοιπόν, να μετράμε το seeing σε μεγάλα ύψη, κυρίως κοντά στο ζενίθ, ώστε το πάχος της ατμόσφαιρας να είναι το ελάχιστο δυνατό. Είναι γεγονός όμως ότι τον κύριο ρόλο τον παίζει η ατμόσφαιρά. Γι' αυτό απαραίτητη προεργασία για την επιλογή περιοχής όπου θα στηθεί κάποιο τηλεσκόπιο ή θα χτιστεί κάποιο αστεροσκοπείο, είναι να ελέγξουμε το seeing που εμφανίζει στους αστέρες. Πρέπει δηλαδή να ελέγξουμε κατά πόσο είναι κατάλληλη για αστρονομικές παρατηρήσεις.

1.2 Θεωρία DIMM

Κατά καιρούς οι αστρονόμοι επινοούσαν πολλούς τρόπους για να μετρούν το seeing των αστέρων, αλλά αντιμετώπιζαν πολλά προβλήματα με αυτές τις μεθόδους. Απαραίτητη προϋπόθεση για την μέτρηση του seeing είναι η ύπαρξη τηλεσκοπίου που συνεπάγεται ύπαρξη αστεροσκοπείου. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι οι μετρήσεις seeing για να έχουν πρακτική αξία επιβάλλεται να προηγούνται το χτίσιμο του αστεροσκοπείου. Είναι επιτακτική ανάγκη να μετρήσουμε το seeing των αστέρων με μια διάταξη διαφορετική απ' αυτήν που χρησιμοποιούσαν τα μεγάλα τηλεσκόπια των διαφόρων αστεροσκοπείων.

1.2.1 ESO METHOD

Οι F. Roddier και M. Sarazin από την ESO (University of Hawaii – Institute for Astronomy και European Southern Observatory αντίστοιχα) προτείνανε μια πάρα πολύ ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα της μέτρησης του seeing. Η θεωρία υποστηρίζει ότι το μέτωπο κύματος $z(x, y)$ είναι συνάρτηση του σφάλματος της φάσης του μετώπου του κύματος και δίνεται από την σχέση:

$$z(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x, y) \quad (1,2)$$

η συνάρτηση $a(x, y)$ που δίνει την γωνία πρόσπτωσης στον x άξονα δίδεται από την σχέση

$$a(x, y) = -\frac{\partial}{\partial x} z(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) \quad (1,3)$$

έτσι η απόκλιση από τον μέσο όρο της συνάρτησης $a(x, y)$ είναι

$$B_a(\xi, \eta) = \langle a(x, y), a(x + \xi, y + \eta) \rangle \quad (1.4)$$

έτσι από τις σχέσεις (1.4) και (1.3) παίρνουμε

$$B_a(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} B_\phi(\xi, \eta) \quad (1.5)$$

καταλήγοντας, εξάγουμε την εξίσωση της φασικής επιφάνειας του κύματος

$$D_\phi(\xi, \eta) = 2[B_\phi(0, 0) - B_\phi(\xi, \eta)] \quad (1.6)$$

έτσι οι εξισώσεις (1.5) και (1.6) δίνουν

$$B_{\phi}(\xi, \eta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} D_{\phi}(\xi, \eta) \quad (1.7)$$

από την θεωρία του Kolmogorov για την τυρβώδη ροή ισχύει ότι

$$D_{\phi}(\xi, \eta) = 6.88 \left(\frac{r}{r_o} \right)^{5/3} \quad (1.8)$$

όπου $r = (\xi^2 + \eta^2)^{1/2}$ και $r_o = (6.88/A)^{3/5}$ (σταθερά του Fried (1987)), ενώ η A είναι μια άλλη σταθερά που εξαρτάται από τον οπτικό δρόμο και την τιμή της τυρβώδους ροής. Αναλύοντας την σχέση (1.7) παίρνουμε

$$B_a(\xi, \eta) = 0.087 \lambda^2 r_o^{-5/3} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} (\xi^2 + \eta^2)^{5/6} \Rightarrow$$

$$B_a(\xi, \eta) = 0.145 \lambda^2 r_o^{-5/3} \left[(\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} - \frac{1}{3} \xi^2 (\xi^2 + \eta^2)^{-7/6} \right] \quad (1.9)$$

για $\eta=0$ παίρνουμε την απόκλιση από τον μέσο όρο κατά την διεύθυνση της κλίσης σε απόσταση $\xi=d$

$$B_l(d) = 0.097 \left(\frac{\lambda}{r_o} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \quad (1.10)$$

αντίστοιχα για $\xi=0$ παίρνουμε μια ανάλογη συνάρτηση για διεύθυνση κάθετη στην κλίση απόστασης $\eta=d$

$$B_t(d) = 0.145 \left(\frac{\lambda}{r_o} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \quad (1.11)$$

και αν $\eta=0$ και $\xi=0$ τότε οι θεωρίες Kolmogorov και Fried δίνουν

$$B_a(0,0) = 0.179 \left(\frac{\lambda}{r_o} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{D} \right)^{1/3} \quad (1.12)$$

όπου το D είναι οι διάμετροι των οπών από όπου περνάει το κύμα. Τώρα μπορούμε να βρούμε μια πιο απλή εξίσωση με την οποία θα υπολογίζουμε εύκολα το seeing. Αν λάβουμε υπόψη την εξίσωση (1.6) παρατηρούμε ότι το σφάλμα στις θέσεις ενός φωτεινού αντικειμένου δίνεται από την σχέση

$$\sigma^2(d) = 2(B(0) - B(d)) \quad (1.13)$$

όταν αυτό περνάει από οπές που έχουν απόσταση d . Άρα το σφάλμα στην παράλληλη διάσταση δίνεται από τις εξισώσεις (1.10) και (1.13).

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_o^{-5/3} (0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}) \quad (1.14)$$

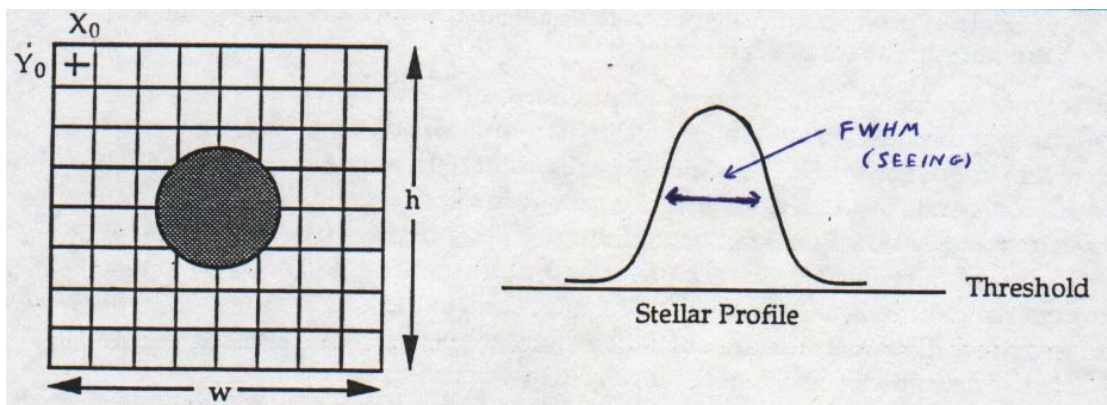
ενώ το σφάλμα στη κάθετη διάσταση δίνεται από τις εξισώσεις (1.11) και (1.13)

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_o^{-5/3} (0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}) \quad (1.15)$$

Αυτό που πετύχαμε μέχρι στιγμής είναι το εξής. Βρήκαμε πως όταν μια φωτεινή δέσμη προέρχεται από το διάστημα, περνά από την ατμόσφαιρα της Γης και συλλέγεται με μια διάταξη που αποτελείται από δύο οπές διαμέτρου D και απόστασης d , εμφανίζει σφάλμα στις θέσεις των ειδώλων και στις δύο διευθύνσεις (κατά x και κατά y). Επίσης υπολογίσαμε ότι τα σφάλματα αυτά είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του φωτός, της διαμέτρου D των οπών, της απόστασης d των οπών και της σταθεράς του Fried r_o . Αξιοσημείωτο όμως είναι ότι αν έχουμε μια εικόνα ενός αστέρα τότε το seeing του είναι ίσο με το FWHM της Γκαουσιανής κατανομής της έντασης του αστέρα και μάλιστα ισχύει (Dierickx, 1988) (εικόνα 1.1).

$$seeing = FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_o} \quad (1.16)$$

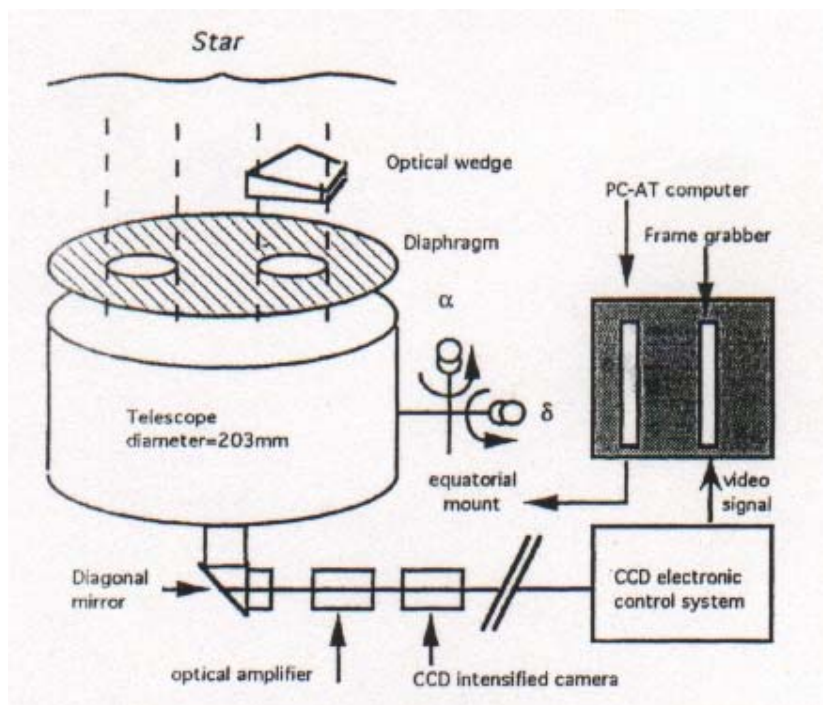
Αυτή είναι μια πολύ σημαντική εξίσωση. Αν μπορούσαμε να μετρήσουμε την σταθερά του Fried, r_o δεν θα είχαμε κανένα πρόβλημα, αλλά δεν μπορούμε. Παρόλα αυτά μπορούμε με έναν καλό ανιχνευτή να μετράμε τις μεταβολές στις θέσεις των ειδώλων κάθε στιγμή και από τις σχέσεις (1.14) και (1.15) να υπολογίζουμε έμμεσα την τιμή του r_o και κατά συνέπεια του seeing.



Εικόνα 1.1 Το FWHM από την καμπύλη ενός αστέρα ορίζεται σαν seeing (δεξιά). Στο αριστερό μέρος βλέπουμε πως καταχωρείται ο αστέρας σε συντεταγμένες CCD.

1.2.2 Αρχή Λειτουργίας της Μεθόδου ESO-DIMM και Εξοπλισμός

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής είναι πολύ απλή. Το κύριο όργανο είναι ένα τηλεσκόπιο που συνδέεται με μία CCD κάμερα. Μπροστά από τον σωλήνα του τηλεσκοπίου τοποθετούμε μια ειδικά κατασκευασμένη μάσκα. Η μάσκα αυτή έχει δύο οπές ίδιας διαμέτρου σε ορισμένη απόσταση. Στην μία από τις δύο οπές τοποθετούμε ένα πρίσμα εκτροπής της φωτεινής δέσμης, περίπου 20 arcsec. Αυτό σημαίνει ότι αν στοχεύσουμε έναν αστέρα και ρυθμίσουμε το τηλεσκόπιο ώστε να είναι εστιασμένο στον αστέρα, τότε θα παρατηρούμε δύο είδωλα με γωνιώδη απόσταση περίπου 20 arcsec (εικόνα 1.2).

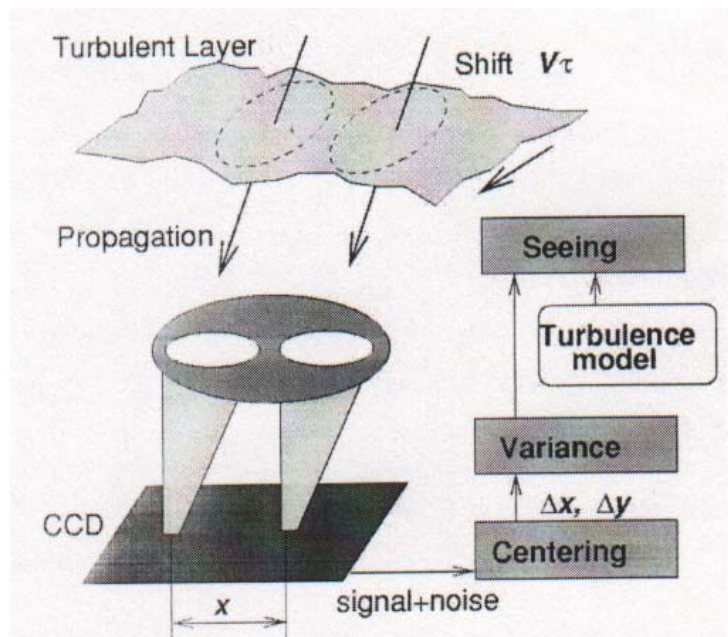


Εικόνα 1.2. Το τηλεσκόπιο που χρησιμοποίησε η μέθοδος DA/IAC DIMM και το ειδικό "καπάκι". Εξαιτίας του πρίσματος εκτροπής η αρχική δέσμη από τον αστέρα διαχωρίζεται σε δύο υποδέσμες.

Έπειτα η CCD κάμερα παίρνει διαδοχικά frames με τα δύο είδωλα του ίδιου αστέρα. Η CCD αναγνωρίζει τα δύο αστέρια σαν δύο δίσκους που τα κέντρα τους έχουν μέγιστη τιμή έντασης. Στο πρωτεύον chip της CCD, κάθε pixel έχει κάποιες συντεταγμένες στο επίπεδο του chip. Επειδή η κατανομή της έντασης των αστέρων έχει ένα και μοναδικό μέγιστο στην CCD αυτό σημαίνει ότι κάθε στιγμή μπορούμε να γνωρίζουμε τις συντεταγμένες των θέσεων των αστέρων (εικόνα 1.1). Έτσι από frame σε frame μπορούμε με μια απλή διαδικασία να γνωρίζουμε το σχετικό σφάλμα στις θέσεις των αστέρων, τόσο κατά τον χ άξονα όσο και κατά τον ψ . Επίσης είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε εμείς την μάσκα με τις δύο οπές για να γίνουν πιο αξιόπιστες οι παρατηρήσεις. Άρα ξέρουμε την διάμετρο των δύο οπών D , αλλά και την απόσταση μεταξύ τους d . Φυσικά το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που παρατηρούμε και καταγράφουμε βρίσκεται στο οπτικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ταυτίζεται με εκείνο στον οποίο είναι ευαίσθητη η CCD και δίνεται από τον κατασκευαστή της.

Ας ξαναγυρίσουμε στις εξισώσεις (1.14) και (1.15) και ας δούμε το φαινόμενο ολοκληρωμένο. Το σήμα από τον αστέρα περνάει από την ατμόσφαιρα η

οποία το αλλοιώνει σημαντικά. Έπειτα περνάει από την μάσκα με τις δύο οπές. Από την πρώτη περνάει χωρίς καμιά αλλαγή στην διεύθυνση διάδοσης, ενώ από την δεύτερη, λόγω του πρίσματος απόκλισης της δέσμης, έχουμε μια ελαφρά απόκλιση κατά 20 arcsec. Έτσι, όταν εστιάζουμε το τηλεσκόπιο παρατηρούμε δύο είδωλα στην κύρια εστία. Στη συνέχεια τα δύο είδωλα καταγράφονται από μια CCD κάμερα. Η κάμερα, όπως είπαμε πριν, έχει την δυνατότητα να μετράει το σχετικό σφάλμα των δύο αστέρων και στις δύο διαστάσεις. Έτσι από τις εξισώσεις (1.14) και (1.15) μπορούμε να υπολογίσουμε την σταθερά του Fried r_0 για κάθε διάσταση και σε κάθε frame. Τέλος από την εξίσωση (1.16) και αφού πια γνωρίζουμε όλες τις παραμέτρους, εξάγουμε το seeing του αστέρα και στις δύο διαστάσεις (εικόνα 1.3).

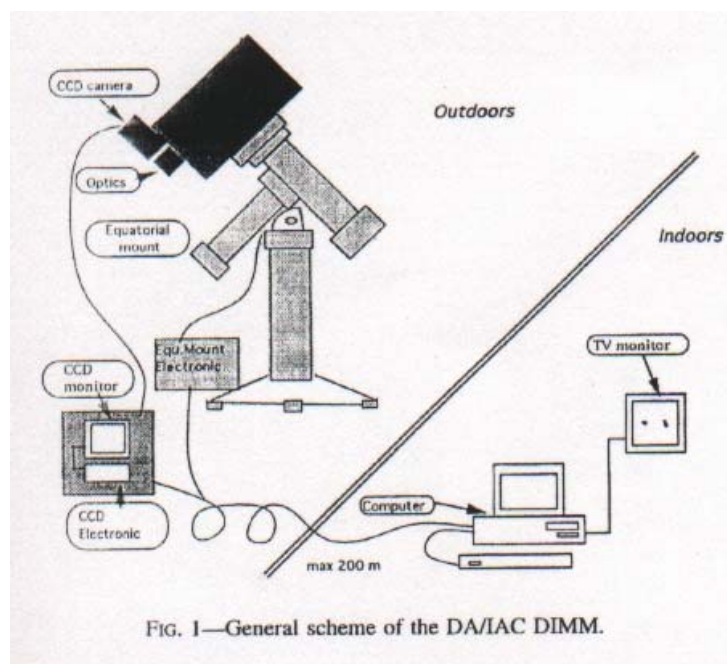


Εικόνα 1.3. Το μέτωπο κύματος έρχεται “κατεστραμμένο” στην μάσκα του τηλεσκοπίου και διαχωρίζεται σε δύο δέσμες. Έτσι έχουμε δύο είδωλα του ίδιου αστέρα πάνω στην CCD και όταν αφαιρεθεί ο θόρυβος της κάμερας μετριέται η Δx και Δy μεταβολή και εξάγεται η τιμή του seeing.

Τονίσαμε πριν ότι το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου DIMM έγκειται στο γεγονός πως μπορεί να μετράει το seeing πριν την τοποθέτηση κάποιου μεγάλου τηλεσκοπίου ή και αστεροσκοπείου. Αυτό συμβαίνει γιατί το κύριο όργανο που χρησιμοποιεί η μέθοδος είναι ένα φορητό τηλεσκόπιο 8-11” το οποίο μπορεί να μεταφέρεται εύκολα από περιοχή σε περιοχή και να μετράει συστηματικά το seeing. Ένα μικρό τηλεσκόπιο αν και μεταφέρεται πολύ εύκολα μπορεί να παρουσιάζει και κάποια προβλήματα, όπως το χαρακτηριστικό “τράνταγμα” από δυνατό άνεμο. Φυσικά κάτι τέτοιο δεν είναι πρόβλημα για την διεξαγωγή του DIMM διότι η CCD κάμερα, ακόμα και να αλλοιωθούν τα είδωλα από τον άνεμο, θα αναγνωρίσει πάλι δύο μέγιστα. Εξάλλου, επειδή μετράμε το σχετικό σφάλμα της θέσης των δύο αστέρων, κάθε μικρό – τράνταγμα από αέρα ή από ο,τιδήποτε άλλο εξαλείφεται αφού θα είναι ίδιο και για τα δύο είδωλα.

Οι Jean Vermin και Casiana Munoz - Tunon από τα Department d’ Astrophysique de l’ Université de Nice και Instituto de Astrofísica de Canarias αντίστοιχα ήταν από τους πρώτους που “έστησαν” μια τέτοια διάταξη μέτρησης του seeing με την μέθοδο DA/IAC DIMM. Αυτοί λοιπόν προτείνουν τον παρακάτω εξοπλισμό.

Telescope Type : 8'' (20cm) Schmidt – Cassegrain (Celestron)
 Telescope Diameter : 203 mm
 Telescope Focal Length : 2000 mm
 Twin Pupil Diameter : 60 mm
 Distance Between Pupils: 140 mm
 Prism Deviation Angle : ~ 30 arcsec



Εικόνα 1.4. Η διάταξη που χρησιμοποιεί η μέθοδος DA/IAC DIMM

Η CCD κάμερα που χρησιμοποιήθηκε δεν επελέγη τυχαία. Για να μπορεί το λογισμικό να κάνει τους κατάλληλους υπολογισμούς είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας πολύ καλός διαχωρισμός των δύο ειδώλων. Έτσι δε θα υπάρχει καμιά αμφιβολία ότι πρόκειται για δύο κεντροειδή μέσα σε κάθε frame που παίρνει η κάμερα. Για τις διαστάσεις που έχουν τα pixel των CCD σήμερα καλός διαχωρισμός θεωρείται τα 20 – 30 pixel μεταξύ των δύο κέντρων των ειδώλων. Με απλούς υπολογισμούς και δεδομένο ότι η μέθοδος DA/IAC DIMM χρησιμοποιούσε κάμερα με διαστάσεις pixel 23x23 μm βρίσκουμε τον διαχωρισμό των ειδώλων πάνω στο chip της κάμερας.

$$\sin 30 \text{ arc sec} = \frac{\text{separation}}{2000 \text{ mm (focal length)}} \Rightarrow$$

$$\text{separation} = 0,29 \text{ mm} = \frac{0,29 \text{ mm}}{23 \mu\text{m (pixel size)}} \cong 13 \text{ pixels}$$

Παρατηρούμε ότι θα μπορούσαν να πετύχουν και καλύτερο διαχωρισμό. Από όλα αυτά συμπεραίνουμε ότι ένα κριτήριο για να διαλέξουμε την κατάλληλη CCD κάμερα είναι το μέγεθος των pixels της σε συνδυασμό με την εστιακή απόσταση του τηλεσκοπίου που διαθέτουμε. Δεν είναι όμως μοναδικό κριτήριο. Αφού συζητάμε για φορητά τηλεσκόπια θα έχουμε ένα πολύ μεγάλο πρόβλημα με την σωστή του οδήγηση. Επειδή σε κανένα τηλεσκόπιο δεν μπορούμε να κάνουμε τέλεια πολική ευθυγράμμιση, το είδωλο με το πέρασμα του χρόνου θα έχει βγει από το πεδίο της

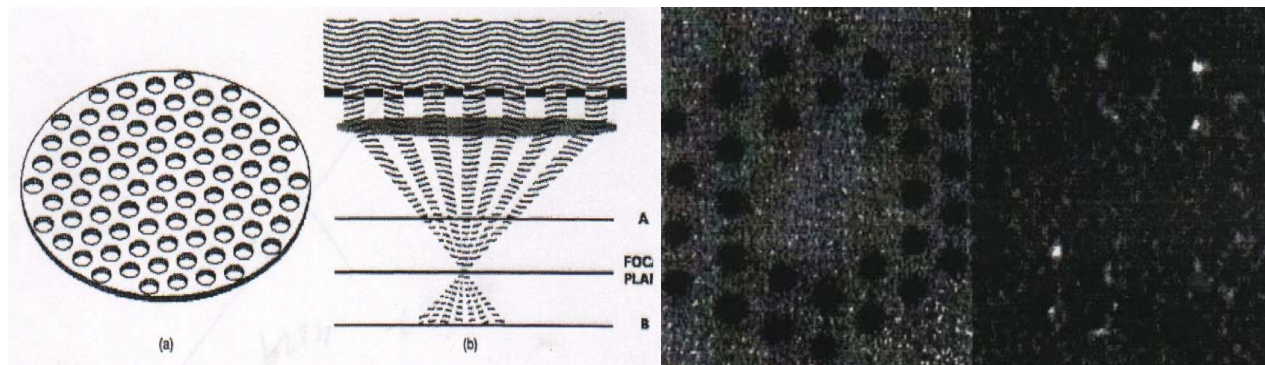
κάμερας και η μέτρηση θα σταματήσει. Μάλιστα στην συγκεκριμένη περίπτωση που τα chip των CCD είναι της τάξης των 150 – 500 μm μια μέτρια ευθυγράμμιση δεν θα κρατάει τα είδωλα παραπάνω από 5 λεπτά. Όμως και αυτό το πρόβλημα λύνεται. Πολλές CCD κάμερες είναι ταυτόχρονα και auto guiders για τα τηλεσκόπια στα οποία δουλεύουν. Όταν η κάμερα παίρνει το πρώτο frame, αποθηκεύει τις συντεταγμένες ενός λαμπρού αστεριού. Από την στιγμή που αυτό αρχίζει να ξεφεύγει η κάμερα δίνει εντολή στον αστροστάτη να κινηθεί το τηλεσκόπιο, μέχρις ότου ο αστέρας πάρει τις αρχικές του συντεταγμένες. Εμείς δεν είχαμε την δυνατότητα να διαθέσουμε auto guider και εφαρμόσαμε μια διαφορετική μέθοδο ευθυγράμμισης με πολική διόπτρα. Είναι ένα σύστημα που όταν λειτουργεί σωστά κάνει σχεδόν τέλεια ευθυγράμμιση και χρησιμοποιείται σε φορητά τηλεσκόπια. Έτσι είχαμε τα είδωλα μέσα στο πεδίο για πολλές ώρες. Το τελευταίο κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης CCD είναι ο χρόνος έκθεσης. Για να είναι οι μετρήσεις που κάνουμε αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας είναι απαραίτητο όταν παίρνουμε ένα frame, προκειμένου να μετρήσουμε το seeing των αστερών αυτό να μην έχει αλλάξει κατά την διάρκεια της έκθεσης. Με απλά λόγια πρέπει να “παγώνουμε” τους αστέρες σε ότι αφορά την τυρβώδη ροή. Θα ήταν πολύ χρήσιμο να παίρναμε τόσο μικρές εκθέσεις ώστε να μην είχαμε μεταβολές κατά την διάρκεια την έκθεσης. Την λύση την έδωσε η εργασία της ESO για το DIMM. Η τυρβώδης ροή ταξιδεύει μαζί με τον αέρα. Επειδή όμως το DIMM στηρίζεται στις μετρήσεις του seeing μέσα από δύο οπτικούς δρόμους (δύο οπές) θα ήταν ιδανικό η τυρβώδης ροή να μην προλάβει το ταξίδι από την μία οπή μέχρι την άλλη κατά την διάρκεια μιας μέτρησης. Αν θεωρήσουμε ότι μια τυπική ταχύτητα του ανέμου στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας είναι περίπου 40 m/sec τότε για να διανύσει την απόσταση των δύο οπών $d=0.14\text{ m}$ θα χρειαστεί χρόνο $=3.5\text{ msec}$ που είναι και ο ελάχιστος χρόνος έκθεσης στον οποίον θα πρέπει να παίρνονται frames. Φυσικά σήμερα σχεδόν καμία CCD κάμερα δεν μπορεί να επιτύχει τόσο μικρούς χρόνους έκθεσης. Ο μικρότερος δυνατός χρόνος έκθεσης φτάνει τα 10msec. Στατιστικά όμως δεν μπορούν όλες οι τυρβώδεις ροές να αρχίζουν από την πρώτη οπή. Έτσι το seeing που παρατηρούμε είναι το πραγματικό μετά από μερικές μετρήσεις. Όλα αυτά, σε συνάρτηση με το τηλεσκόπιο που διαθέτουμε μας φανερώνουν ποια κάμερα θα ήταν η καταλληλότερη για μετρήσεις seeing.

1.3 Hartmann Differential Image Motion Monitor (H-DIMM)

Παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ESO – DIMM, που παρουσιάσαμε παραπάνω, δεν παύει να έχει και μερικά μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα αυτά δεν βρίσκονται στην θεωρία ή στα αποτελέσματα της μεθόδου, αλλά στον τρόπο διεξαγωγής των μετρήσεων και στα προβλήματα που αντιμετωπίζει κάποιος που θέλει να ξεκινήσει την μέθοδο εκ του μηδενός.

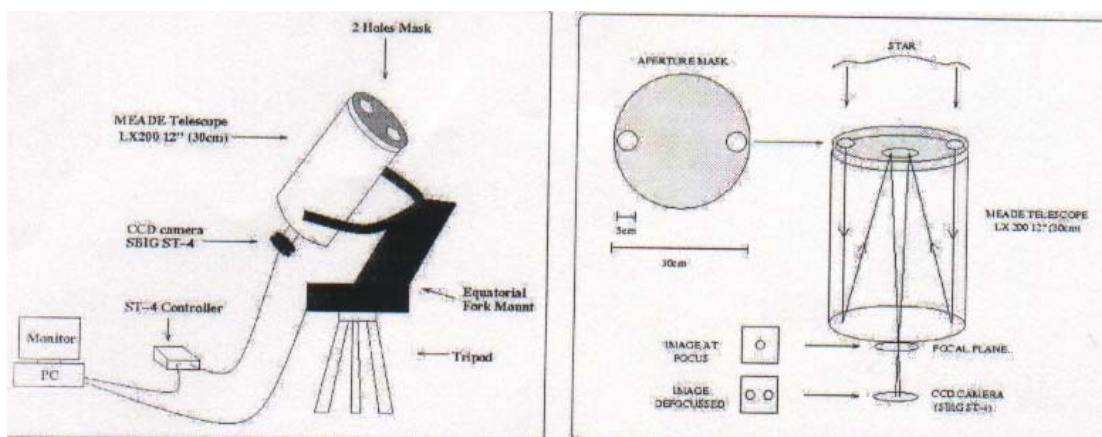
Συγκεκριμένα, λόγω των καιρικών συνθηκών κατά της διάρκειας της νύχτας σε μεγάλο υψόμετρο, είναι σχεδόν βέβαιο ότι από την υγρασία θα αρχίζει να θολώνει το πρίσμα απόκλισης που βρίσκεται στην μία από τις δύο οπές της μάσκας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική ελάττωση της έντασης του ενός ειδώλου και τη συχνή διακοπή των μετρήσεων προκειμένου να καθαρίζεται το πρίσμα. Επίσης σήμερα είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί πρίσμα απόκλισης με τόσο μικρή γωνία απόκλισης και γι’ αυτό κοστίζει πάρα πολύ.

Έτσι μπορούμε να στηριχτούμε σε μια παραλλαγή της μεθόδου ESO – DIMM, η οποία ονομάζεται Hartmann – DIMM (H – DIMM). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ίδια θεωρία με την ESO – DIMM και στο μόνο που διαφέρει είναι ο τρόπος με τον οποίον παράγει δύο είδωλα από τον ίδιο αστέρα. Ουσιαστικά το μόνο που αλλάζει είναι η μάσκα. Η μάσκα της H – DIMM είχε αρχικά πάρα πολλές οπές προκειμένου να μετρήσουμε και διάφορα άλλα στοιχεία που αφορούσαν την διεύθυνση του ανέμου και την ταχύτητά του (εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5. Αριστερή εικόνα. Η μάσκα H – DIMM και η αρχή λειτουργίας της μεθόδου.
Δεξιά εικόνα. Frame της μεθόδου H – DIMM και ένα frame από την αφαίρεση 2 επιμέρους εικόνες αστέρα διάρκειας 60 sec.

Μας αρκεί μάσκα αντίστοιχη με αυτήν της μεθόδου H – DIMM, αλλά με μία μικρή διαφορά προκειμένου να μετρήσουμε το seeing. Για εμάς μας είναι αρκετές δύο οπές διαμέτρου D για την κάθε οπή, σε απόσταση d πάνω στην μάσκα. Σε καμία όμως από τις δύο δεν υπάρχει πρίσμα απόκλισης. Είναι τελείως κενές. Η λογική και σ' αυτήν την μέθοδο είναι απλή. Η φωτεινή ακτίνα που έρχεται από τον αστέρα περνάει και από τις δύο οπές και πέφτει στο πρωτεύον κάτοπτρο (ή φακό) του τηλεσκοπίου. Αν τώρα εστιάσουμε το τηλεσκόπιο θα βλέπουμε λογικά μόνο ένα είδωλο. Αν όμως το έξω – εστιάσουμε λίγο, αμέσως θα παράγουμε τα δύο είδωλα. (εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6. Η τροποποιημένη μέθοδος H – DIMM πάνω στην οποία δουλέψαμε εμείς αλλά και το αστεροσκοπείο του Σκίνακα στην Κρήτη. Στην αριστερή εικόνα έχουμε τον εξοπλισμό της Κρήτης ενώ στην δεξιά φαίνεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου H – DIMM. Το είδωλο καθώς περνάει από τις δύο οπές, το έξω – εστιάζουμε και διαχωρίζεται σε δύο υποδέσμες.

Με το να έξω – εστιάσουμε το τηλεσκόπιο η άμεση συνέπεια είναι να έχουμε διαφορετική κατανομή των αστερών πάνω στην CCD. Είναι βέβαιο όμως πως όταν η

απόσταση της κύριας εστίας και της εστίας που επιθυμούμε για την H – DIMM είναι πολύ μικρή (όπως θα αποδείξουμε) τότε άνετα η κάμερα μπορεί να αναγνωρίσει δύο μέγιστα στις εντάσεις των ειδώλων και να εφαρμόσει την θεωρία. Έπειτα η διεργασία είναι παρόμοια με την μέθοδο ESO – DIMM. Το πόσο θα έξω – εστιάσουμε το τηλεσκόπιο εξαρτάται από την εστιακή του απόσταση, προκειμένου να έχουμε δύο καλά διαχωρισμένα είδωλα.

Ακόμα ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιλέγουμε εμείς πόσο θέλουμε να διαχωριστούν τα δύο είδωλα, πράγμα που δεν μπορούσαμε να κάνουμε με την μέθοδο της ESO. Από τα δεδομένα της μάσκας και της κάμερα του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στον Σκίνακα, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση W, που η CCD βγαίνει εκτός εστίας. Από την γεωμετρία του τηλεσκοπίου παρατηρούμε ότι

$$\frac{10 \text{ pixels}}{W} = \frac{d}{2f} \Leftrightarrow$$

$$W = 20 \text{ pixels} \frac{f}{d} = 1.976 \text{ mm}$$

η οποία είναι πάρα πολύ μικρή απόσταση για να χαλάσουν τα προφίλ των αστέρων πάνω στην CCD κάμερα. Επίσης, μπορούμε να βρούμε τον ελάχιστο χρόνο έκθεσης, όπως και παραπάνω. Με δεδομένο ότι η τυπική ταχύτητα του ανέμου στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι περίπου 40 m/sec, για d=14 cm θα έχουμε ελάχιστο χρόνο έκθεσης 3,5 msec, ενώ στο δικό μας λογισμικό βάλαμε την τιμή 10 msec.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Μετρήσεις του Seeing με την Μέθοδο H – DIMM

2.1 Μετρήσεις Seeing – Εισαγωγή

Οι παρατηρήσεις όπως είπαμε και στη εισαγωγή έλαβαν χώρα στο Πανεπιστημιακό Δάσος του Ταξιάρχη, στο Βουνό «Χολομώντας» στην κεντρική Χαλκιδική και σε υψόμετρο περίπου 900 μέτρα. Έγιναν όμως και διάφορες άλλες μετρήσεις από διαφορετικά μέρη της Ελλάδας, με διαφορετικές μεθόδους και με διαφορετικές συνθήκες, προκειμένου να καταλήξουμε σε διάφορα συμπεράσματα.

Αρχικά, πήραμε μετρήσεις από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών που βρίσκεται στο Κρυονέρι Κορινθίας σε υψόμετρο περίπου 900 μέτρων. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν όμοια με αυτήν της ESO, δηλαδή στην μάσκα υπήρχε πρίσμα απόκλισης της δέσμης. Το seeing μετράται σε δευτερόλεπτα της μοίρα και τα παρακάτω γραφήματα εμφανίζουν το seeing σε συνάρτηση του χρόνου παρατήρησης,

ενώ ο χρόνος σε Ιουλιανό Χρόνο. Κάτω από κάθε γράφημα seeing υπάρχουν πληροφορίες για τους μέσους όρους των τιμών σε κάθε άξονα (x και y)

2.2 Μετρήσεις Seeing στο Εθνικό Αστεροσκοπείο

Ο εξοπλισμός που είχαμε στην διάθεσή μας στο Κρυονέρι δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Τηλεσκόπιο : G11 Celestron
Διάμετρος : 11'' (27,5 cm)
Εστιακή απόσταση : 2000 mm

CCD Κάμερα : ST – 4 SBIG
Διαστάσεις pixels : 192 x 164 pixels²
Μέγεθος pixel : 13 μ m
Χρόνοι Έκθεσης : 0.01 – 300 sec

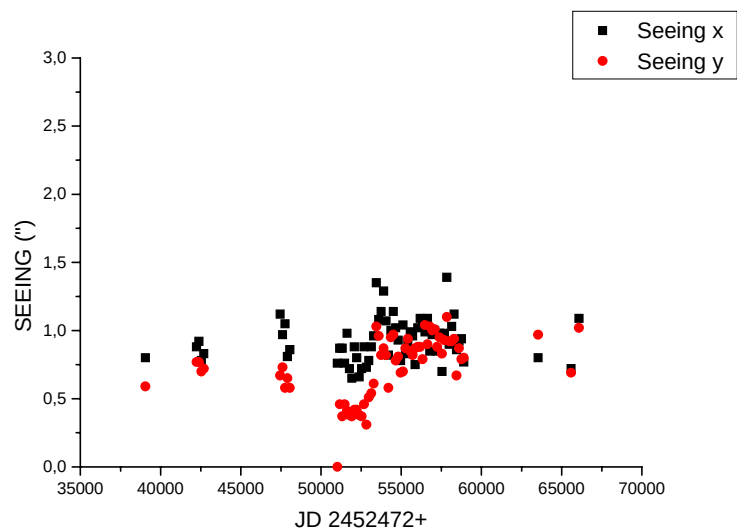
Μάσκα : δύο οπές με πρίσμα εκτροπής ~20 arcsec

PC: Pentium – Windows '98

Παρακάτω δίνονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο το Καλοκαίρι και το Φθινόπωρο του 2002

17/7/2002

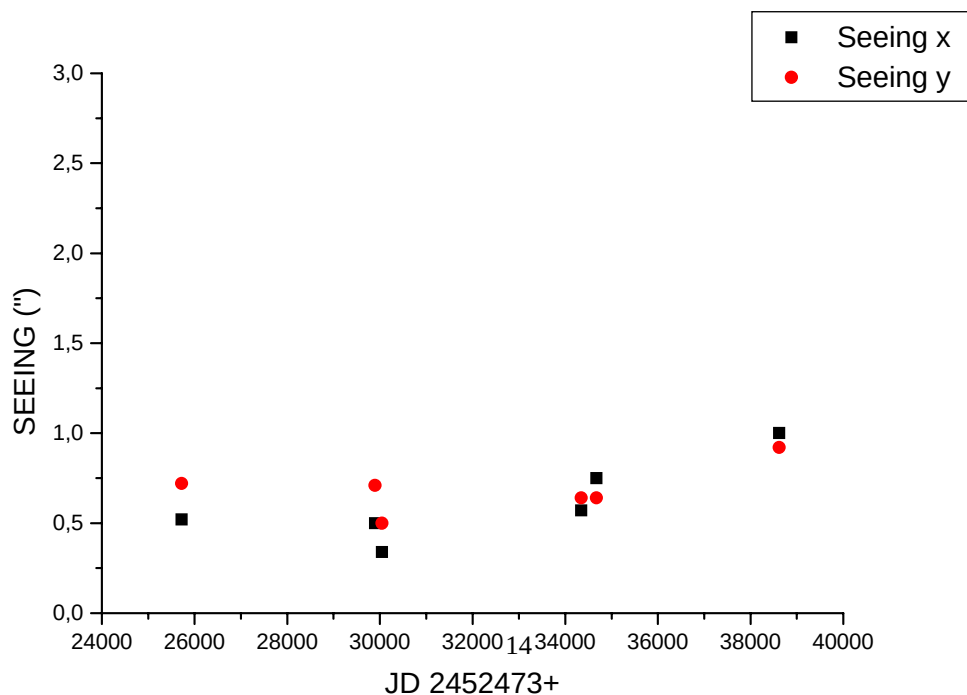
Μετρούμενος Αστέρας : α Lyr



M. O. $x = 0,93''$ και M.O. $y = 0,73''$ άρα
M.O = $0,83''$

17-18/7/2002

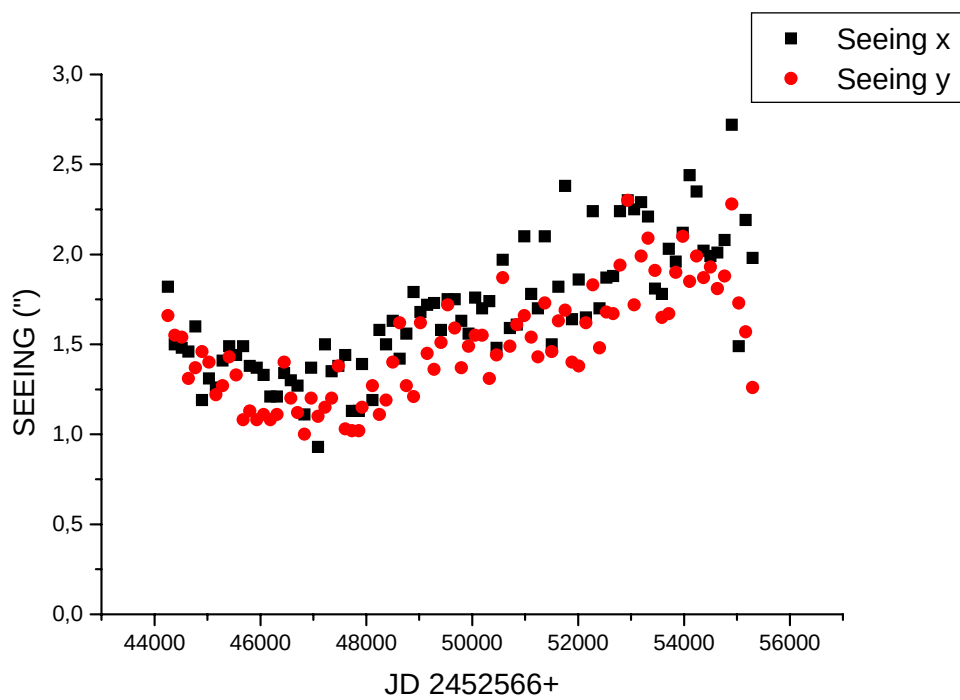
Μετρούμενος Αστέρας : Γ Cygni



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
Μ. Ο x = 0,61'' και Μ. Ο y = 0,69'' άρα
Μ. Ο = 0,65''

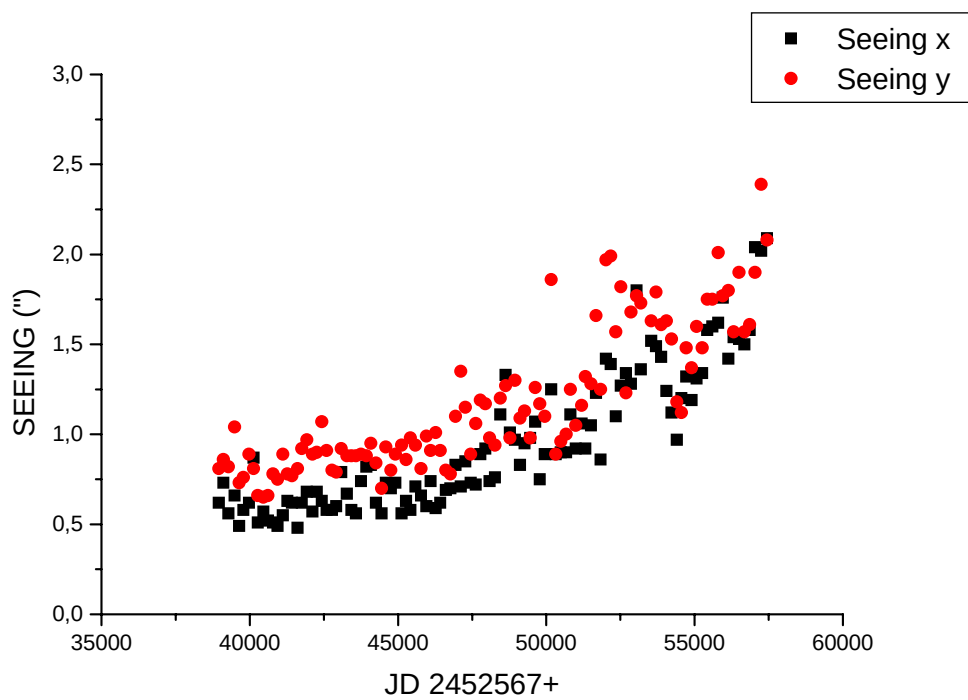
19/ 7/ 2002

Μετρούμενος Αστέρης : α Lyra



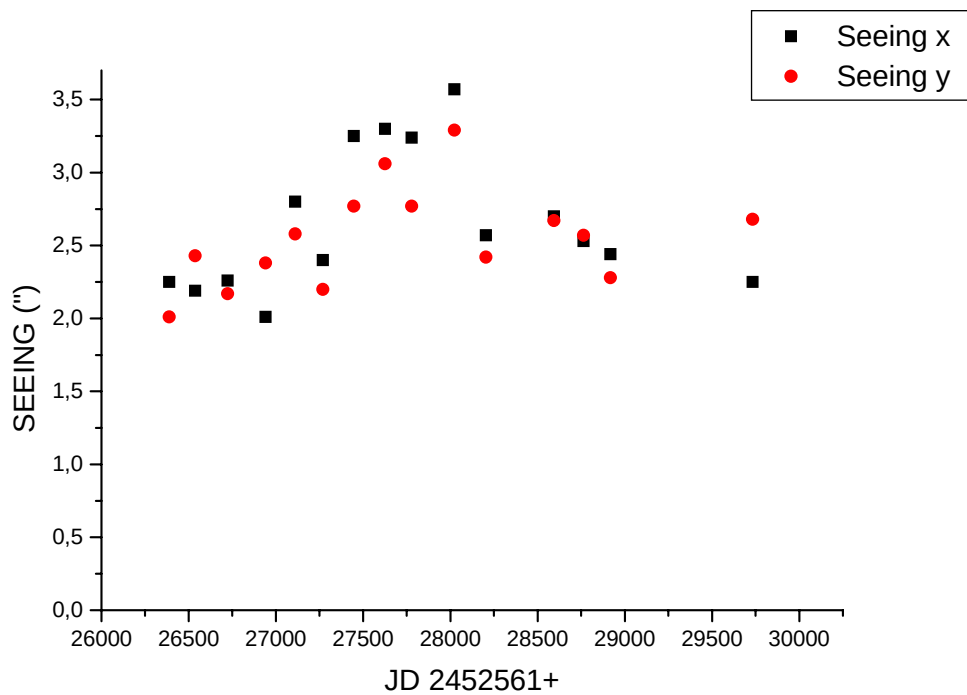
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
M. O x = 1,59'' και M. O y = 1,4'' άρα
M. O = 1,5''

20/ 7/ 2002
Μετρούμενος Αστέρης : ε UMa



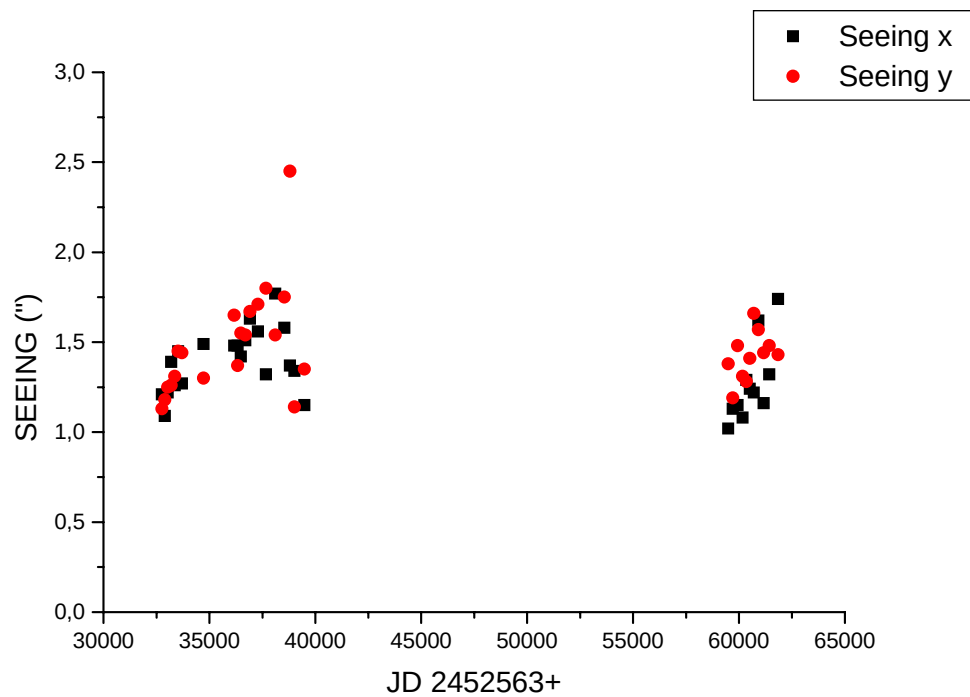
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
 Μ. Ο x = 0,95'' και Μ. Ο y = 1,18'' άρα
 Μ. Ο = 1,07''

13/ 10/ 2002
 Μετρούμενος Αστέρας : α Lyra



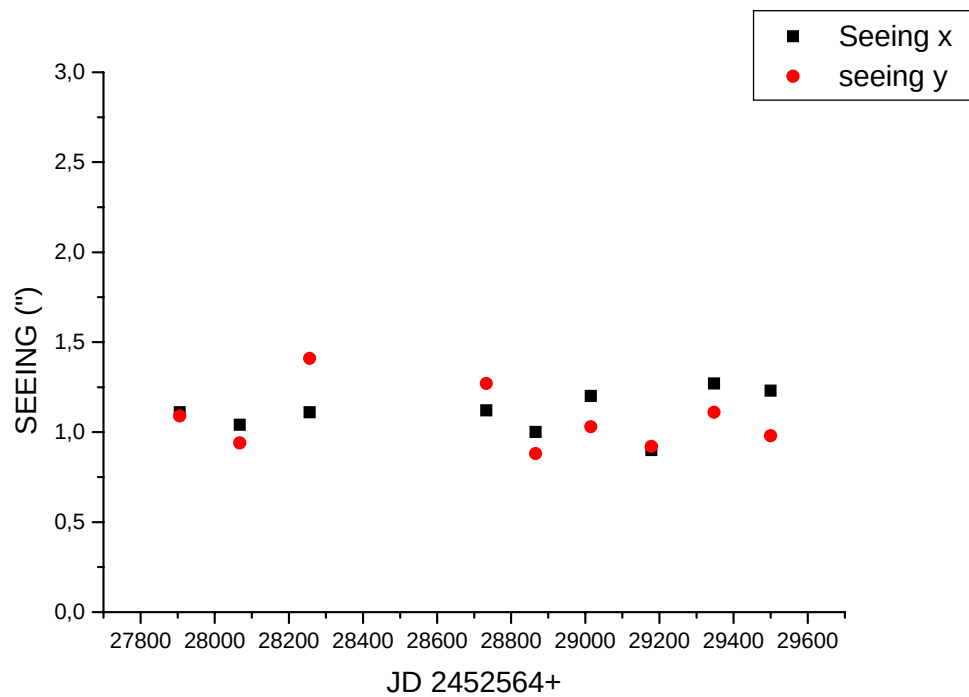
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
M. O x = 2,65'' και M. O y = 2,55'' άρα
M. O = 2,6''

15/ 10 /2002
Μετρούμενος Αστέρης : α Lyra



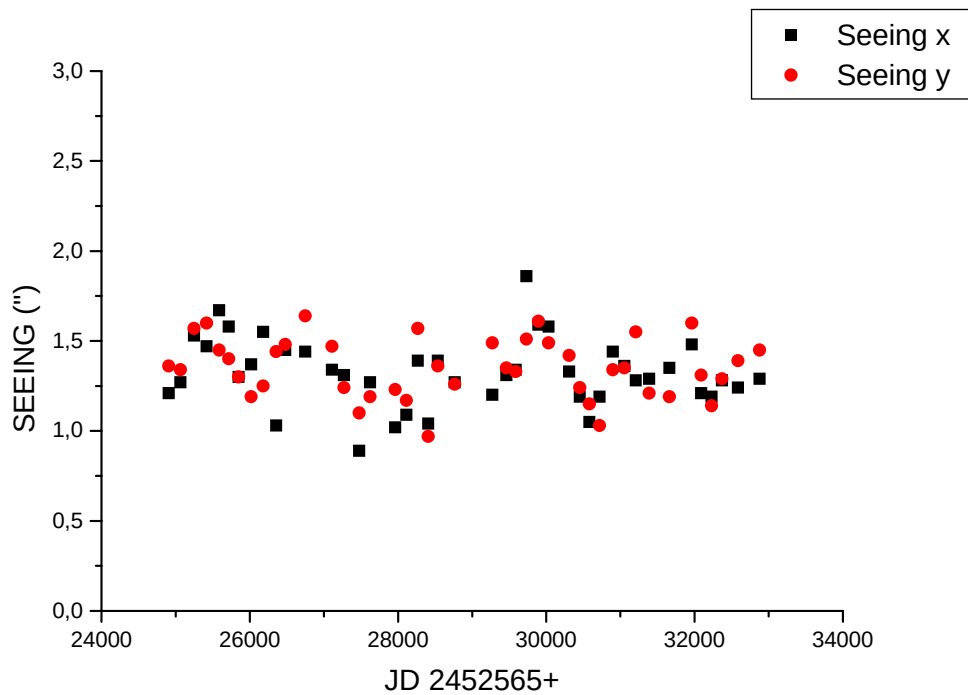
Οι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :
M. O x = 1,35'' και M. O y = 1,47'' άρα
M. O = 1,41''

16/ 10/ 2002
Μετρούμενος Αστέρης : α Cygni



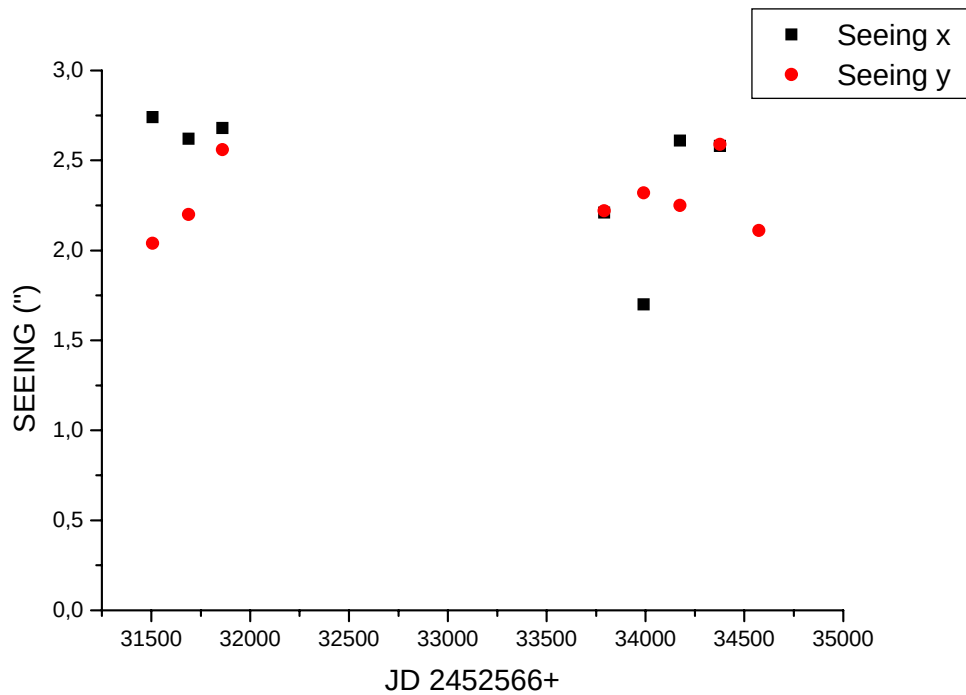
Οι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :
 Μ. Ο x = 1,11'' και Μ. Ο y = 1,07'' άρα
 Μ. Ο = 1,09''

17/ 10/ 2002
 Μετρούμενος Αστέρης : α Lyra



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :
 Μ. Ο x = 1,32'' και Μ. Ο y = 1,35'' άρα
 Μ. Ο = 1,34''

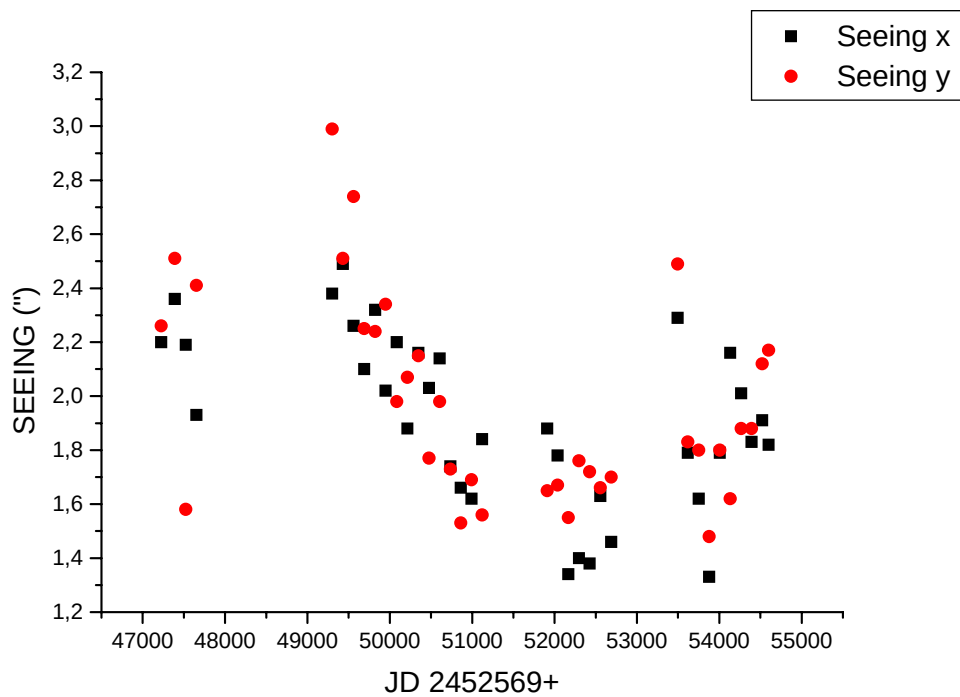
18/ 10/ 2002
 Μετρούμενος Αστέρης : α Cygni



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :
 Μ. Ο x = 2,51'' και Μ. Ο y = 2,29'' άρα
 Μ. Ο = 2,4''

22/ 10/ 2002

Μετρούμενος Αστέρας : α Lyr



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες χ και ψ είναι :
 Μ. Ο $x = 1,92''$ και Μ. Ο $y = 1,97''$ άρα
 Μ. Ο $= 1,95''$

2.3 Συμπεράσματα των τιμών του Κρυονερίου

Αυτές ήταν οι μετρήσεις που έγιναν στο Εθνικό Αστεροσκοπείο στο Κρυονέρι Κορινθίας κατά την περίοδο 17/ 7 μέχρι 22/ 10 2002. Το συμπέρασμα που βγαίνει για την περιοχή στην οποία έλαβαν χώρα οι μετρήσεις είναι ότι πρόκειται γενικά για μια περιοχή που το seeing των αστερών είναι σε γενικές γραμμές μέτριο. Αν δούμε γενικά το φαινόμενο παρατηρούμε ότι οι μέσοι όροι κατά άξονα είναι $M O x = 1,49''$ και $M. O y = 1,47''$. Συνεπώς μπορούμε να εξάγουμε μια μέση τιμή για το seeing αυτής της περιοχής το οποίο κυμαίνεται στο

$$\text{Seeing}_{\text{κρυονερίου}} = 1,48''$$

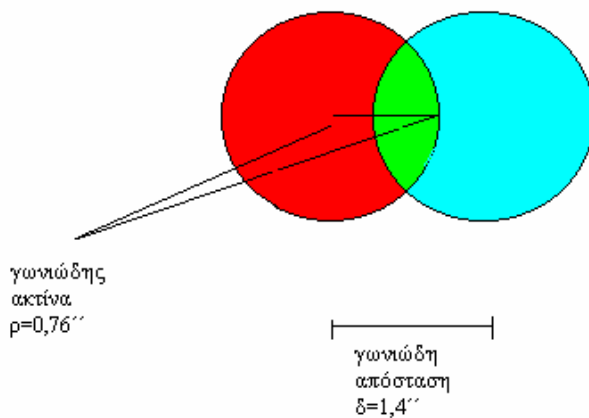
Η φυσική σημασία του seeing =1,48'' ίσως γίνει πιο κατανοητή με ένα παράδειγμα. Σύμφωνα με την εξίσωση 1.1 το όριο περίθλασης γι' αυτό το τηλεσκόπιο είναι

$$\omega = \frac{12,5}{27,5} = 0,45''$$

Αυτό σημαίνει ότι, όταν δύο αστέρες έχουν γωνιώδη απόσταση πάνω από το όριο περίθλασης του τηλεσκοπίου, που στην προκειμένη περίπτωση είναι 0,45'' τότε το όργανο έχει την δυνατότητα να ξεχωρίσει αυτούς τους δύο αστέρες. Για το παράδειγμά μας ας χρησιμοποιήσουμε τον αστέρα HD 88987. Ο αστέρας αυτός ανήκει στον αστερισμό του Λέοντα, έχει φαινόμενο μέγεθος $m=+6,6$ και είναι φασματικού τύπου A9. Επίσης, ο αστέρας αυτός στην πραγματικότητα είναι ένα διπλό σύστημα με γωνιώδη απόσταση μεταξύ των μελών του $\omega=1,4''$. Από αυτά που είπαμε προηγουμένως το τηλεσκόπιο G11 που διαθέταμε στο Κρυονέρι μπορεί άνετα να διαχωρίσει τα μέλη του διπλού αυτού συστήματος.

Όμως όλα τα παραπάνω ανήκουν στην σφαίρα της θεωρίας. Πρακτικά, δεδομένου ότι το μέσο seeing των αστερών στο Κρυονέρι είναι $S=1,48''$ δεν θα μπορέσουμε παρά να παρατηρήσουμε μόνο ένα είδωλο και όχι και τα δύο μέλη του συστήματος. Αυτή η τιμή του seeing μας φανερώνει ότι η γωνιώδης διάμετρος κάθε αστέρα που μελετάμε από εκείνη την περιοχή είναι 1,48'', άρα κάθε ακτίνα 0,74''. Έτσι και στον αστέρα HD 88987 η γωνιώδης ακτίνα κάθε αστέρα είναι 0,74'' με αποτέλεσμα ο ένας αστέρας να "φαίνεται μέσα στον άλλον". Δεν είναι λοιπόν εφικτός ο διαχωρισμός των μελών. Το παρακάτω σχήμα είναι αρκετά κατατοπιστικό (Εικόνα 2.1)

οι αστέρες σε άριστες
καιρικές συνθήκες, πλήρης
διαχωρισμός του συστήματος



Πιθανή εικόνα των ίδιων αστέρων
με $\text{seeing} = 1,48''$. Τμήματα των
αστέρων θα ταυτίζονται και έτσι
δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός
τους

εικόνα 2.1: το παραπάνω σχήμα μας δίνει μια πιο χειροπιαστή άποψη της συνέπειας του μεγάλου seeing σε διπλά συστήματα

Το “καλό” seeing είναι σημαντικό και για φαινόμενα εκτός των διπλών συστημάτων. Για παράδειγμα, όταν ερευνούμε μεταβολές στην λαμπρότητα των αστέρων και οι μεταβολές αυτές είναι πολύ μικρές, όπως θα αναφερθεί σε παρακάτω φαινόμενα, τότε οι μικρές τιμές του seeing είναι απαραίτητες για την μελέτη και την επεξεργασία. Γι’ αυτό όλα τα μεγάλα πακέτα που κάνουν επεξεργασία αστρονομικών δεδομένων έχουν ως ξεχωριστή παράμετρο το Seeing της βραδιάς που έγινε η παρατήρηση για να είναι πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα που θα εξάχθούν.

2.4 Μετρήσεις Seeing στον Χολομώντα Χαλκιδικής

Οι παρακάτω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Μάρτιο του 2003 έως τον Αύγουστο του ίδιου έτους.

Εμείς στον Χολομώντα διαθέταμε τον παρακάτω εξοπλισμό

Τηλεσκόπιο : GN-8 Celestron
Διάμετρος : 8'' (203 mm)
Εστιακή Απόσταση : 1000 mm

CCD Κάμερα : ST – 4 SBIG
Διαστάσεις pixels : 192 x 164 pixels²
Μέγεθος pixel : 13 μ m
Χρόνοι Έκθεσης : 0.01 – 300 sec

Μάσκα
Διάμετροι οπών : 5 cm
Απόσταση οπών : 14 cm

(Εικόνα Δίπλα)

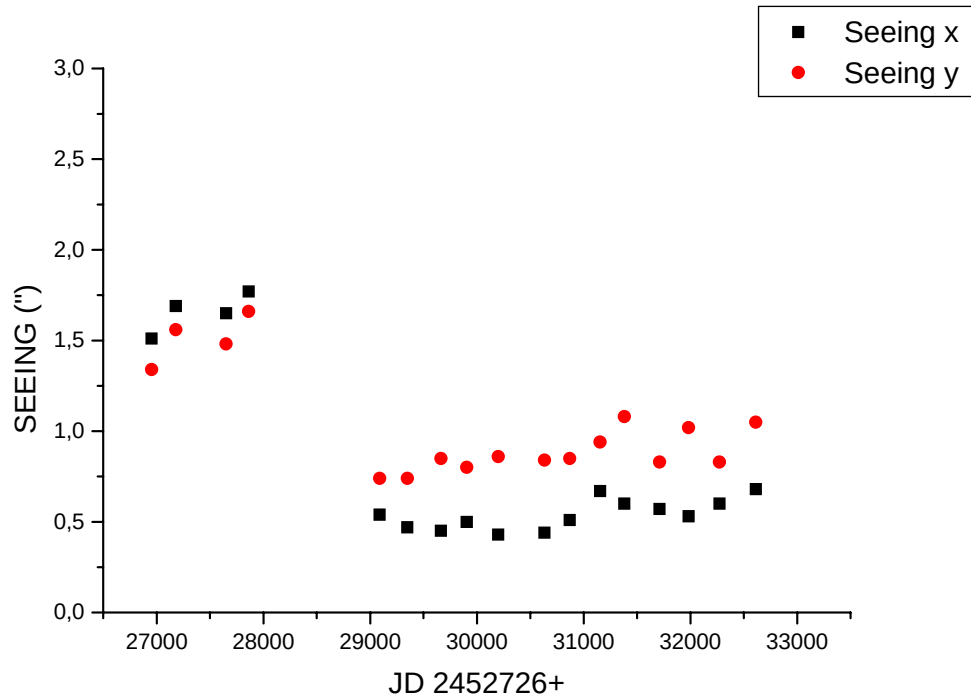


Εικόνα 1.7. Το τηλεσκόπιο GN-8 Celestron που χρησιμοποιήσαμε στον Χολομώντα, διακρίνεται η μάσκα και η ST4 CCD

ενώ στο Εθνικό Αστεροσκοπείο όλες οι μετρήσεις έγιναν βάση της μεθόδου της ESO, στον Χολομώντα αποφασίσαμε να δοκιμάσουμε την μέθοδο H – DIMM. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων δίνονται στα παρακάτω γραφήματα.

27/ 3/ 2003

Μετρούμενος αστέρας: α Gem



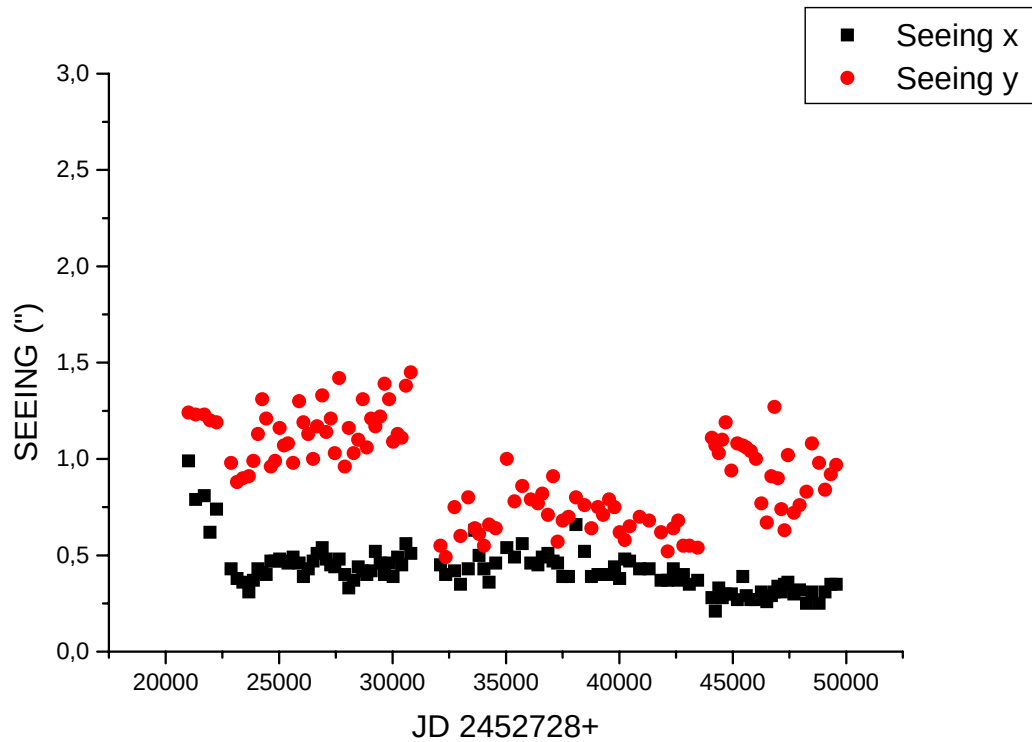
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 0,80'' και M. O y = 1,03'' άρα

M. O = 0,92''

29/ 3/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Gem



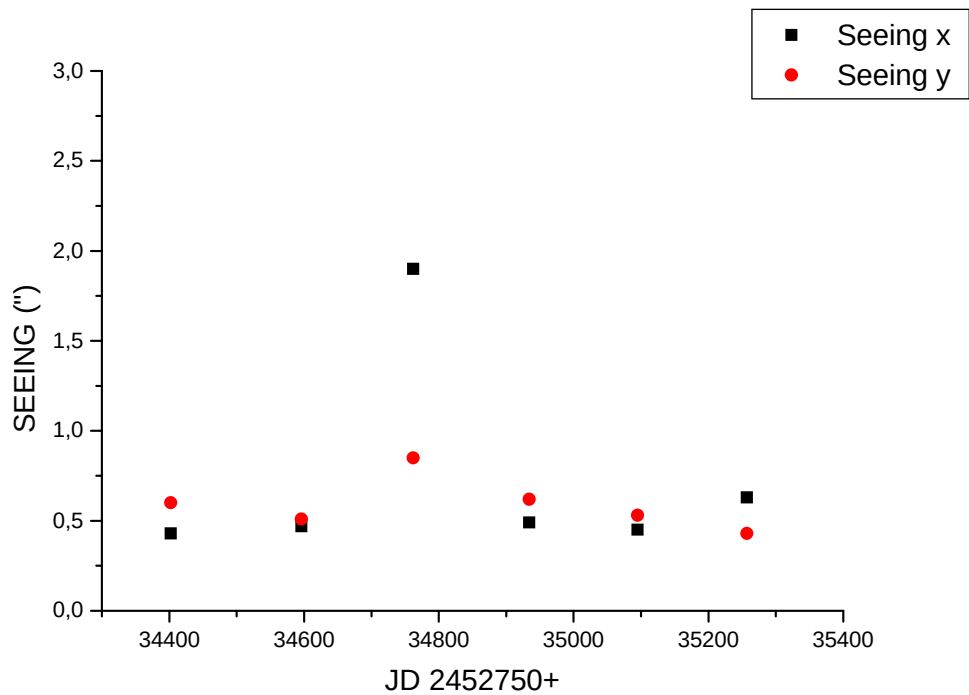
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 0,42'' και M. O. y = 0,93'' άρα

M. O = 0,68''

20/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



Οι μέσοι όροι για κάθε άξονα κατά άξονες x και y είναι:

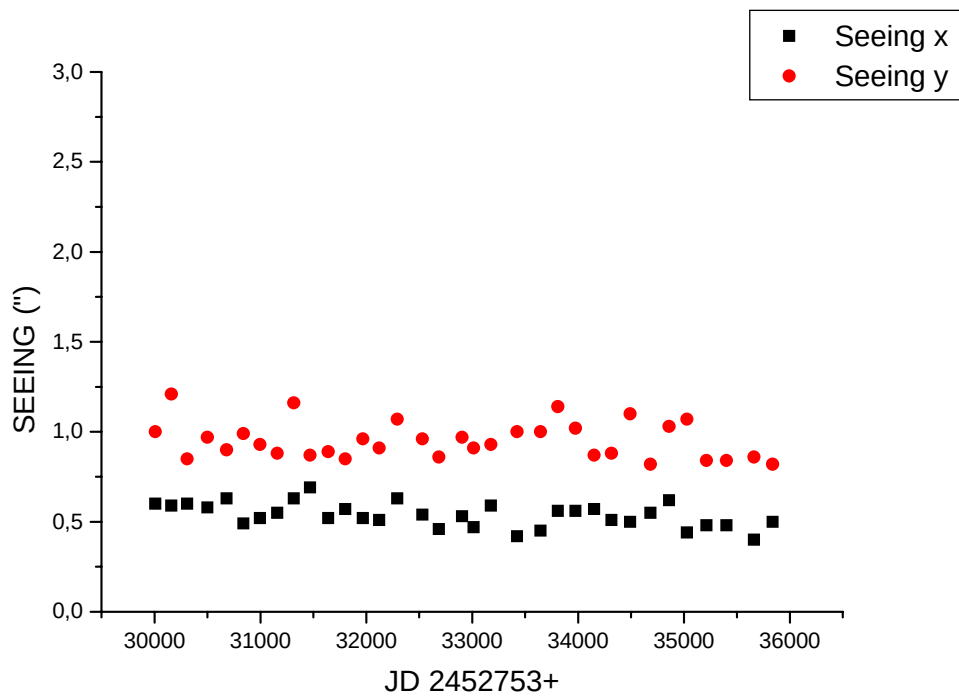
M. O x = 0,73'' και M. O y = 0,59. Άρα

M. O = 0,66''.

Το ενδιαφέρον σ' αυτό το γράφημα παρατηρείται στο μέσο περίπου του άξονα του χρόνου. Στην τιμή JD=2452750.34800 έχουμε μια ραγδαία αύξηση του seeing που αμέσως ελαττώνεται. Αυτή η απότομη αύξηση οφείλεται σε ένα αραιό σύννεφο που έτυχε να περνάει μπροστά από τον αστέρα εκείνη την στιγμή και το καταγράψαμε. Βλέπουμε λοιπόν μ' ένα ξεκάθαρο τρόπο πως επιδρά η ατμόσφαιρα στο seeing των αστερών.

23/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : β Gem



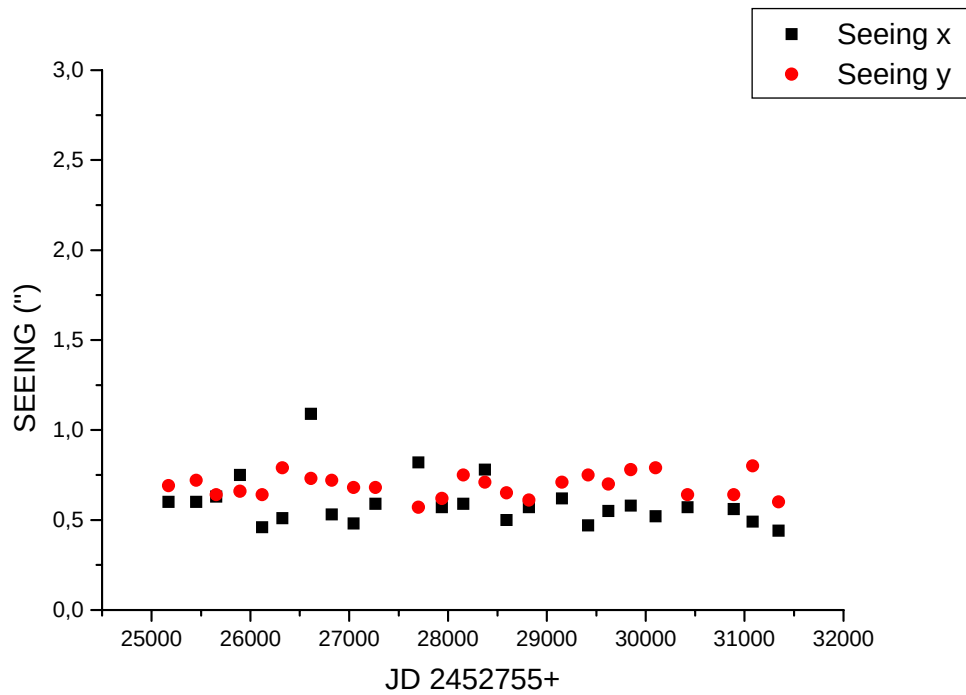
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι των μετρήσεων κατά άξονα είναι:

M. O $x = 0,54''$ και M. O $y = 0,95''$. Άρα

M. O $= 0,74''$

25/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



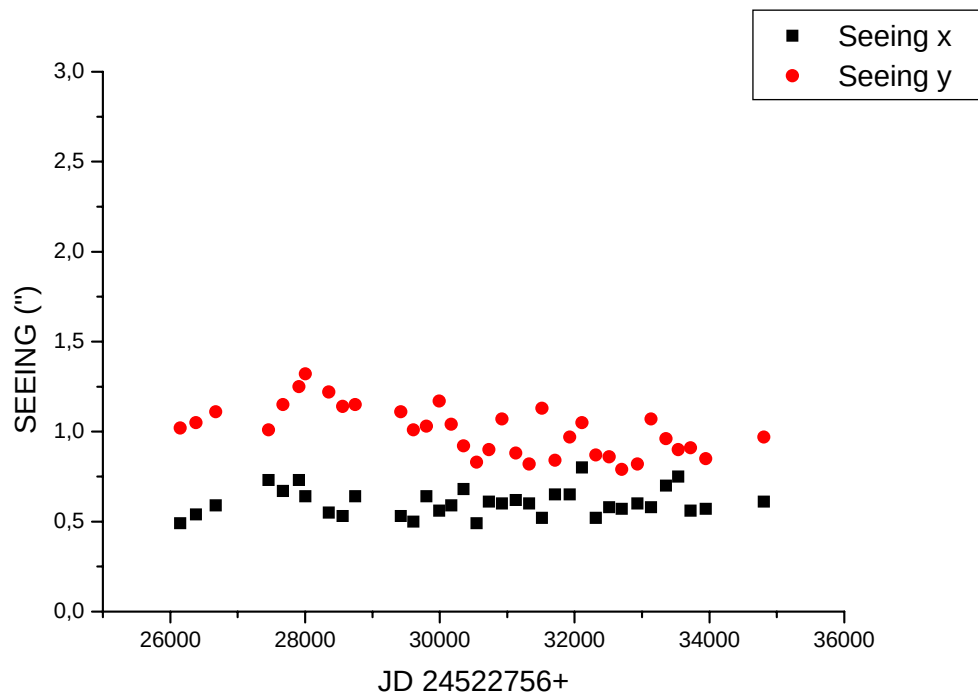
Οι μέσοι όροι των μετρήσεων κατά άξονες x και y είναι:

M. O $x = 0,59''$ και M. O $y = 0,69''$. Άρα

M. O $= 0,64''$

26/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρης : β Gem



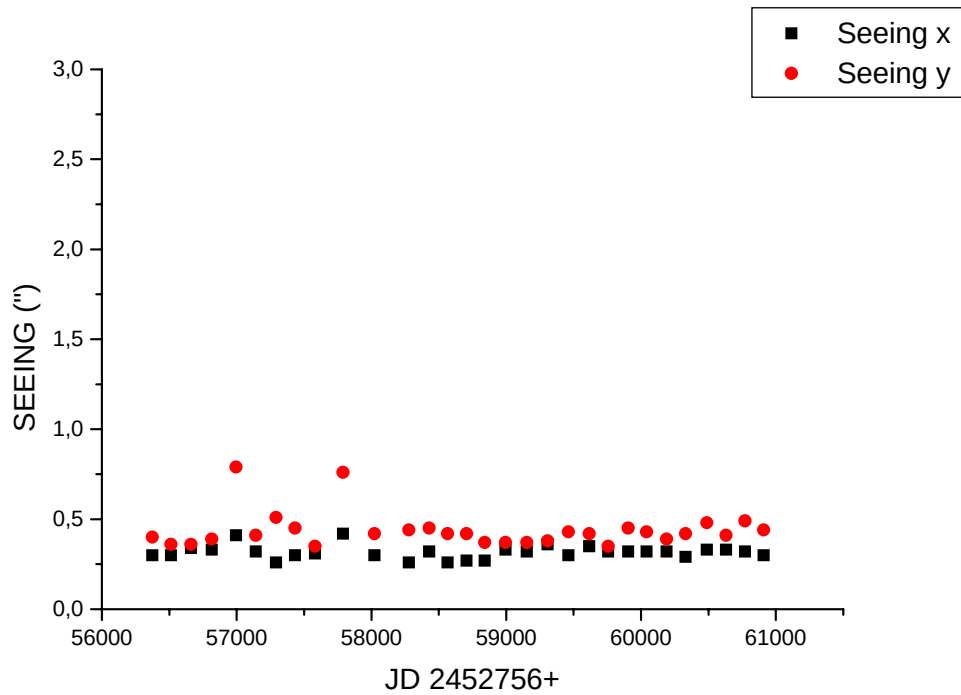
Οι μέσοι όροι των μετρήσεων κατά άξονες x και y είναι:

M. O x = 0,61'' και M. O y = 1,01''. Άρα

M.O = 0,81''

27/ 4/ 2003

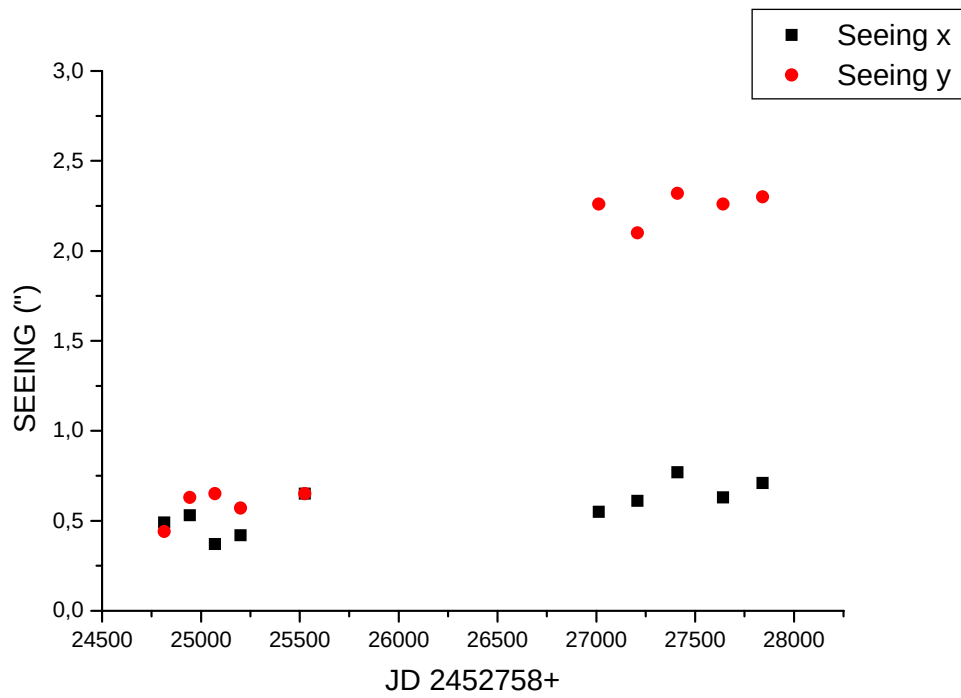
Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
Μ. Ο x = 0,32'' και Μ. Ο y = 0,44''. Άρα
Μ. Ο = 0,38''

28/ 4/ 2003

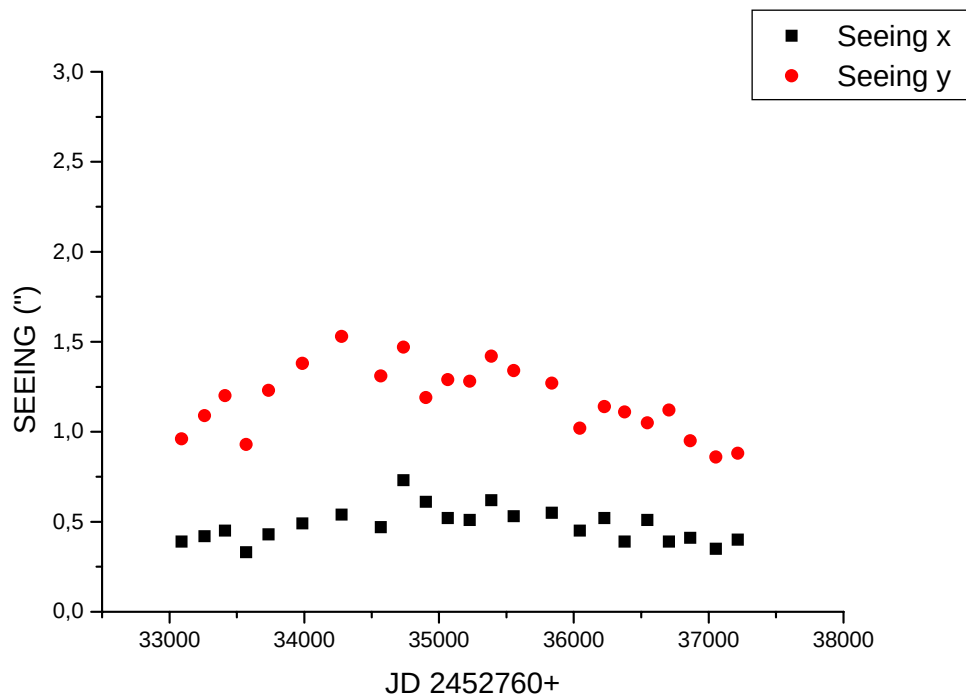
Μετρούμενος Αστέρας : α Leo



Οι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι
Μ. Ο x = 0,57'' και Μ. Ο y = 1,42''. Άρα
Μ. Ο = 1,00''

30/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : β Gem



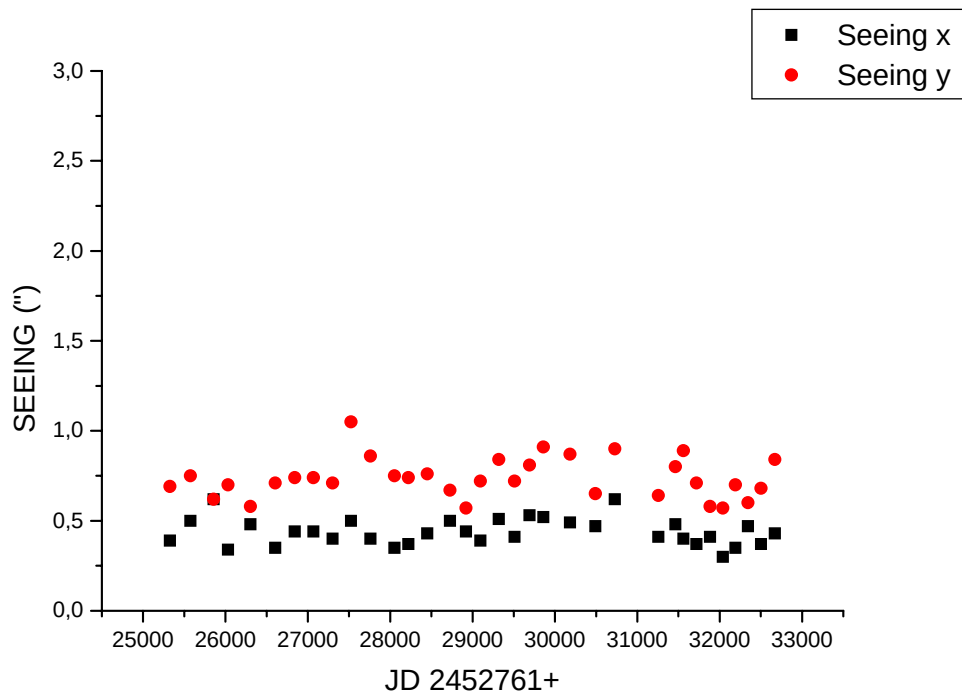
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:

M. O x = 0,48'' και M. O y = 1,17''. Άρα

M. O = 0,83''

1/ 5/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : β Gem



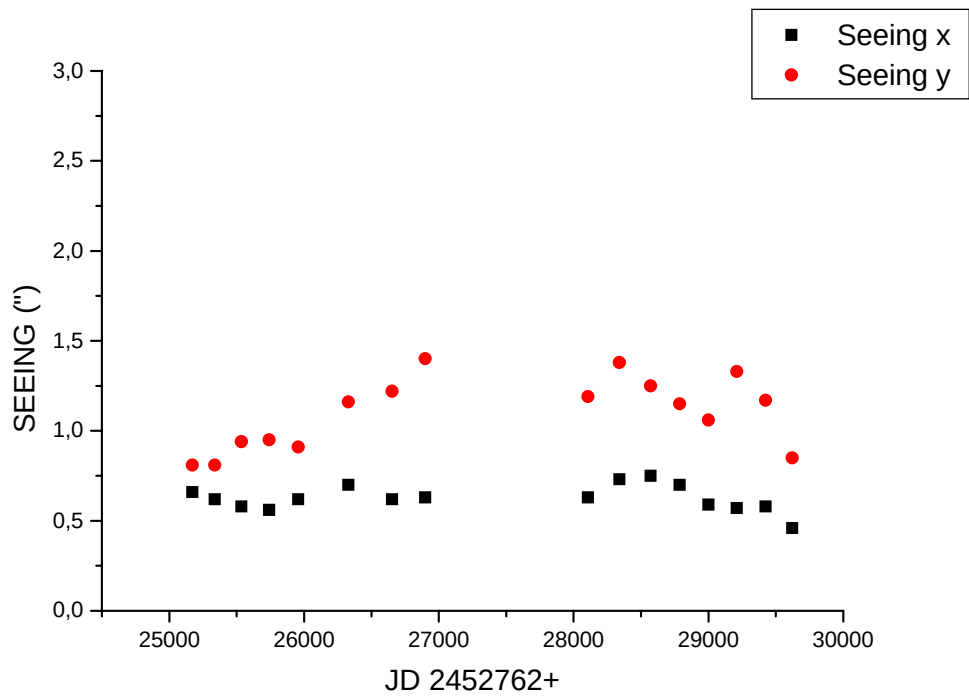
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:

M. O x = 0,44'' και M. O y = 0,74''. Άρα

M. O = 0,59''

2/ 5/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : β Gem



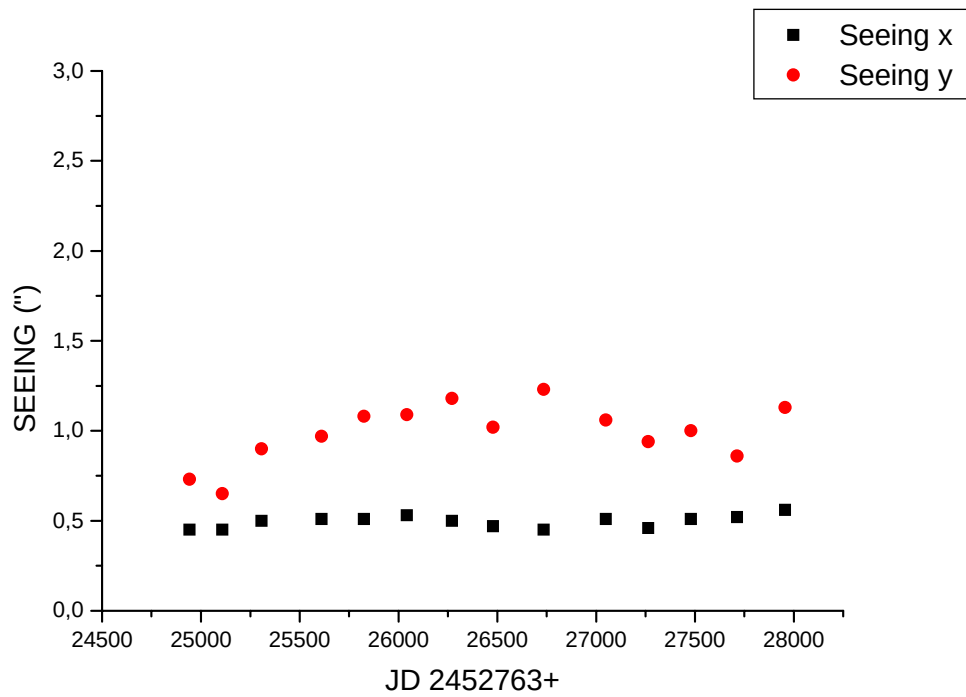
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 0,63'' και M. O y = 1,01'' . Άρα

M. O = 0,82''

3/ 5/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : β Gem



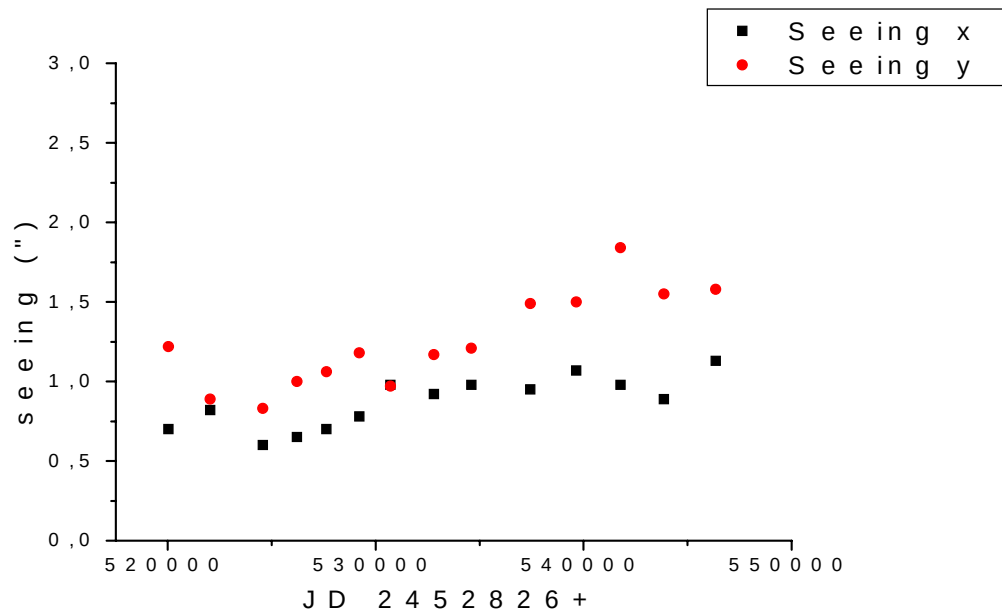
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 0,50'' και M. O y = 1,00''. Άρα

M. O = 0,75''

5/7/2003

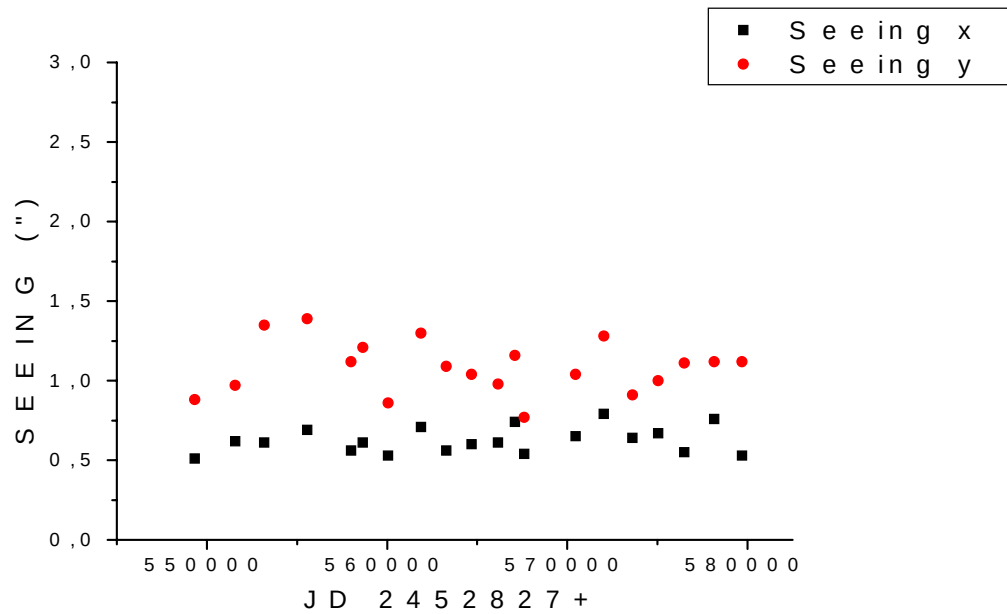
Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι
 Μ. Ο x = 0,96'' και Μ. Ο y = 1,38''. Άρα
 Μ. Ο = 1,17''

06/07/2003

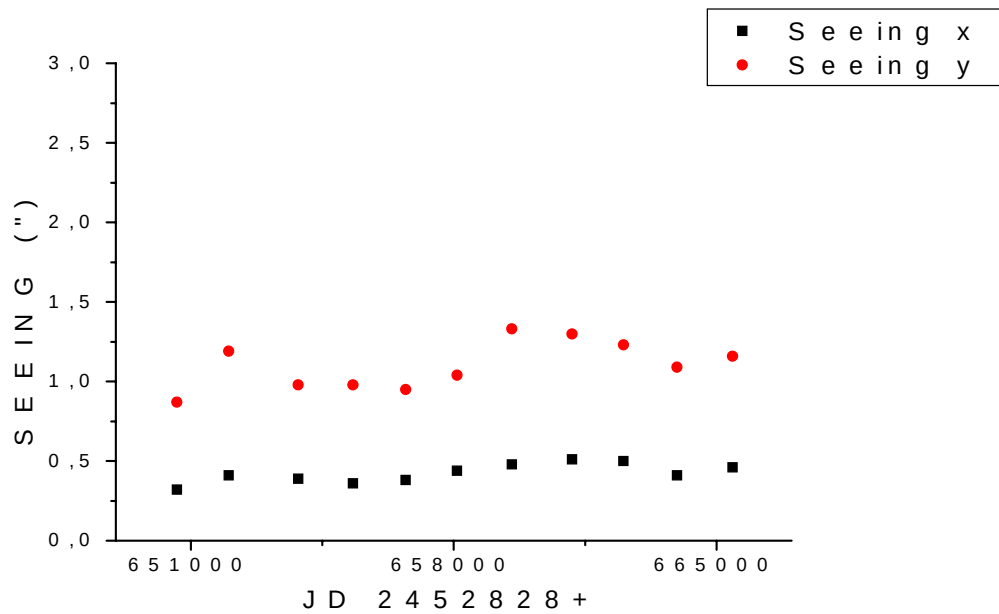
Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι:
M. O x = 0,62'' και M. O y = 1,09''. Άρα
M. O = 0,86''

08/07/2003

Μετρούμενος Αστέρης : α Boo



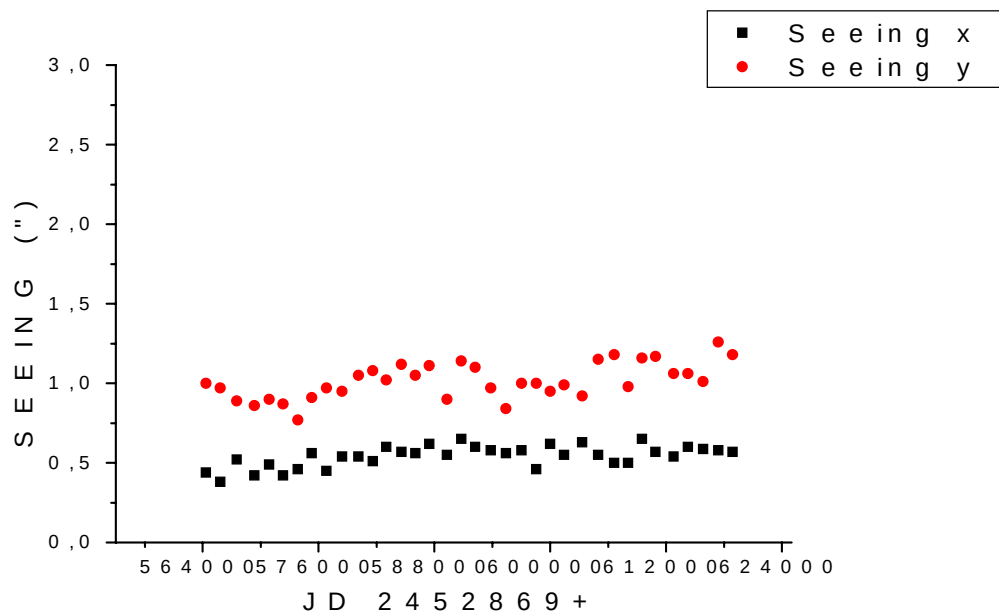
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι σε άξονες x και y είναι:

M. O x = 0,42'' και M. O y = 1,10''. Άρα

M. O = 0,76''

19/08/2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Lyra



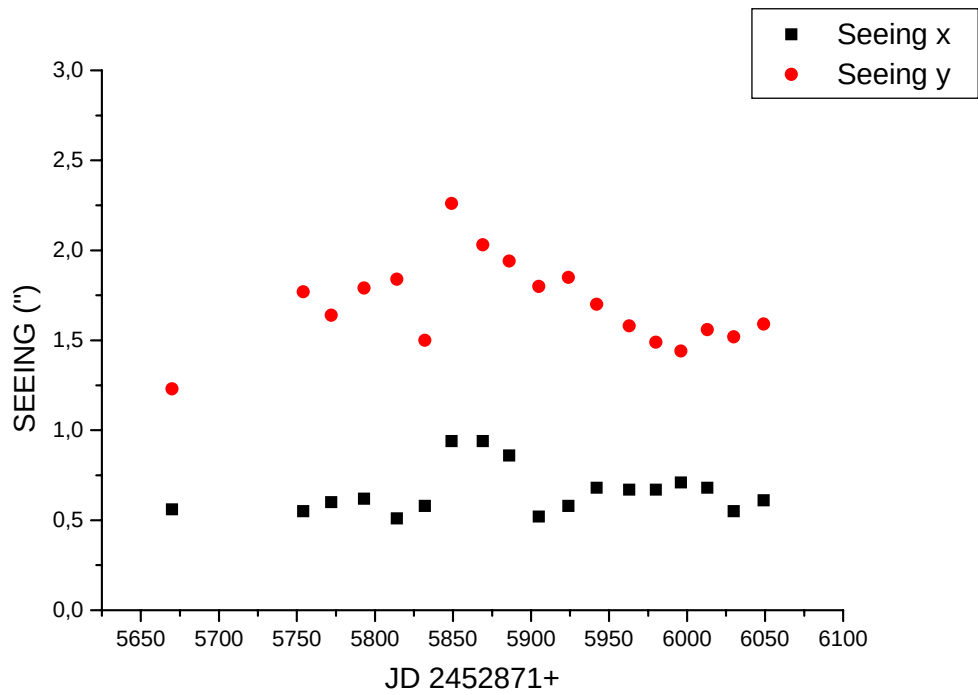
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι στους άξονες x και y είναι:

M. O x = 0,55'' και M. O. y = 1,41. Άρα

M. O = 0,98''

20/08/2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Lyra



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι στους άξονες x και y είναι :

M. O. x = 0,66'' και M. O y = 1,70''. Άρα

M. O = 1,18

2.5 Συμπεράσματα από τις τιμές του Χολομώντα

Οι παραπάνω μετρήσεις έλαβαν χώρα από τις 27/3/2003 έως τις 20/8/2003. Από την επεξεργασία των δεδομένων καταλήξαμε ότι ο μέσος όρος του seeing για την μετρούμενη περιοχή είναι κατά άξονες x και y αντίστοιχα $\text{Seeing}_x = 0,58''$ και $\text{Seeing}_y = 1,13''$ άρα το τελικό αποτέλεσμα είναι περίπου:

$$\text{Seeing}_{\text{Χολομώντα}} = 0,81''$$

Το αποτέλεσμα αυτό, αν αναλογιστούμε και το χαμηλό υψόμετρο είναι ένα από τα καλύτερα της Ελλάδας και γιατί όχι και του κόσμου. Ας μην ξεχνάμε ότι ο μέσος όρος seeing στο Isaac Newton Group, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 2300m, είναι $S = 0,7'' - 0,8''$. Επίσης ας μην ξεχνάμε ότι στο Κρυονέρι ($S = 1,47''$) και κάτω από ουρανό με τόσο μεγάλο seeing (μέσα στον Θόλο αγγίζουμε τα $2,50'' - 3,00''$ τουλάχιστον) βρίσκετε το Εθνικό Αστεροσκοπείο, το οποίο το επισκέπτονται ερευνητές απ' όλο τον κόσμο και τα πηγαίνει περίφημα από άποψη παρατηρήσεων.

Πιστεύω ότι η περιοχή του Χολομώντα είναι ένα μικρό θαύμα της Φύσης από Αστρονομικής πλευράς. Το να βρίσκεται πολύ κοντά στην Θεσσαλονίκη (1 ώρα από Θεσσαλονίκη) μια περιοχή με τέτοιο seeing μας αφήνει χώρο μόνο για ένα συμπέρασμα : ***Θα Ήταν Μεγάλο Λάθος να ΜΗΝ την Αξιοποιήσουμε.***

2.6 Φαινόμενα Seeing (αέρια μάζα – ύψος – ένταση)

Όπως είπαμε και στην εισαγωγή το seeing των αστερών μεταβάλλεται από της ατέλειες του εδάφους, τα θερμά ρεύματα και τις διαταραχές της ατμόσφαιρας που οφείλονται στην υγρασία και στην σκόνη. Τέτοια φαινόμενα μεταβολής του seeing γίνονται αισθητά, όταν το τηλεσκόπιο που χρησιμοποιούμε βρίσκεται μέσα σε κάποιο θόλο. Η μορφολογία του θόλου, αλλά και η διαφορά θερμοκρασίας και υγρασίας μέσα και έξω από τον θόλο καταστρέφουν το μέτωπο κύματος από την ακτινοβολία των αστερών τόσο πολύ ώστε να παρατηρούμε μια τρομερά μεγάλη διαφορά μέχρι και 2,00''.

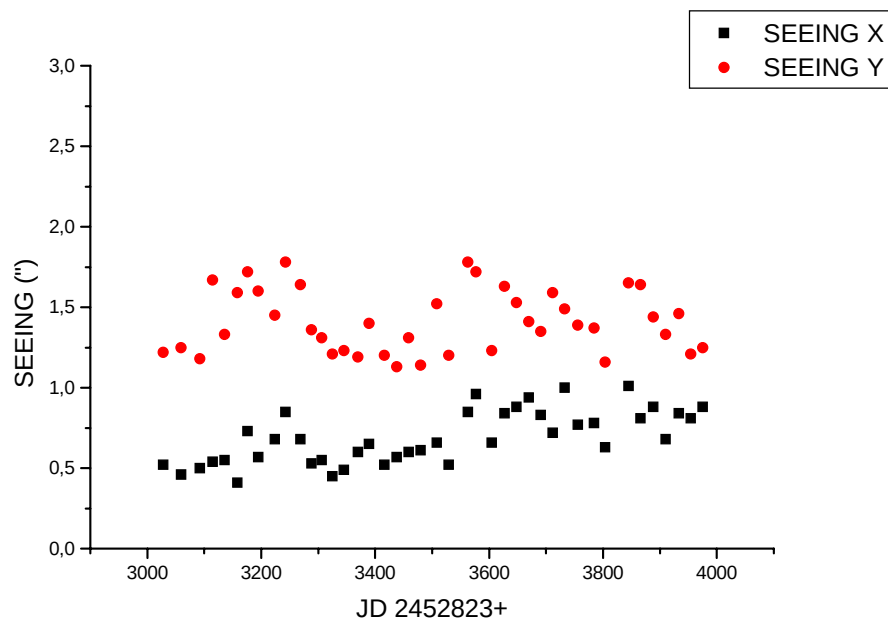
Έτσι και εμείς παίρνοντας μετρήσεις seeing μέσα και έξω από τον θόλο του Αστεροσκοπείου Θεσσαλονίκης μπορέσαμε να διαπιστώσουμε αυτήν την μεταβολή. Οι μετρήσεις μέσα στον θόλο έγιναν από το τηλεσκόπιο του Αστεροσκοπείου, το οποίο έχει διάμετρο ίση ακριβώς με του τηλεσκοπίου GN-8 Celestron που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις εκτός θόλου. Οι μετρήσεις έγιναν με διαφορά μιας ημέρας, δηλαδή 2 και 3 Ιουλίου 2003, κάτω από τις ίδιες καιρικές συνθήκες και φυσικά την ίδια ώρα. Πέρα από όλα αυτά μετρήθηκε και ο ίδιος αστέρας και δεδομένου ότι μιλάμε για τις ίδιες ώρες παρατήρησης είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι ο αστέρας στις δύο μετρήσεις βρισκόταν στο ίδιο ύψος και στο ίδιο περίπου αζιμούθιο. Έτσι η μεταβολή του seeing λόγω του διαφορετικού πάχους της ατμόσφαιρας είναι ανύπαρκτη.

Παρακάτω υπάρχουν οι μετρήσεις και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Εκτός Θόλου

2/ 7/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



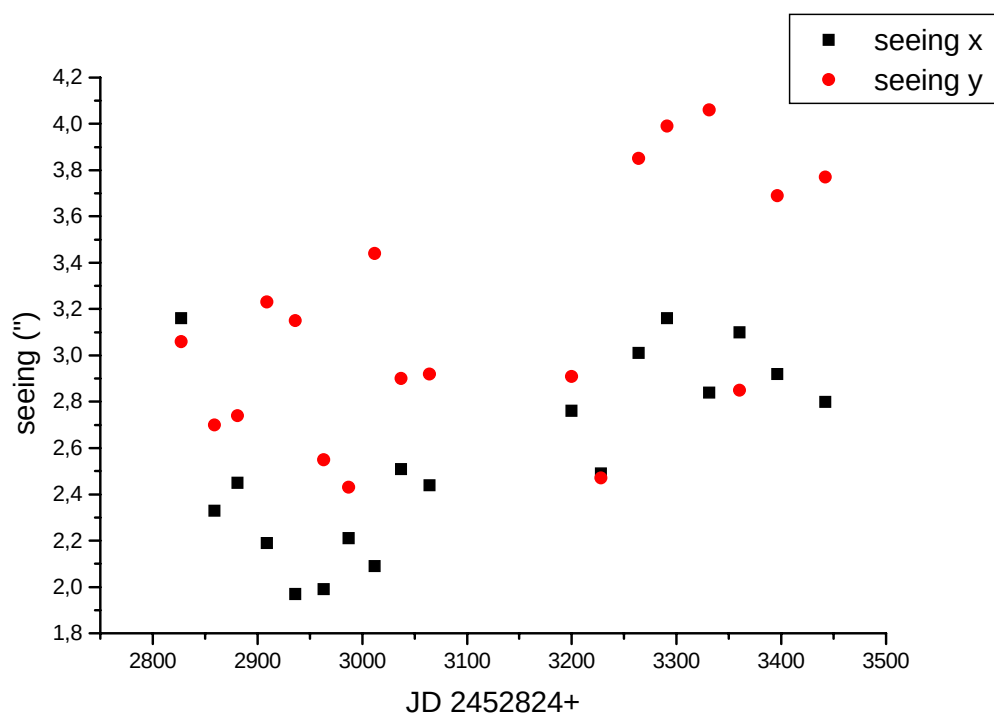
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 0,69'' και M. O y = 1,41''. Άρα ο M. O = 1,05''

Εντός Θόλου

3/ 7/ 2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Boo



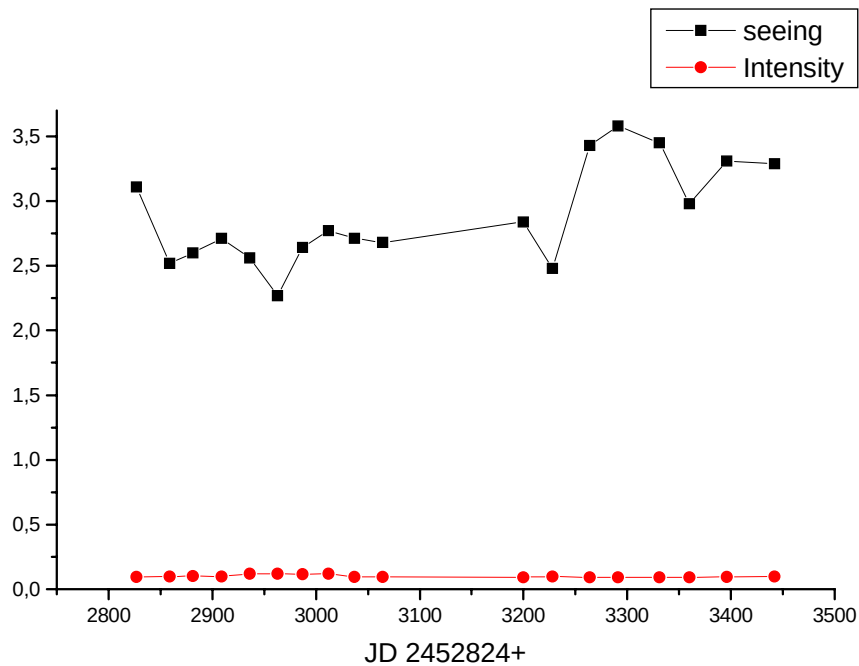
Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι :

M. O x = 2,63'' και M. O y = 3,15''. Άρα

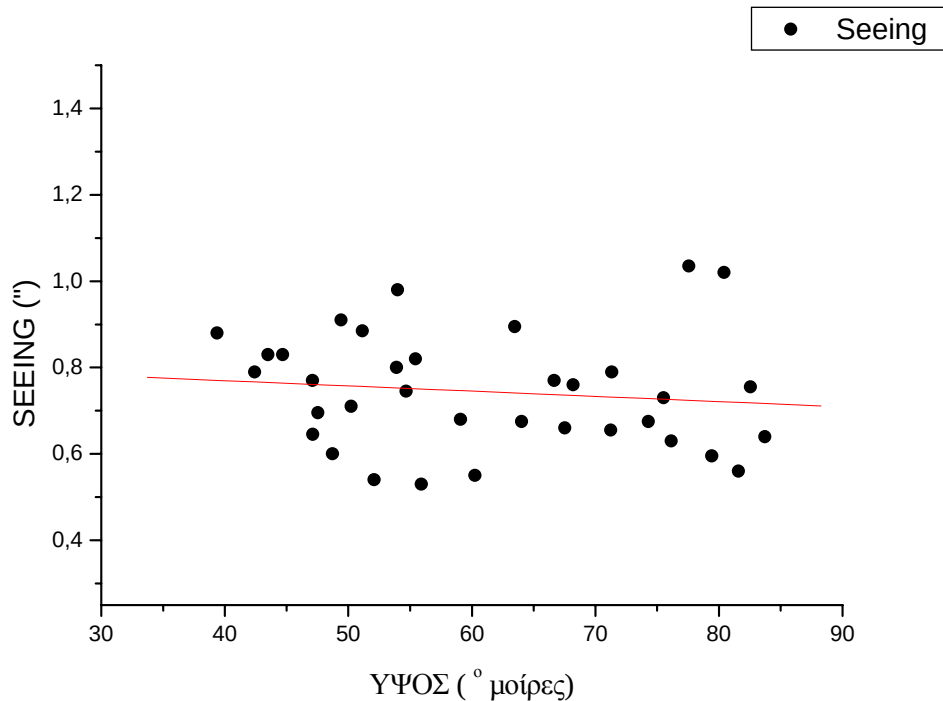
M. O = 2,89''

Η αύξηση στο seeing αστέρα α Boo είναι $\Delta s = 1,84''$. Η διαφορά είναι εμφανής. Ακόμα ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατηρήθηκε είναι αυτό που συσχετίζει το seeing των αστερων με την ένταση της λαμπρότητάς τους. Είναι πολύ συνηθισμένο να συσχετίζεται το seeing των αστερων με τις μικρομεταβολές των λαμπροτήτων τους. Όπως παρατηρήθηκε όμως στον θόλο του Αστεροσκοπείου Θεσσαλονίκης δεν φαίνεται να επηρεάζεται το seeing από τις μεταβολές των λαμπροτήτων. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις μεταβολές του seeing του αστέρα α Boo και την μεταβολή της έντασης της λαμπρότητάς του σε συνάρτηση με τον χρόνο. Όπως βλέπουμε ενώ το seeing μεταβάλλεται συνεχώς η ένταση παραμένει σταθερή.

Μετρούμενος Αστέρας : α Boo
Εντός Θόλου



Η καμπύλη του seeing είναι ο μέσος όρος των αξόνων X και Y. Τέλος, ένα ακόμα αξιοπρόσεκτο φαινόμενο που εμφανίζεται στις μετρήσεις του seeing είναι, όπως αναφέραμε και παραπάνω, στην μεταβολή του seeing εξαιτίας του ύψους των αστέρων. Εξηγήσαμε ότι το seeing συνηθίζουμε να το μετράμε κοντά στο ζενίθ επειδή το πάχος της ατμόσφαιρας είναι το ελάχιστο δυνατό και το seeing έχει την μικρότερη τιμή. Αφού επεξεργαστήκαμε όλα τα δεδομένα από τον Χολομώντα, μπορέσαμε να εξάγουμε μια καμπύλη που δείχνει πως μεταβάλλεται ο μέσος όρος του Seeing σε σχέση με το ύψος του αστερά και της αέριας μάζας που διανύει η φωτεινή ακτίνα μέσα στην ατμόσφαιρα. Θεωρούμε ότι η μικρότερη τιμή της αέριας μάζας είναι στο ζενίθ και ισούται με ένα. Οι καμπύλες που παίρνουμε είναι οι εξής



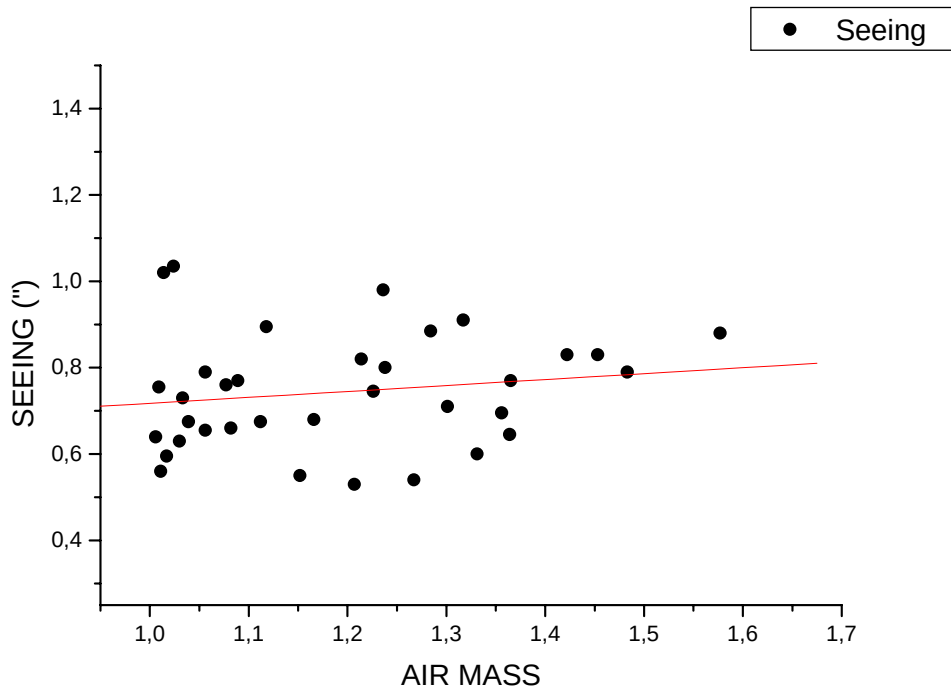
Η κόκκινη καμπύλη είναι η γραμμική εξίσωση του φαινομένου. Παρατηρούμε, όπως ήταν αναμενόμενο ότι το seeing παρουσιάζει μια ελάττωση καθώς αυξάνεται το ύψος του αστέρα. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο δίνεται παρακάτω:

$$\Delta S = -0,00121(U_1 - U_2) \quad (2.1)$$

Για παράδειγμα, όταν μετράμε έναν αστέρα σε ύψος $u_1 = 80^\circ$ και στο τέλος της μέτρησης ο αστέρας μεταβαίνει σε ύψος $u_2 = 43^\circ$ τότε στατιστικά θα περιμέναμε μια αύξηση του seeing κατά $\Delta S = 0,045''$ που θα οφείλεται στην αύξηση του πάχους της ατμόσφαιρας, το οποίο διασχίζεται από το φως του αστέρα. Μια παρόμοια καμπύλη δίνεται παρακάτω και μπορούμε να έχουμε μια ίδια εικόνα του φαινομένου από διαφορετική οπτική γωνία. Δηλαδή παρόμοια καμπύλη εξάγουμε αν αντί του ύψους, στον άξονα των x , έχουμε αέρια μάζα. Φυσικά η γραμμική καμπύλη αυτήν την φορά θα αυξάνεται όσο αυξάνεται η αέρια μάζα αφού ισχύει

$$m = \frac{1}{\eta \mu u} \quad (2.2)$$

Δηλαδή η σχετική αέρια μάζα που συναντάει η φωτεινή ακτίνα είναι ίση με το αντίστροφο ημίτονο του ύψους του αστέρα. Άρα θα έχουμε



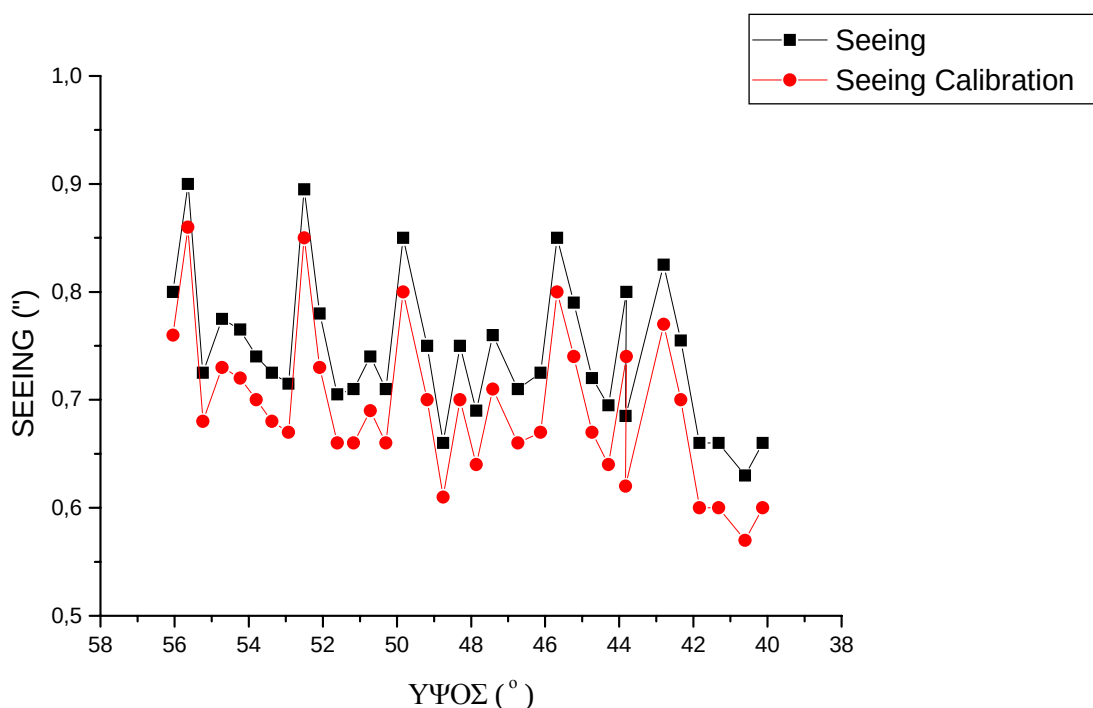
Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο είναι ανάλογη με την εξίσωση 2.1 και δίνεται παρακάτω

$$\Delta S = 0,13694(m_2 - m_1) \quad (2.3)$$

Φυσικά η εξίσωση αυτή δεν είναι στην πραγματικότητα γραμμική. Έτσι λοιπόν, στηριζόμενοι σ' αυτές τις εξισώσεις, μπορούμε να ανάγουμε όλα τα δεδομένα που έχουμε από τις μετρήσεις seeing στο ζενίθ. Με απλά λόγια μπορούμε να διορθώσουμε την προσάυξηση του seeing εξαιτίας της αέριας μάζας. Μια τέτοια διόρθωση δίνεται στην επόμενη γραφική παράσταση.

23/ 4/ 2003

Μετρούμενος Αστέρης : β Gem



Όταν αρχίσαμε την μέτρηση αυτή στις 23/ 4/ 2003 ο αντίστοιχος αστέρας βρισκόταν σε ύψος $\nu_1 = 56,045^\circ$. Στην τελευταία μέτρηση ο αστέρας είχε μετακινηθεί μέχρι το ύψος $\nu_2 = 40,127^\circ$. Λόγω της εξίσωσης 2.1 περιμένουμε μια μεταβολή του seeing της τάξης $\Delta S = 0,019$ περίπου. Εμείς αναγάγαμε όμως τα αποτελέσματα στο ζενίθ. Στην ουσία τοποθετήσαμε του αστέρα στο ζενίθ και μετρούσαμε το seeing με την πάροδο του χρόνου. Αυτή είναι η κόκκινη καμπύλη. Καθώς φαίνεται και στις καμπύλες για πολύ μικρές μεταβολές του ύψους το seeing είναι σχεδόν το ίδιο. Όσο όμως περνάει ο χρόνος και αλλάζει η θέση του αστέρα, η μεταβολή γίνεται εμφανής. Ο μέσος όρος της αρχικής καμπύλης του seeing είναι

$$M. O_1 = 0,74''$$

ενώ ο μέσος όρος της διορθωμένης καμπύλης είναι

$$M. O_2 = 0,69''$$

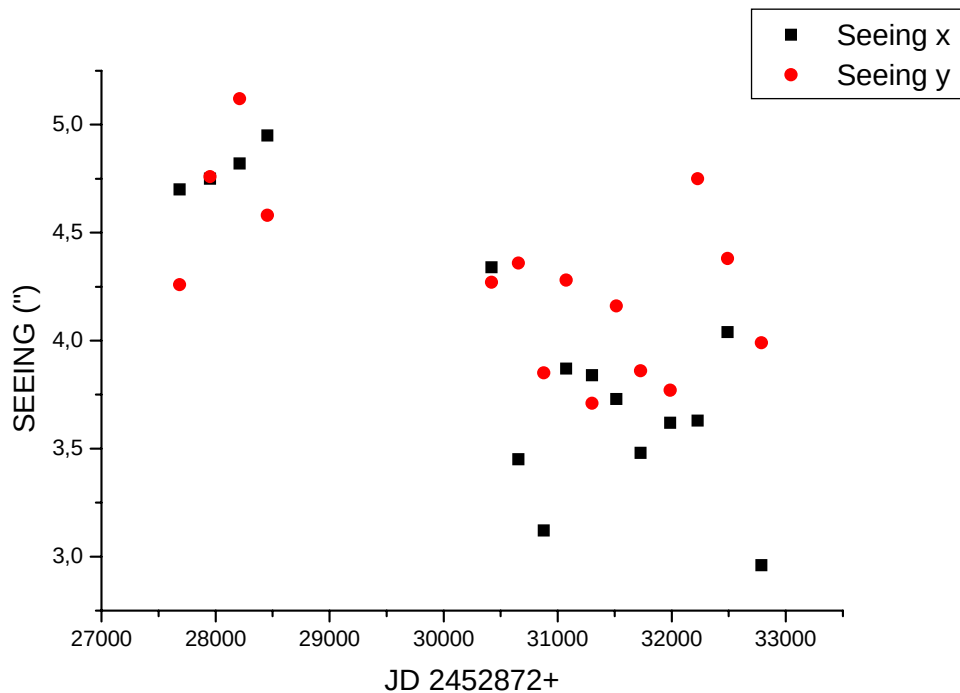
Υπολογίζουμε, αν θεωρήσουμε δεδομένο ότι δεν παρατηρούμε αστέρες κάτω από ύψη $\nu = 30^\circ$, ότι ο μέσος όρος του seeing μιας περιοχής μειώνεται κατά $\Delta S = 0,07''$ κατά την διάρκεια της νύχτας.

Για να γίνει κατανοητό πόσο επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες το seeing, πήραμε από τον θόλο του Αστεροσκοπείου Θεσσαλονίκης μετρήσεις του ίδιου αστέρα (α Lyra) και την ίδια ώρα, αλλά με μία ημέρα διαφορά. Την πρώτη μέρα

μετρήσαμε το Seeing αμέσως μετά από δυνατή βροχή με αέρα, ενώ την επόμενη ημέρα ο καιρός ήταν υπέροχος όλο το εικοσιτετράωρο. Ακόμα και η πιθανή σκόνη της ατμόσφαιρας είχε εξαφανιστεί από την βροχή. Έτσι πήραμε τα αντίστοιχα γραφήματα.

20/08/2003

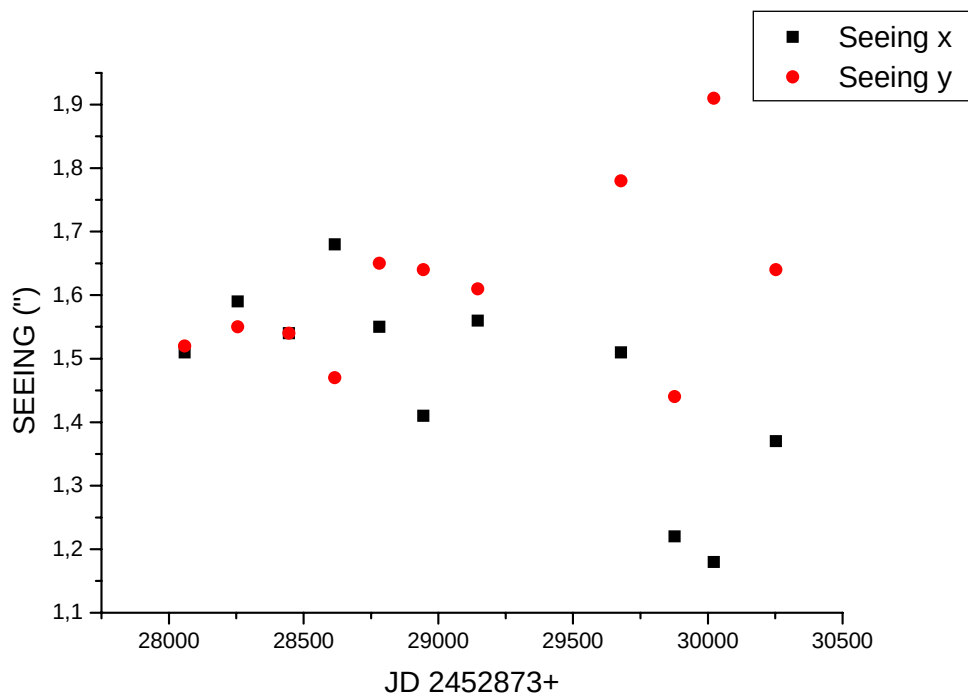
Μετρούμενος Αστéρας : α Lyra



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι
 Μ. Ο x = 4,22'' και Μ. Ο y = 4,41''. Άρα
 Μ. Ο = 4,32''

21/08/2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Lyra



Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι κατά άξονες x και y είναι

M. O $x = 1,44''$ και M. O $y = 1,63''$. Άρα

M. O $= 1,54''$

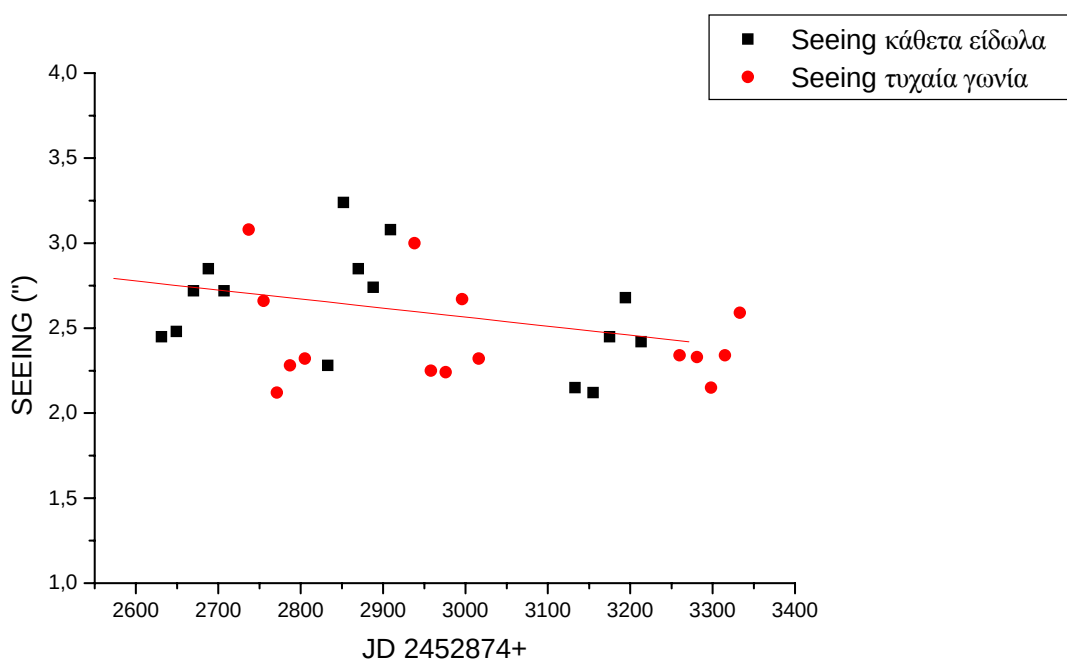
Η μεταβολή του seeing μέσα σε μία ημέρα ήταν $2,78''$ και αυτή είναι πολύ μεγάλη τιμή. Βλέπουμε λοιπόν πόσο μεγάλο ρόλο διαδραματίζουν οι καιρικές συνθήκες στην εξαγωγή του seeing. Γι' αυτό είναι επιτακτική ανάγκη να διαθέτουμε πολύ μεγάλο αριθμό δεδομένων προκειμένου να αποφανθούμε για την συμπεριφορά του seeing μιας περιοχής.

2.7 Λογισμικό και τρόπος μέτρησης

Όπως είπαμε και προηγουμένως, το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου DIMM είναι ότι μπορεί να υπολογίζει το seeing χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα συστηματικά σφάλματα της κίνησης του τηλεσκοπίου, του αέρα, τα μικρό-σφάλματα στους φακούς και όλους εκείνους τους παράγοντες που δεν ευθύνονται για την μεταβολή του seeing λόγω της ατμόσφαιρας. Το λογισμικό που διαθέταμε μετρούσε τις μικρό-μεταβολές των θέσεων των δύο ειδώλων. Όταν “τρέχει” το λογισμικό στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζονται δύο είδωλα. Προσπαθήσαμε να δούμε αν οι μετρήσεις που παίρνουμε έχει κάποια σχέση με την θέση των ειδώλων ή όχι. Γι’ αυτό αρχικά παίρναμε μετρήσεις όταν η ευθεία που ενώνει τα είδωλα ήταν κάθετη με την οθόνη και έπειτα όταν η ευθεία αυτή σχημάτιζε τυχαία γωνία. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω

22/08/2003

Μετρούμενος Αστέρας : α Lyra



Η παρατήρηση άρχισε με την δύση του ηλίου. Γι’ αυτό ήταν λογικό να παρατηρηθεί μια πτώση του seeing με την πάροδο του χρόνου, αλλά και στις δύο γωνίες (κάθετη και τυχαία) η πτώση είναι παρόμοια. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το πιθανότερο είναι να μην υπάρχει σχέση μεταξύ της γωνίας των ειδώλων και της τιμής του seeing.

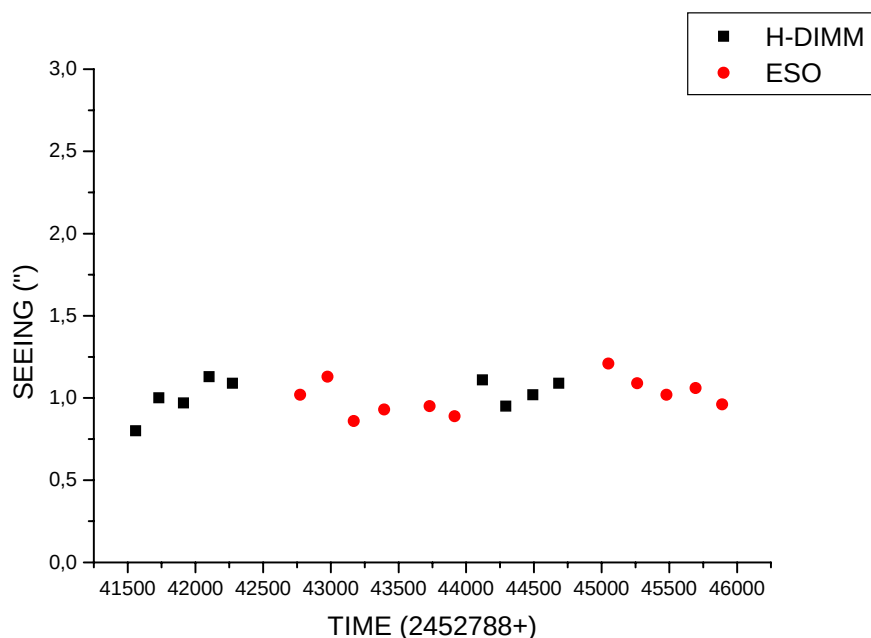
2.8 Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ESO DIMM και H-DIMM

Όπως συμβαίνει αρκετές φορές με την Παρατηρησιακή Αστρονομία, όταν τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα από τα αναμενόμενα τα αντιμετωπίζουμε με κάποιον σκεπτικισμό. Έτσι μετά τα πρώτα αποτελέσματα του seeing για την περιοχή του Χολομώντα αρχίσαμε να σκεφτόμαστε την ορθότητα της μεθόδου H – DIMM και κατά πόσο μπορεί να δώσει πραγματικά αποτελέσματα. Επειδή λοιπόν δεν μπορέσαμε να βρούμε κάποιο σφάλμα στην θεωρία της μεθόδου, αποφασίσαμε να συγκρίνουμε τις δύο μεθόδους παρατηρησιακά.

Η λογική είναι εξαιρετικά απλή, αλλά και αποτελεσματική. Με το τηλεσκόπιο που υπάρχει στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, στο Κρυονέρι Κορινθίας, παίρναμε μετρήσεις του seeing. Οι μετρήσεις αρχικά παίρνονταν με την μέθοδο της ESO, δηλαδή στην μία οπή της μάσκας υπήρχε πρίσμα εκτροπής της δέσμης. Μετά από 15 λεπτά περίπου και αφού είχαμε πάρει μερικές τιμές βγάξαμε το πρίσμα εκτροπής από την οπή της μάσκας και παίρναμε μετρήσεις με την μέθοδο H – DIMM για άλλα 15 λεπτά. Συνεχίσαμε να μετατρέπουμε την μέθοδο παρατήρησης και να παίρνουμε μετρήσεις για περίπου 1 ώρα. Γνωρίζοντας ότι η μέση τιμή του seeing δεν αλλάζει σημαντικά μέσα σε 15 λεπτά θα περίμενε κανείς κάποια συνοχή στις δύο μεθόδους. Αυτή η μέτρηση έγινε στις

29/ 5/ 2003

Μετρούμενος Αστéρας : α Boo



Όπως παρατηρούμε και από το γράφημα υπάρχει πλήρης ταύτιση των δύο μεθόδων. Δεν μπορεί λοιπόν να υπάρχει και καμιά αμφιβολία πάνω στις μετρήσεις και στα αποτελέσματα που πήραμε στον Χολομώντα με τον δικό μας εξοπλισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Wide Angle Search for Planets

3.1 Εισαγωγή

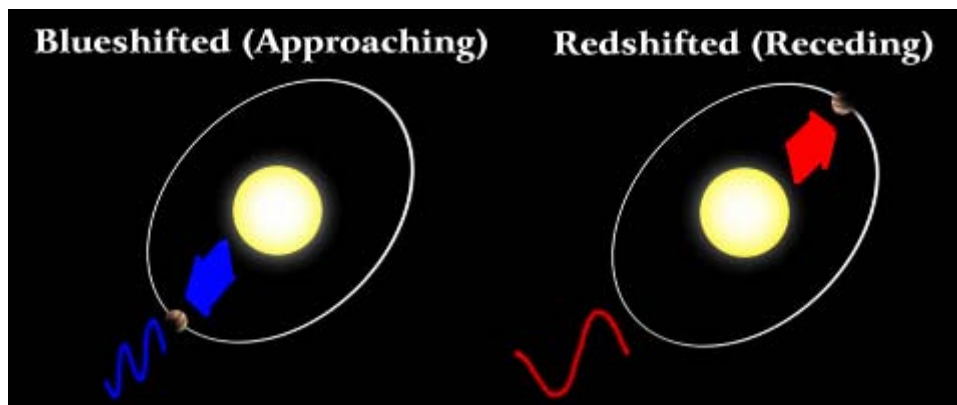
Εδώ και αιώνες ο άνθρωπος παρατηρεί τον έναστρο ουρανό, αναρωτιέται και προβληματίζεται από αυτόν. Πολλοί φιλόσοφοι, πιστοί, επιστήμονες και απλοί άνθρωποι πίστευαν στην πιθανότητα ύπαρξης άλλων κόσμων, κατοικήσιμων ή μη. Ζούμε σε μια σημαντική στιγμή της ιστορίας μας, στην οποία έγινε εφικτή για πρώτη φορά η ανακάλυψη πλανητών και σε άλλα άστρα, το βήμα δηλαδή για την ερώτηση της ύπαρξης ζωής στο Σύμπαν.

Οι πρώτες ανακαλύψεις έγιναν από τους Wolszczan και Shabanoua, οι οποίοι εντόπισαν δύο πλανήτες να περιστρέφονται γύρω από δύο Pulsars των PSRB1257+12 και BO 329+54. Έτσι λοιπόν όλοι άρχισαν να σκέφτονται ότι αφού υπάρχουν πλανήτες γύρω από Pulsars, γιατί όχι και γύρω από άλλα άστρα. Άρχισε λοιπόν ένας αγώνας ανακάλυψης καινούριων πλανητών και σε άλλα αστέρια που ίσως είχαν πιο οικίες συνθήκες ζωής για τον άνθρωπο. Το μεγαλύτερο πρόβλημα όλων ήταν η μέθοδος που θα χρησιμοποιούσαν προκειμένου να εντοπίσουν κάποιο πλανήτη. Φυσικά το να δούμε έναν έξω – ηλιακό πλανήτη στις μέρες μας είναι ακόμα ζήτημα επιστημονικής φαντασίας. Με κανένα γνωστό αστρονομικό όργανο πάνω στην Γη δεν είναι αυτό εφικτό. Γι' αυτό στραφήκαμε σε έμμεσους τρόπους, όπως γίνεται συχνά στην Αστρονομία. Οι έμμεσοι μέθοδοι που ανακαλύφθηκαν είναι η ανίχνευση με την χρήση της φασματοσκοπίας, της αστρομετρίας και της φωτομετρίας. Εμείς χρησιμοποιήσαμε την φωτομετρία και παρακάτω θα κάνουμε μια μικρή αναφορά και στις άλλες μεθόδους.

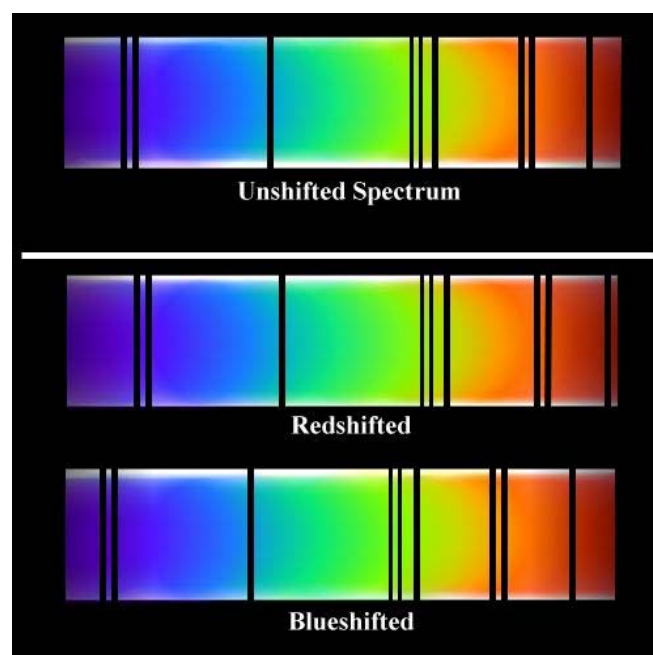
3.2 Ανίχνευση Εξώ – Ηλιακών Πλανητών

3.2.1 Μέθοδος Φασματοσκοπίας

Η πιο σίγουρη μέθοδος με την οποία μπορεί κανείς να ανακαλύψει κάποιο πλανήτη σε κάποιον αστέρα, είναι αυτή που στηρίζεται στην φασματοσκοπική μελέτη του άστρου. Η λογική στηρίζεται στο φαινόμενο Doppler. Ας υποθέσουμε ότι παρατηρούμε το φάσμα ενός αστέρα, ο οποίος έχει κάποιον πλανήτη που κινείται σε τροχιά. Η έλξης του αστέρα από τον πλανήτη, έχει σαν αποτέλεσμα να αναγκάζει το σύστημα να περιστρέφεται γύρω από το κέντρο μάζας. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που ο αστέρας κινείται κατά την φορά του παρατηρητή οι φασματικές γραμμές του φάσματος θα είναι μετατοπισμένες προς το μπλε, διαφορετικά θα είναι μετατοπισμένες προς το κόκκινο.



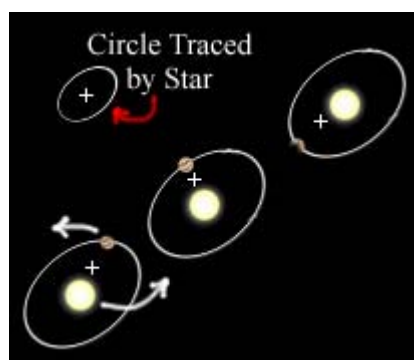
Έτσι από αυτήν την μεταβολή των φασματικών γραμμών μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του αστέρα, άρα την μάζα του πλανήτη και την ακτίνα της τροχιάς του.



Αν και είναι η πιο διαδεδομένη και η πιο ακριβής μέθοδος σήμερα, έχει ένα τεράστιο πρόβλημα. Δεν μπορεί να ανιχνεύσει πάνω από έναν αστέρα ταυτόχρονα και αυτό κάνει τις ανακαλύψεις πολύ περιορισμένες. Κυρίως χρησιμοποιούμε την φασματοσκοπία όταν έχουμε ενδείξεις για κάποιο υποψήφιο πλανητικό σύστημα και θέλουμε να το επιβεβαιώσουμε.

3.2.2 Μέθοδος Αστρομετρίας

Αυτή η μέθοδος είναι πολύ περιορισμένης χρήσης. Προκειμένου να ανιχνεύσουμε κάποιο πλανήτη, καταγράφουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια την θέση του υποψηφίου αστέρα. Με την πάροδο του χρόνου και την κίνηση του αστέρα γύρω από το κέντρο μάζας, η θέση του πάνω στην ουράνια σφαίρα αλλάζει. Για να καταλάβουμε περίπου την ακρίβεια που απαιτείται, εξηγούμε είναι ότι μια τυπική μεταβολή στην θέση ενός αστέρα λόγω της έλξης του πλανήτη είναι περίπου τα 2000 χιλιόμετρα. Αυτή η απόσταση για Αστρονομικές αποστάσεις είναι απειροελάχιστη.



Ο μικρός σταυρός δείχνει την θέση του άστρου καθώς ο πλανήτης περιφέρεται γύρω από το κέντρο μάζας

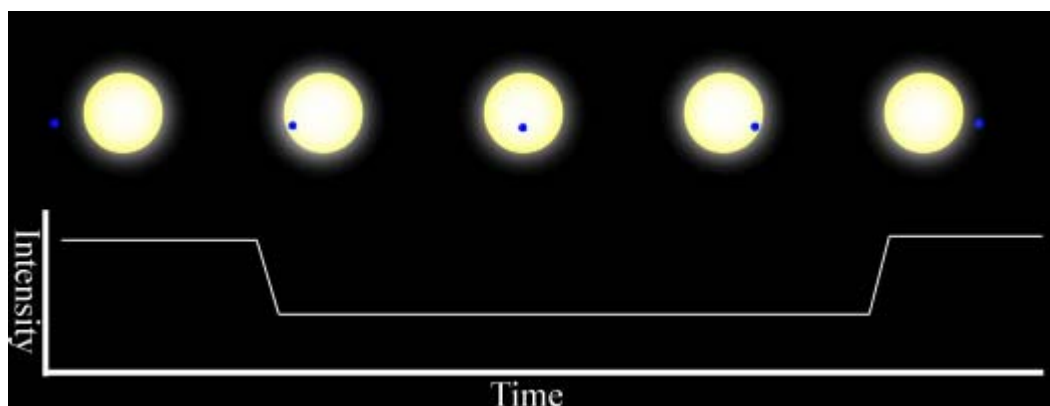
3.2.3 Μέθοδος Φωτομετρίας

Μερικές φορές, σαν παρατηρητές του Ηλίου από την Γη, βλέπουμε τους εσωτερικούς πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος, τον Ερμή και πιο σπάνια την Αφροδίτη, να διασχίζουν τον δίσκο του Ήλιου κατά την κίνησή τους. Εμείς βλέπουμε μόνο μια μαύρη μικρή κηλίδα πάνω στον δίσκο. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος από την ακτινοβολία που εκπέμπει ο αστέρας μας δεν έρχεται στον παρατηρητή, αφού εμποδίζεται από τον πλανήτη που βρίσκεται μπροστά του. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχουμε ένα φαινόμενο παρόμοιο με μια έκλειψη Ηλίου. Το ενδιαμέσο σώμα είναι κάποιος από τους εσωτερικούς πλανήτες και όχι η Σελήνη. Θεωρητικά λοιπόν, έχουμε μια ελάττωση της φαινόμενης λαμπρότητας του Ήλιου κατά την διάρκεια κάποιας τέτοιας διάβασης.

Αν υποθέσουμε τώρα ότι κάποιος αστέρας έχει κάποιο πλανήτη συνοδό σε τροχιά και η τροχιά αυτή είναι τέτοια ώστε μερικές φορές ο πλανήτης να μπαίνει ενδιάμεσα στα τηλεσκόπιά μας και στον αστέρα, τότε και ο πλανήτης θα προκαλεί μια μικρή "έκλειψη" στον αστέρα. Η έκλειψη αυτή, όπως είπαμε, μεταφράζεται σαν ελάττωση στην φαινόμενη λαμπρότητα του αστέρα και έτσι μπορούν να ανιχνευθούν ποια άστρα έχουν πλανήτες που περιφέρονται σε παράλληλες τροχές με το οπτικό επίπεδο των παρατηρητών της Γης.

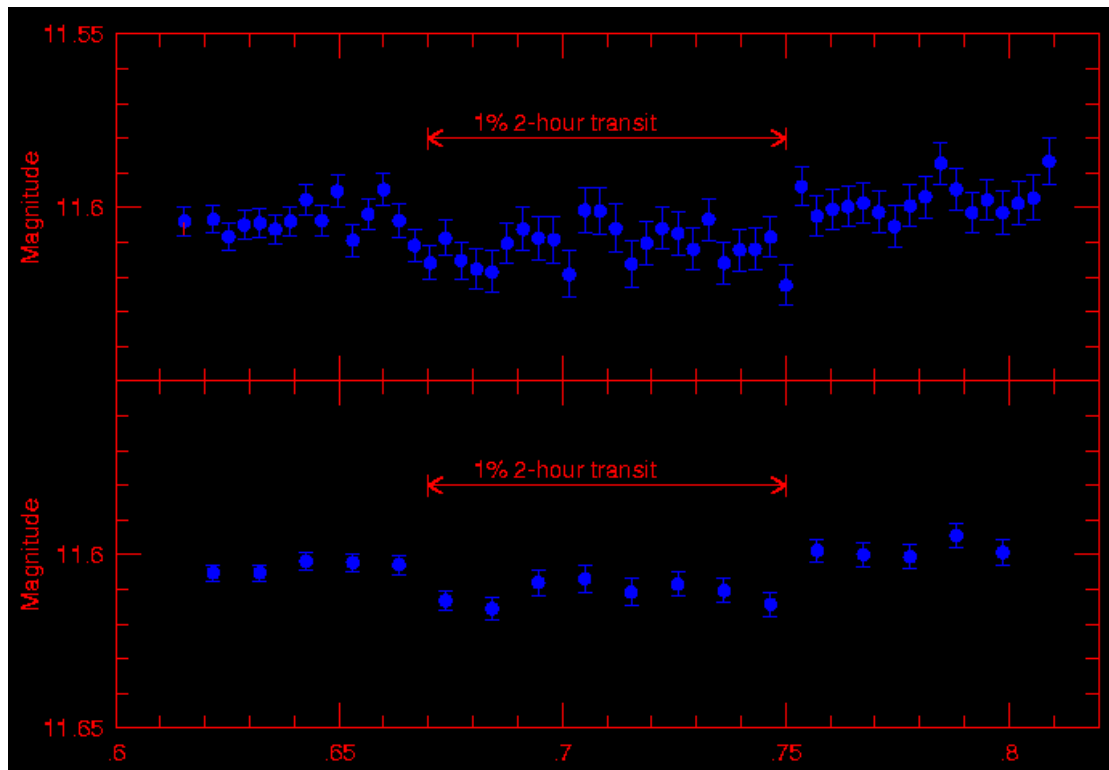
Η δουλειά που γίνεται προκειμένου να ανιχνευθεί ένας νέος πλανήτης σε τροχιά γύρω από έναν αστέρα είναι αρκετά ενδιαφέρουσα. Καταγράφουμε την φαινόμενη λαμπρότητα του αστέρα συνεχώς και για μεγάλα χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να έχουμε πολλές πιθανότητες να ανακαλύψουμε μια μεταβολή σ' αυτήν. Η φύση της μεταβολής είναι τέτοια που μόνο τα φαινόμενα διαβάσεων πλανητών παράγουν τέτοιες καμπύλες φωτός. Κανένα άλλο φαινόμενο, όπως θα δούμε παρακάτω, δεν είναι δυνατόν να έχει όμοιες καμπύλες φωτός με αυτές των διαβάσεων διότι κάθε καμπύλη περιγράφει μοναδικά την φύση του συστήματος.

Μια τυπική καμπύλη μεταβολής της λαμπρότητας κάποιου αστέρα κατά την διάβαση ενός πλανήτη από μπροστά του φαίνεται στο σχήμα 3.1



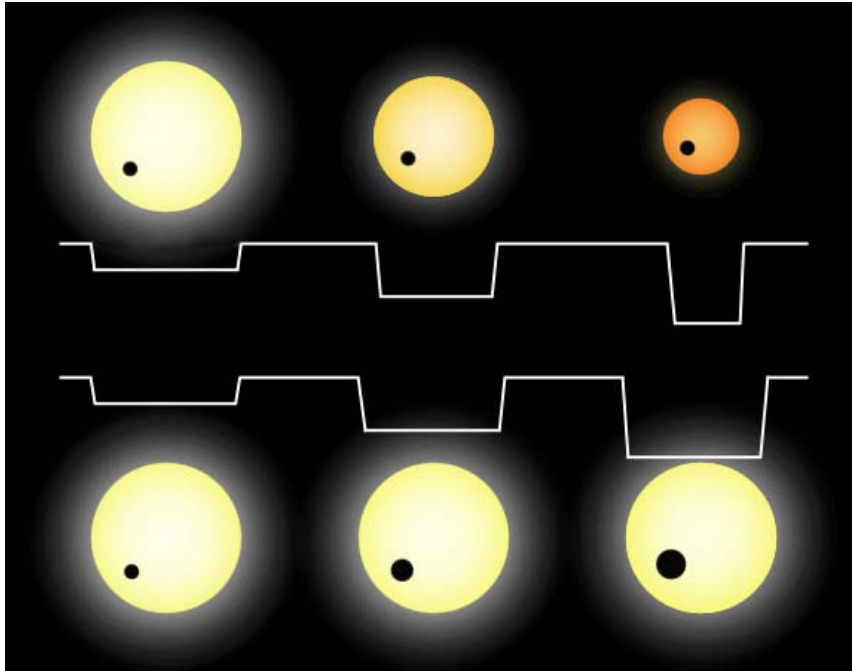
Σχήμα 3.1. Βλέπουμε μια αντιστοιχία της πραγματικότητας και της παρατήρησης. Στην ουσία παρατηρούμε πως το φαινόμενο μεταφράζεται σε καμπύλη λαμπρότητας – χρόνου

Εδώ παρατηρούμε καθαρά γιατί η καμπύλη φωτός μιας διάβασης ενός έξω – ηλιακού πλανήτη είναι διαφορετική από κάθε άλλη καμπύλη φωτός. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δεδομένα κάποιου αστέρα σε μεγάλο βάθος χρόνου. Το πρώτο χαρακτηριστικό της καμπύλης φωτός είναι ότι αυτή θα επαναλαμβάνεται περιοδικά με περίοδο ίση με την περίοδο περιφοράς του πλανήτη. Από αυτό το στοιχείο μπορούμε να απορρίψουμε κάθε τυχαίο φαινόμενο, όπως για παράδειγμα αστέρες Supernova, Nova και γενικά κάθε βίαιου μεταβλητού. Οι μοναδικοί αστέρες λοιπόν που έχουν τέτοιες καμπύλες φωτός με περιοδική μεταβολή λαμπρότητας είναι οι ομαλοί μεταβλητοί. Η διαφορά όμως βρίσκεται στην καμπύλη. Στους μεταβλητούς, τα μέγιστα ή τα ελάχιστα της καμπύλης είναι κορυφές. Στις καμπύλες λαμπρότητας των έξω – ηλιακών πλανητών, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα, η λαμπρότητα ελαττώνεται, αλλά η καινούρια τιμή παραμένει σταθερή όσο χρόνο διαρκεί το φαινόμενο της διάβασης. Έπειτα επανέρχεται στην τιμή που είχε πριν την διάβαση. Αυτό το flat της καμπύλης είναι χαρακτηριστικό και μπορεί να διαρκέσει μερικές ώρες. Στο σχήμα 3.2 μπορούμε να σημειώσουμε την διαφορά μεταξύ μιας καμπύλης λαμπρότητας που προέρχεται από έναν μεταβλητό αστέρα και από μια που προέρχεται από κάποια διάβαση πλανήτη.



σχήμα 3.2. Στην ανάλυση αυτή διακρίνεται καθαρά το χαρακτηριστικό flat που υπάρχει στην καμπύλη φωτός που προέρχεται από διάβαση πλανήτη

Όπως παρατηρούμε η καμπύλη έχει δύο επιμέρους χαρακτηριστικά. Το ένα είναι το μήκος του flat και το άλλο είναι το βάθος της μεταβολής. Από αυτά τα δεδομένα μπορούμε, όπως θα δούμε, να εξάγουμε πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία για τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η κλίση του επιπέδου της τροχιάς του πλανήτη, η ακτίνα του, η ακτίνα της τροχιάς του. Με τον συνδυασμό των μεθόδων παρατήρησης, δηλαδή μετά από αστρομετρία και φασματοσκοπία μπορούμε να υπολογίσουμε ακόμα την μάζα και την πυκνότητα. Το μήκος από το flat εξαρτάται από τον συνδυασμό των ακτινών του αστέρα και του πλανήτη, αλλά και της ακτίνας της τροχιάς. Δηλαδή αν έχουμε δύο αστέρες που οι πλανήτες τους έχουν την ίδια φαινόμενη διάμετρο, τότε η καμπύλη λαμπρότητας του αστέρα με την μικρότερη ακτίνα θα έχει το μικρότερο μήκος στο flat. Το βάθος της καμπύλης επίσης εξαρτάται από τον συνδυασμό ακτινών. Για παράδειγμα, αν έχουμε δύο αστέρες με την ίδια ακτίνα, τότε το σύστημα στο οποίο ο αντίστοιχος πλανήτης έχει την μεγαλύτερη ακτίνα, θα έχει και το μεγαλύτερο βάθος μεταβολής στην καμπύλη λαμπρότητας. Πολύ κατατοπιστικό είναι το σχήμα 3.3



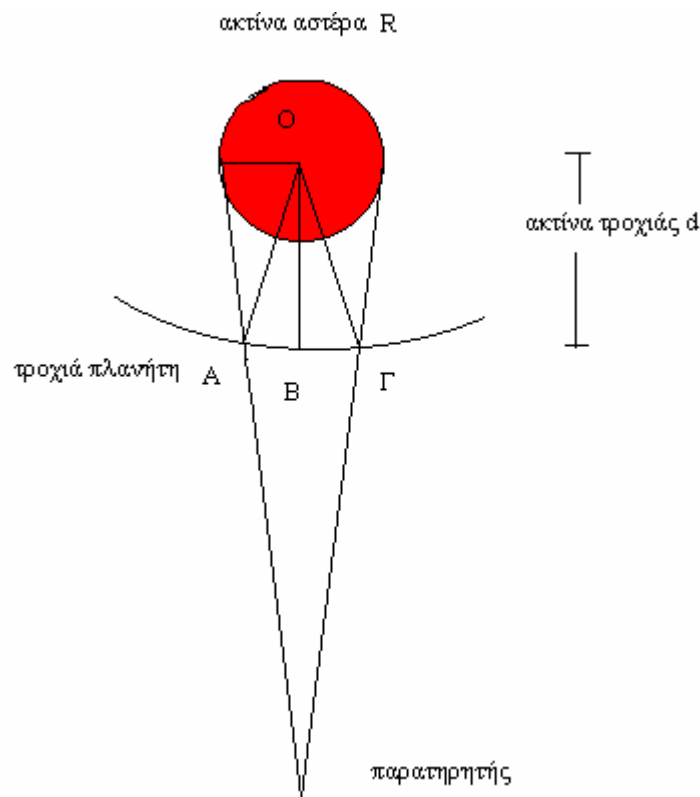
Σχήμα 3.3. Το βάθος και η διάρκεια του φαινομένου είναι απόλυτη συνάρτηση των ακτίνων των δύο αντικειμένων, δηλαδή πλανήτη – αστέρα.

3.3 Εξισώσεις και Φυσικά Χαρακτηριστικά του Συστήματος

Όπως είδαμε από την μελέτη των φασμάτων μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα περιφοράς του πλανήτη γύρω από το πρωτεύον άστρο, αλλά και την εκκεντρότητα. Με αυτά τα στοιχεία μπορούμε να αποφανθούμε αν η τροχιά του πλανήτη είναι κοντά στην κυκλική. Τότε έχουμε αρκετά πλεονεκτήματα και μάλιστα από τα ήδη γνωστά πλανητικά συστήματα παρατηρούμε ότι μέχρι στιγμής ανιχνεύουμε μόνο αυτά που έχουν μεγάλη εκκεντρότητα. Έχοντας τώρα πολύ μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε δύο διαδοχικές διαβάσεις του πλανήτη μπροστά από το κύριο άστρο. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαβάσεων ισούται φυσικά με την περίοδο T περιφοράς του πλανήτη.

Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε από την ταχύτητα περιφοράς να υπολογίσουμε και την ακτίνα d της τροχιάς του. Επίσης πολύ σημαντικό στοιχείο είναι η κλίση του επιπέδου της τροχιάς του πλανήτη. Για να μπορέσουμε να το υπολογίσουμε κατασκευάσαμε το παρακάτω σχεδιάγραμμα 3.4. Είναι πολύ δύσκολο να φανταστούμε την γεωμετρία του συστήματος. Ας κάνουμε λοιπόν κάποιες επεξηγήσεις. Στο σχήμα υποθέτουμε ότι η τροχιά του πλανήτη είναι κυκλική και ότι το ευθύγραμμο τμήμα $AB=z$, εξαιτίας την μεγάλης απόστασης από τον αστέρα μπορούμε να το θεωρήσουμε ευθύγραμμο. Ονομάζουμε την γωνία $AOB=\phi$. Τότε αν d η ακτίνα της τροχιάς του πλανήτη στο τρίγωνο AOB θα έχουμε

$$\varepsilon\phi\phi = \frac{z}{d} \quad (3.1)$$

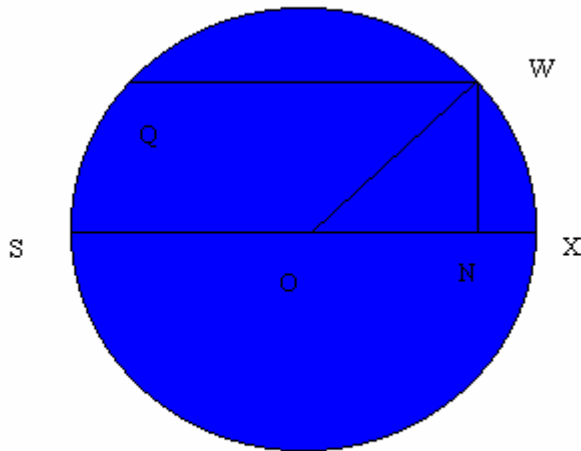


Σχήμα 3.4
Η γεωμετρία του πλανητικού συστήματος

Αν όμως η περίοδος της περιφοράς του πλανήτη είναι T , τότε η γωνία ϕ είναι ίση με $\phi = 180t/T$. Όπου t είναι ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο της διάβασης. Έτσι η εξίσωση (3.1) γίνεται

$$\epsilon\phi \left(180 \frac{t}{T}\right) = \frac{z}{d} \quad (3.2)$$

Τώρα προκύπτουν δύο προβλήματα. Το ένα είναι ότι πρέπει να εξαλείψουμε τον άγνωστο όρο Z από την εξίσωση (3.2) και το δεύτερο είναι ότι πρέπει να εμφανίσουμε τον όρο που θέλουμε να υπολογίσουμε κάπου μέσα στις εξισώσεις. Προκειμένου να λύσουμε αυτά τα προβλήματα ας δούμε το φαινόμενο από μια άλλη οπτική γωνία. Σαν αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.5



εδώ βλέπουμε τον αστέρα παράλληλα στον ισημερινό του SX. Ο ισημερινός θα ταυτιζόταν με την τροχιά που θα χαράζε ο πλανήτης κατά την διάβασή του από μπροστά αν η γωνία του διανύσματος ήταν $i=90^\circ$. Η γραμμή QW είναι η πορεία που χαράσει ο πλανήτης πάνω στον αστέρα όταν η κλίση i είναι τυχαία. Το μισό τμήμα QW, δηλαδή το τμήμα ON, ταυτίζεται με το τμήμα Z του προηγούμενου σχήματος 3. 4

σχήμα 3.5

Η γεωμετρία πράγματι θέλει κάποια επεξήγηση. Αυτή η οπτική γωνία είναι παράλληλη στον ισημερινό του αστέρα που στο σχήμα ονομάζεται SX. Αν η κλίση i ήταν $i=90^\circ$ τότε το ίχνος του πλανήτη πάνω στον αστέρα θα ταυτιζόταν με τον ισημερινό. Επειδή όμως η κλίση είναι $i<90$, το αντίστοιχο ίχνος του πλανήτη κατά την διάρκεια της διάβασής του μπροστά από τον αστέρα ταυτίζεται με το ίχνος QW. Στην ουσία αν θέλουμε να είμαστε ακριβείς θα πρέπει να πούμε ότι η χορδή QW του σχήματος 3.5 δεν ταυτίζεται πλήρως με την πλευρά Z του σχήματος 3.4 διότι στο προηγούμενο σχήμα ισχύει

$$z = \left(1 - \frac{d}{D}\right) R \quad (3.3)$$

Όπου D η απόσταση αστέρα – παρατηρητή. Επειδή όμως $d \ll D$ μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εξίσωση 3.3 γίνεται $Z=R$. Το ίδιο συμβαίνει και στο σχήμα 3.5 με την προβολή της τροχιάς του αστέρα πάνω στον αστέρα. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $ON=Z$. Άρα με τα καινούρια αυτά στοιχεία η εξίσωση 3.2 μετατρέπεται σε

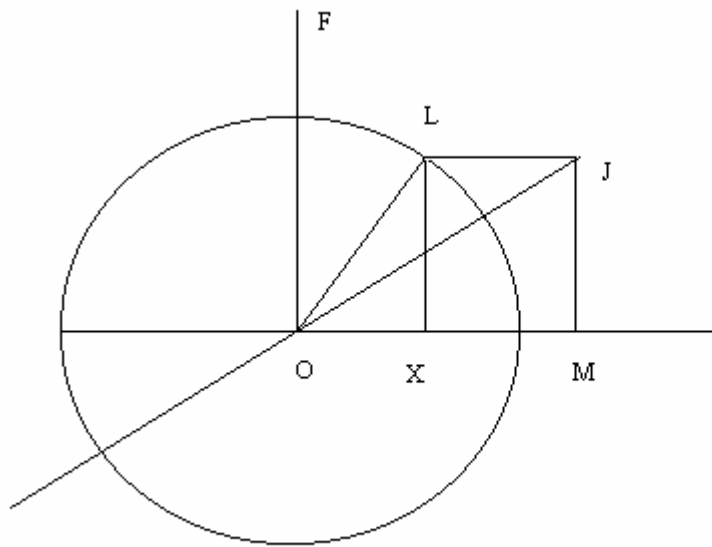
$$\varepsilon\phi\left(180 \frac{t}{T}\right) = \frac{ON}{d}$$

$$\varepsilon\phi\left(180 \frac{t}{T}\right) = \frac{\sqrt{OW^2 - WN^2}}{d} \text{ όπου } OW = R$$

$$\varepsilon\phi\left(180 \frac{t}{T}\right) = \frac{\sqrt{R^2 - WN^2}}{d} \text{ λύνοντας ως προς } WN$$

$$WN = \sqrt{R^2 - d^2 \varepsilon\phi^2\left(180 \frac{t}{T}\right)} \quad (3.4)$$

Έτσι καταλήξαμε σε μία εξίσωση με έναν μοναδικό άγνωστο που όπως θα δούμε στο επόμενο σχήμα έχει άμεση σχέση με την κλίση i .



σχήμα 3.6. Στο σχήμα αυτό βλέπουμε τον αστέρα από πλάγια (προφίλ). Η ευθεία OJ ορίζει το επίπεδο της τροχιάς του πλανήτη και L είναι η προβολή του πάνω στον αστέρα. Η γωνία FOJ είναι αυτή που ονομάζουμε κλίση i . Ο παρατηρητής (Π) βρίσκεται στο άπειρο, άρα οι ευθείες JL και XM είναι πρακτικά παράλληλες.

Για συντομία και ευκολία των πράξεων ορίζουμε ως γωνία $\omega = \angle JOM$ άρα $i = 90^\circ - \omega$.

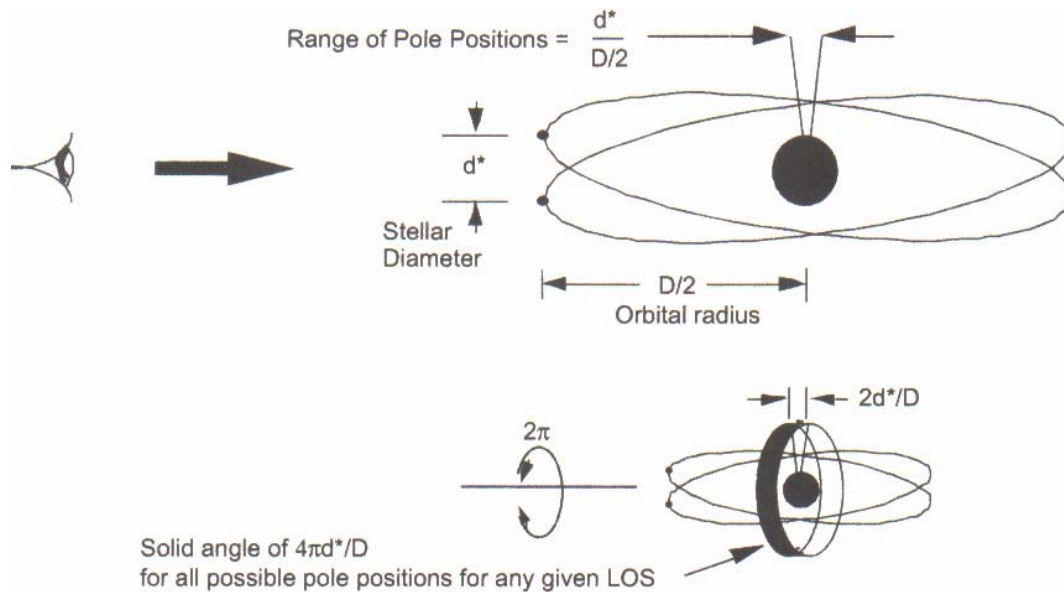
$$\eta\mu\omega = \frac{JM}{d} \quad (3.6)$$

Ξέρουμε ήδη ότι το τμήμα JM είναι ουσιαστικά το τμήμα WN του προηγούμενου σχήματος. Έτσι η εξίσωση (3.6) με την βοήθεια της (3.5) γίνεται

$$\eta\mu\varpi = \frac{\sqrt{R^2 - d^2 \varepsilon \phi^2 \left(180 \frac{t}{T}\right)}}{d} \quad (3.7) \quad \acute{\alpha}\rho\alpha$$

$$i = 90 - \tau\omicron\xi\eta\mu \left(\frac{\sqrt{R^2 - d^2 \varepsilon \phi^2 \left(180 \frac{t}{T}\right)}}{d} \right) \quad (3.8)$$

Έτσι υπολογίσαμε την κλίση του επιπέδου της τροχιάς του πλανήτη. Παρακάτω θα δούμε ότι η εξίσωση (3.8) δουλεύει περίφημα σε ήδη γνωστά συστήματα. Η κλίση του επιπέδου της τροχιάς είναι πολύ χρήσιμο στοιχείο. Στην ουσία είναι αυτή, μαζί με την ακτίνα της τροχιάς του πλανήτη, που καθορίζουν αν κάποια διάβαση είναι παρατηρήσιμη ή όχι. Ας δούμε τι συμβαίνει στο ηλιακό σύστημα. Το σχήμα 3.7 μας βοηθάει να φανταστούμε λίγο τι συμβαίνει με τις τροχιές.



σχήμα 3.7. Φαίνονται καθαρά οι δυνατές τροχιές του πλανήτη προκειμένου να τον παρατηρήσουμε

Μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε από το σχήμα ότι το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η κλίση i , για να γίνει αντιληπτή κάποια διάβαση είναι

$$V = \frac{R}{d}$$

Ενώ όλες οι πιθανές γωνίες που μπορούν να σχηματιστούν είναι

$$V_{tot} = 2\pi \frac{R}{d}$$

Συνεπώς, όπως αναφέρουν και οι Koch & Borucki (1994), η πιθανότητα να παρατηρήσουμε κάποια διάβαση σε έναν αστέρα αν αυτός διαθέτει πλανητικό σύστημα είναι

$$P = \frac{50R}{d} \% \quad (3.9)$$

Η εξίσωση (3.9) είναι ιδιαίτερα σημαντική. Και αυτό θα φανεί στον παρακάτω πίνακα. Αν κατασκευάσουμε λοιπόν έναν πίνακα με τις τιμές για το δικό μας ηλιακό σύστημα και με δεδομένο ότι ο Ήλιος έχει ακτίνα $R=0,0093$ AU τότε

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

Πλανήτης	Διάρκεια διάβασης (h)	Περίοδος τροχιάς (years)	Ακτίνα τροχιάς (AU)	Πιθανότητα παρατήρησης %	Κλίση i
Ερμής	8,1	0,241	0,39	1,19	7,0
Αφροδίτη	11	0,615	0,72	0,65	3,4
Γη	13	1,00	1,00	0,47	0,0
Άρης	16	1,88	1,52	0,31	1,9
Δίας	30	11,86	5,2	0,089	1,3
Κρόνος	40	29,5	9,5	0,049	2,5
Ουρανός	57	84,0	19,2	0,024	0,8
Ποσειδώνας	71	164,8	30,1	0,015	1,8

Η πιθανότητα να ανιχνεύσουμε ένα πλανητικό σύστημα όμοιο με το δικό μας είναι πολύ μικρή. Όπως προκύπτει από την πιθανότητα ανίχνευσης του Ερμή, που είναι και η μεγαλύτερη, στα 10000 παρατηρούμενα αστέρια μόνο τα 119 θα έχουν κάποιο πλανήτη που η γεωμετρία της τροχιάς του μας επιτρέψει να τον καταγράψουμε. Παρακάτω που θα μιλήσουμε για την μεταβολή της λαμπρότητας, θα δούμε ότι η πιθανότητα αυτή σήμερα είναι πολύ μικρότερη.

Μέχρι στιγμής τα στοιχεία που μπορέσαμε να υπολογίσουμε από ένα άλλο πλανητικό σύστημα είναι η ταχύτητα περιφοράς του πλανήτη, η ακτίνα της τροχιάς του, η περίοδο περιφοράς, η διάρκεια του φαινομένου της διάβασης, η κλίση του επιπέδου της τροχιάς του και η πιθανότητα παρατήρησης της διάβασης. Μετά από όλα αυτά μπορούμε να μιλήσουμε και για την ακτίνα του πλανήτη. Η λαμπρότητα ενός αστέρα δίνεται από την γνωστή σχέση

$$L = 4\pi R^2 F$$

Με απλά λόγια είναι το γινόμενο της ροής της ακτινοβολίας που προέρχεται από έναν σφαιρικό αστέρα και της επιφάνειας του αστέρα. Γνωρίζουμε από την αστροφυσική ότι

$$L = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3.10)$$

Και έτσι η προηγούμενη εξίσωση γίνεται

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (3.11)$$

όταν λοιπόν ένα σφαιρικό σώμα, όπως ένας πλανήτης, μπει μπροστά από τον αστέρα τότε προφανώς η λαμπρότητα του αστέρα μειώνεται. Είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι η ροή της ακτινοβολίας του αστέρα θα παραμείνει ίδια αφού δεν συμβαίνει τίποτα πάνω στον αστέρα. Η επιφάνεια όμως που αντικοβολεί θα έχει αλλάξει. Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε ότι η ακτίνα του πλανήτη είναι r , τότε η λαμπρότητα του αστέρα κατά την διάρκεια της διάβασης θα είναι

$$\begin{aligned} L &= 4\pi R^2 \sigma T^4 - 4\pi r^2 \sigma T^4 \Rightarrow \\ L &= 4\pi (R^2 - r^2) \sigma T^4 \end{aligned} \quad (3.12)$$

το φαινόμενο μέγεθος ενός αστέρα που βρίσκεται σε απόσταση D από την Γη δίνεται από την σχέση

$$m = -2,5 \log \left(\frac{L}{4\pi D^2} \right) \quad (3.13)$$

έτσι αν προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την μεταβολή του φαινομένου μεγέθους του αστέρα κατά την διάβαση του πλανήτη είναι

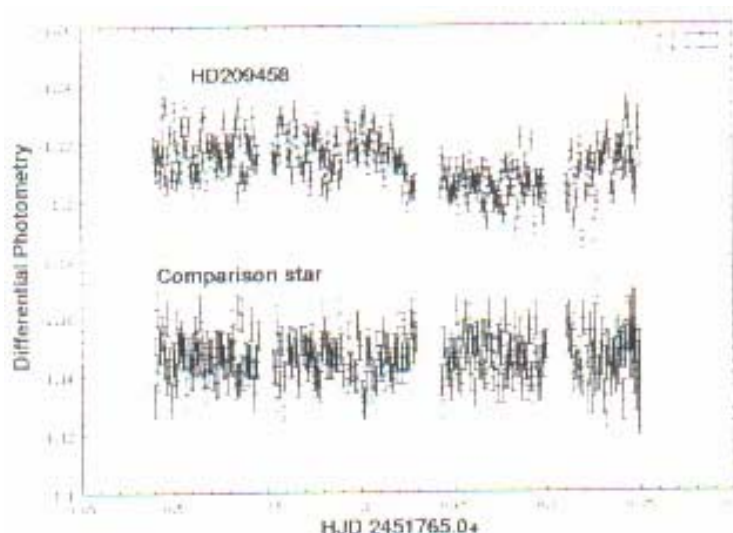
$$\begin{aligned} \Delta m &= -2,5 \log \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \Rightarrow \\ \Delta m &= -2,5 \log \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \Rightarrow \\ \Delta m &= -2,5 \log \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \end{aligned}$$

έτσι λύνοντας ως προς την ακτίνα του πλανήτη θα έχουμε

$$r = R \sqrt{1 - 10^{-\frac{\Delta m}{2,5}}} \quad (3.14)$$

η εξίσωση (3.14) είναι πολύ σημαντική διότι η ακτίνα του πλανήτη είναι το κλειδί για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα χαρακτηριστικά του πλανήτη, όπως πυκνότητα, όγκος, πιθανή ατμόσφαιρα.

Ο πιο παρατηρησιμός αστέρας που έχει την πιο εμφανή διάβαση είναι ο HD 209458. Η καμπύλη λαμπρότητας – χρόνου του αστέρα κατά την διάρκεια μιας διάβασης κατασκευάστηκε από το School of Physics and Astronomy του πανεπιστημίου St. Andrews (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1

Έχουμε δύο καμπύλες. Η πάνω είναι του αστέρα HD 209458 και η κάτω του αστέρα οδηγού. Παρατηρούμε ότι ο αστέρας οδηγός είναι ιδιαίτερα σταθερός στην λαμπρότητά του, ο HD 209458 προς το τέλος της παρατήρησης έχει μια μικρή μεταβολή της τάξης $0,015 \pm 0,002 \text{ mag}$. Από την διαρκή παρατήρηση συμπεράναμε ότι ο πλανήτης περνάει μπροστά από τον αστέρα κάθε $T=3,524739 \pm 0,000014$ μέρες και η διάβαση διαρκεί $t=5,5$ ώρες περίπου. Από τους καταλόγους βρήκαμε ότι η μάζα και η ακτίνα του αστέρα είναι $M=1,1M_{\odot}$ και $R=1,2R_{\odot}$ αντίστοιχα. Επίσης από την φασματοσκοπία υπολογίσαμε την ακτίνα της τροχιάς του πλανήτη και την μάζα του. Αυτά είναι $d=0,0467 \text{ AU}$ και $M=0,63M_{\text{jup}}$ αντίστοιχα. Από την εξίσωση (3.8) υπολογίζουμε την κλίση i του επιπέδου της τροχιάς του πλανήτη $i=85,9^{\circ}$ ενώ στο St. Andrews την είχαν βρει ίση με $i=86,1^{\circ} \pm 1,6^{\circ}$. Επίσης από την εξίσωση (3.14) βρίσκουμε ότι η ακτίνα του πλανήτη είναι $R=1,37R_{\text{jup}}$ ενώ στην Σκωτία την υπολογίσανε ίση με $R=1,4 \pm 0,17 R_{\text{jup}}$. Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων ας τα τοποθετήσουμε σε έναν πίνακα

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2
Αστέρας HD 209458

	Κλίση επιπέδου τροχιάς i	Ακτίνα πλανήτη (R_{jup})	Πυκνότητα (gr/cm^3)	Πιθανότητα ανίχνευσης (%)
St. Andrews	$86,1^\circ$	1,4	0,31	-----
Steward Obs. Arizona	$86,86^\circ$	1,347	-----	-----
High Altitude Obs. and Harvard	$87,1^\circ$	1,27	-----	-----
Κρυονέρι	$85,9^\circ$	1,37	0,33	11

3.4 Μέθοδος WASP0 – Εξοπλισμός

Η μέθοδος WASP0 (Wide Angle Search for Planets) χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο Isaac Newton Group (La Palma) για λογαριασμό του πανεπιστημίου St. Andrew της Σκωτίας και του πανεπιστημίου Queen του Belfast. Μετά από έναν χρόνο όλος ο εξοπλισμός μεταφέρθηκε στο Εθνικό Αστεροσκοπείο, στο Κρυονέρι Κορινθίας όπου το δουλέψαμε ένα χρόνο και έμεινε εκεί. Έπειτα το Εθνικό Αστεροσκοπείο μας δάνεισε την CCD κάμερα και έτσι αρχίσαμε να παίρνουμε μετρήσεις στον Χολομώντα Χαλκιδικής. Ήταν ένας εύκολος σχετικά τρόπος για την ανίχνευση έξω – ηλιακών πλανητών χωρίς, να έχει την ανάγκη μεγάλων τηλεσκοπίων. Η μέθοδος χρησιμοποιούσε μια από της καλύτερες ψηφιακές κάμερες του κόσμου (CCD), την arogee 10 σε συνδυασμό με έναν τηλεφακό Nikon 180mm πολύ μεγάλης ακρίβειας. Η CCD μαζί με τον τηλεφακό στηρίζονταν στην πλάτη ενός μικρού τηλεσκοπίου του οποίου η μόνη του χρήση ήταν να οδηγεί σωστά την CCD. Έπειτα στοχεύαμε στο σημείο του ουρανού που επιθυμούσαμε και παίρναμε διαδοχικές εικόνες.

Στην πράξη δυστυχώς η μέθοδος είναι τρομερά δύσκολη. Ο τηλεφακός έχει οπτικό πεδίο $9^\circ \times 9^\circ$ έτσι ώστε, όπως λέγαμε και παραπάνω, να καταγράφουμε όσο το δυνατόν περισσότερα αστέρια και να έχουμε περισσότερες πιθανότητες να ανιχνεύσουμε κάποιον πλανήτη. Για τον λόγο αυτό δεν θα ήταν χρήσιμο να τοποθετήσουμε την κάμερα στην πλάτη κάποιου μεγάλου τηλεσκοπίου που θα βρίσκεται μέσα σε κάποιο θόλο, γιατί το παράθυρο του θόλου έχει πολύ περιορισμένο πεδίο στον ουρανό. Άρα είναι οφθαλμοφανές ότι χρειαζόμαστε ένα φορητό τηλεσκόπιο στο ύπαιθρο όπου μπορούμε να αξιοποιήσουμε και τις 8 μοίρες του τηλεφακού. Το μεγάλο πρόβλημα είναι το βάρος. Η κάμερα μαζί με τον τηλεφακό έχουν υπερβολικό βάρος για ένα φορητό τηλεσκόπιο με αποτέλεσμα να μην οδηγεί την κάμερα σωστά. Επίσης το φορητό τηλεσκόπιο έχει πολύ περιορισμένες ικανότητες στην ευθυγράμμισή του με τον άξονα της Γης και σε συνδυασμό με το παραπάνω βάρος η όποια ευθυγράμμιση καταντούσε σχεδόν ανύπαρκτη. Στο Isaac Newton, αλλά και στο Εθνικό Αστεροσκοπείο το τηλεσκόπιο που διέθεταν ήταν Meade LX200 με αυτόματο χειρισμό και δυνατότητα τοποθέτησης παραπάνω βάρους. Το τηλεσκόπιο αυτό είναι πολύ μεγάλο, σταθερό και ενδείκνυται για την Arogee 10 μαζί με τον τηλεφακό (σχήμα 3.8).



σχήμα 3.8. Είναι το τηλεσκόπιο MEADE LX200 που χρησιμοποιούσαμε στο Κρυονέρι Κορινθίας για την ανίχνευση πλανητών

Εμείς όμως δεν είχαμε την δυνατότητα να έχουμε ένα τέτοιο όργανο και αρκεστήκαμε στο Celestron GN8. Για να δώσουμε μια εικόνα θα πούμε ότι όσο ζύγιζε η CCD με τον τηλεφακό, ζύγιζε περίπου το τηλεσκόπιο. Όπως αναφέραμε στο δεύτερο κεφάλαιο, το πρόβλημα της ευθυγράμμισης αντιμετωπίστηκε με ένα όργανο ακριβείας, την πολική διόπτρα (κεφ. 2^ο). Το πρόβλημα του βάρους προσπαθήσαμε να το λύσουμε με πιο ανορθόδοξο τρόπο, τοποθετώντας μικρά τουβλάκια στο αντίβαρο ώσπου όλο το σύστημα να ισορροπήσει όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9



Σχήμα 3.9. Διακρίνονται το τηλεσκόπιο Celestron GN8, η CCD Apogee 10 και η μικρή σακούλα δεμένη στα αντίβαρα που περιέχει τα τουβλάκια, προκειμένου να ισορροπήσει το τηλεσκόπιο.

3.4.1 Εξοπλισμός – CCD

Το παν για την ανίχνευση έξω – ηλιακών πλανητών είναι να διαθέτει κάποιος μια πολύ καλή CCD κάμερα. Το τι σημαίνει όμως καλή CCD θα το δούμε παρακάτω. Όπως και κάθε μηχανήμα, έτσι και η CCD έχει κάποια χαρακτηριστικά. Τα βασικότερα στην προκειμένη περίπτωση είναι:

Gain (e/ADU) : είναι ο συντελεστής μετατροπής των φωτοηλεκτρονίων σε ψηφιακές μονάδες

Readout noise (e) : είναι ο θόρυβος της κάμερας σε ηλεκτρόνια

Operating Temperature : είναι η θερμοκρασία στην οποία ψύχεται η κάμερα

X – Y imaging area : είναι οι διαστάσεις της εικόνας σε pixels

Cosmic ray rate (1/2 hour) : είναι τα σήματα που οφείλονται σε κοσμική ακτινοβολία μέσα σε διάρκεια 30 λεπτών.

Linearity (2000 – end) : είναι ο συντελεστής γραμμικότητας της κάμερας σε μεγάλα ADU (από 2000 ADUs και πάνω)

Linearity (0 – 2000) : ομοίως είναι η γραμμικότητα της κάμερας σε μικρά ADU (κάτω από 2000 ADUs)

Τα χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή είναι το Gain και το Readout noise. Τα υπόλοιπα μπορεί ο κάθε παρατηρητής να τα ελέγξει. Για παράδειγμα αυτή η εργασία έγινε στην CCD κάμερα του Εθνικού Αστεροσκοπείου και βρέθηκαν τα εξής:

Gain = 5.1 e⁻/ADU

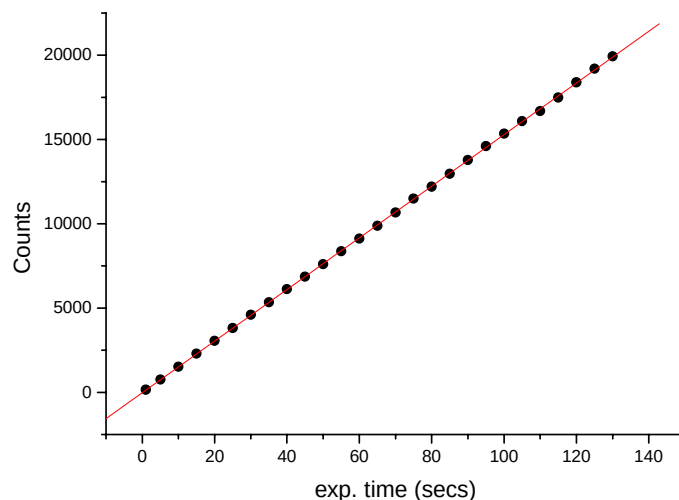
Readout noise = 9

Operating Temperature = - 40° C

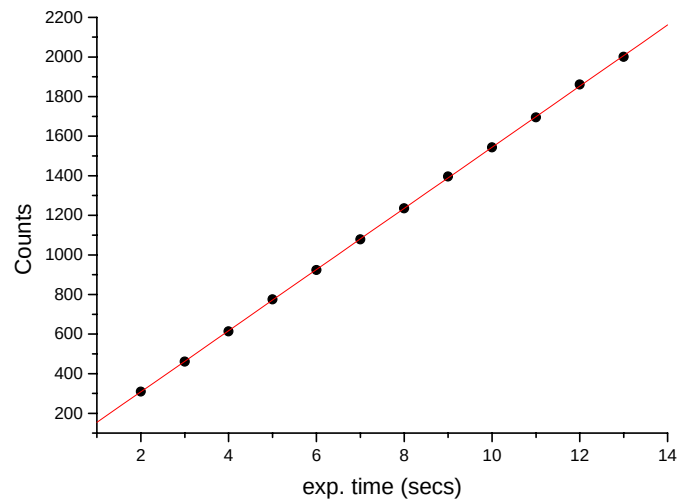
X – Y imaging area = 512 x 512

Cosmic ray rate = 100/30 min

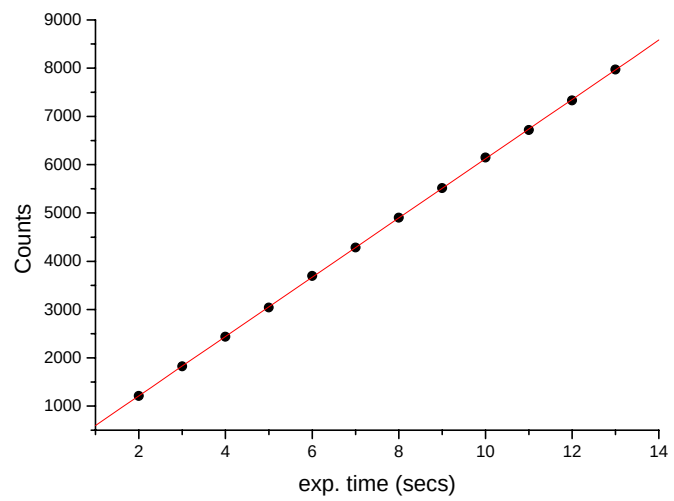
Linearity (2000-30000) = 0,99997



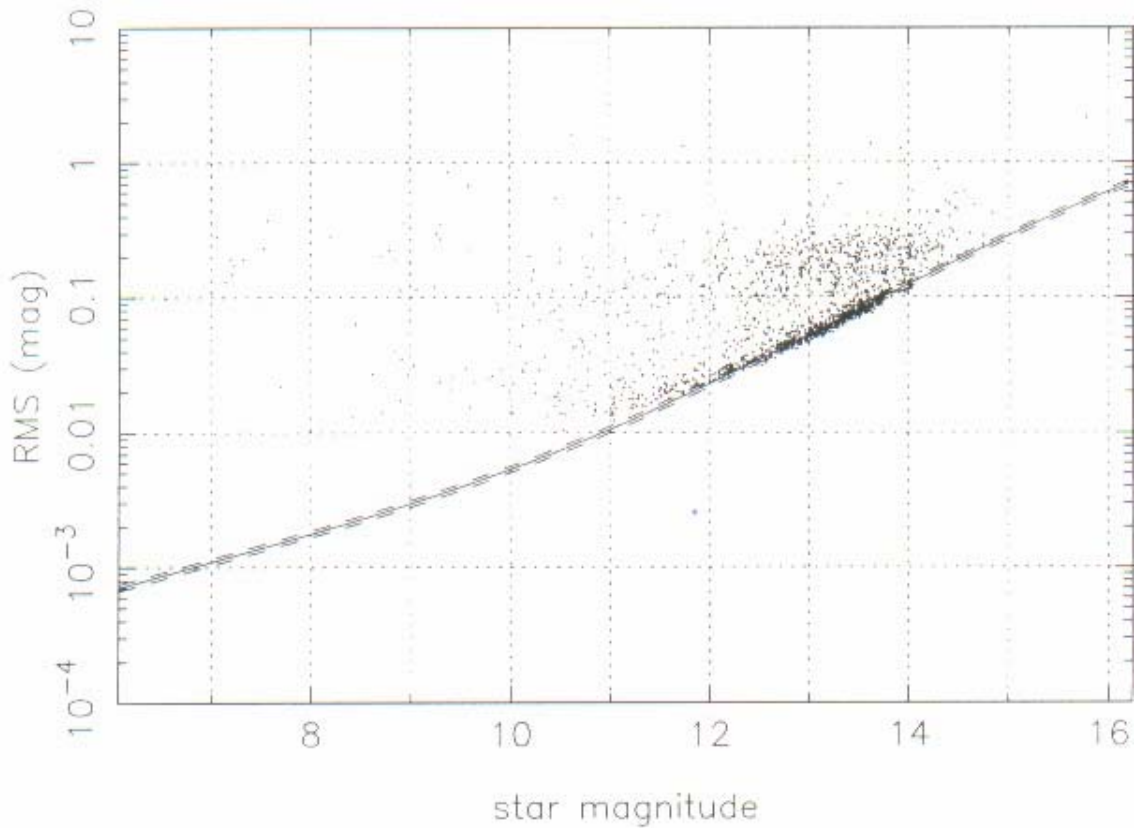
Linearity (0 – 2000) gain x1= 0,99997



Linearity (0 – 9000) gain x4 = 0,99997



Βλέπουμε λοιπόν ότι τα χαρακτηριστικά της κάμερας του Εθνικού Αστεροσκοπείου στο τηλεσκόπιο των 1,2 μέτρων είναι πάρα πολύ καλά. Άρα οι παρατηρήσεις από πλευρά κάμερας είναι ακριβείας. Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να κάνουμε και τεστ ποιότητας της Argee 10. Εκτός όμως από το κλασικό τεστ ποιότητας της κάμερας, το οποίο έδειξε ότι η κάμερα συμπεριφέρεται ικανοποιητικά, μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε να μελετούσαμε την συμπεριφορά της κάμερας σε συνάρτηση του φαινομένου μεγέθους των αστερών που παρατηρεί (σχήμα 3.10)



σχήμα 3.10. Συμπεριφορά της κάμερας σε συνάρτηση του φαινομένου μεγέθους

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της Apogee 10 είναι

Readout Noise : 13 e^- /ADU

Gain : 7-8 e^-

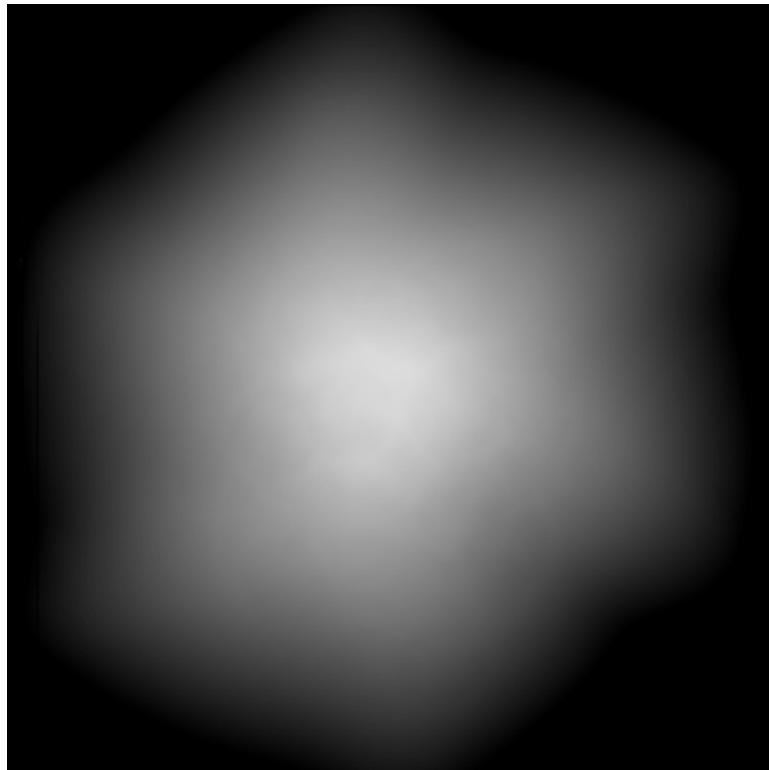
Temperature : -20° C

Pixels : 2048 x 2048

Γραμμικότητα : 0,9996

3.4.2 Λογισμικό – Επεξεργασία

Αν στήσουμε τα μηχανήματα σωστά και κατορθώσουμε να πάρουμε κάποιες εικόνες, όλα τα υπόλοιπα είναι θέμα λογισμικού και επεξεργασίας. Ανάλογα με τις δυνατότητές μας διαλέγουμε πόσο αυτοματοποιημένα θα γίνονται οι παρατηρήσεις και η επεξεργασία. Οι παρατηρήσεις καταγράφονταν με το λογισμικό MaxIm DL. Αρχικά, ψύχαμε την κάμερα ηλεκτρονικά από το λογισμικό στους -20°C , μέσα σε μερικά λεπτά (αν και προτείνουμε ο υπολογιστής να μένει ανοιχτός συνεχώς ώστε η κάμερα να έχει πάντα την ίδια θερμοκρασία). Έπειτα μόλις άρχισε το λυκόφως παίρναμε τις εικόνες αντιστάθμισης, γνωστά και ως flats frames. Η τεχνική ήταν η εξής. Στοχεύαμε στο ζενίθ και με διάφορους χρόνους έκθεσης προσπαθούσαμε να πάρουμε μια ομοιόμορφα φωτισμένη εικόνα από 9000 – 15500 ADU. Όταν νύχτωνε πολύ και άρχισαν να διακρίνονται αστέρες μέσα στο flat frame τότε σταματούσαμε. Η ίδια δουλειά γινόταν και το ξημέρωμα. Κατά την διάρκεια της νύχτας μπορούσαμε να πάρουμε και άλλα flats αν θέλαμε, αντικαθιστώντας τον φωτεινό ουρανό με μια ομοιόμορφα φωτισμένη λευκή επιφάνεια. Τα flats είναι οι σημαντικότερες εικόνες για τον εντοπισμό πλανητών και γενικά για κάθε είδος ψηφιακής φωτομετρίας. Επειδή για τον εντοπισμό πλανητών χρειαζόμαστε πολύ μεγάλη ακρίβεια στην φωτομετρία, πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν περισσότερα και καλύτερα flats.



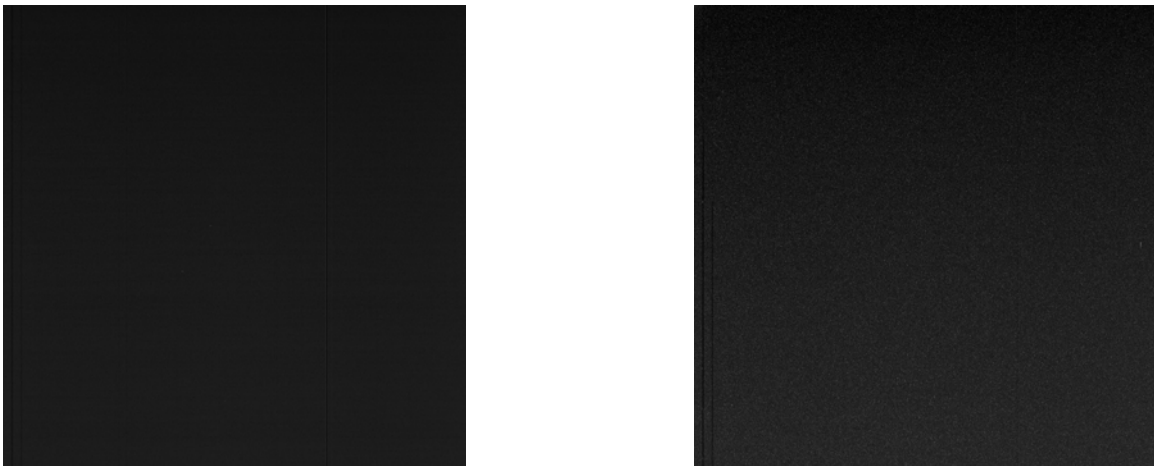
Σχήμα 3.11. Ένα τυπικό flat frame. Το frame αυτό έχει 8500 έως 13500 ADU.

Έπειτα στοχεύαμε στο σημείο του ουρανού που είχαμε επιλέξει για τον εντοπισμό πλανητών. Εμείς στοχεύαμε στο ανοιχτό σμήνος που βρίσκεται στο κεφάλι του Δράκου με συντεταγμένες

$$R. A = 17^h 40^m 00^{sec}$$

$$Dec = +47^\circ 55' 00''$$

Το πρόγραμμα MaxIm DL είχε την δυνατότητα να αυτοματοποιεί τις παρατηρήσεις. Γράφαμε δηλαδή κάποιο script το οποίο είχε την δυνατότητα να παίρνει frames και να τα αποθηκεύει με το όνομα που επιθυμούσαμε. Αρχικά η κάμερα έπαιρνε 5 Bias frames (εικόνες θορύβου νεκρού χρόνου) 4 Dark frames (εικόνες θορύβου σε χρόνο ίσο με τον χρόνο έκθεσης).



Σχήμα 3.12. Από αριστερά προς τα δεξιά, Bias και Dark frames

Έπειτα από τα Bias και Dark παίρναμε εικόνες του σμήνους με δύο διαφορετικούς χρόνους έκθεσης. Έναν $t_1 = 20$ sec και έναν δεύτερο $t_2 = 120$ sec. Στον πρώτο χρόνο έκθεσης καταφέραμε τα λαμπρά άστρα του σμήνους να μην έχουν κορεσμένα pixels, αλλά τα 20 sec δεν ήταν αρκετά ώστε να παρατηρήσουμε και αμυδρά αστέρια. Αυτό το καταφέραμε με τον δεύτερο χρόνο έκθεσης. Έπειτα από 50 εκθέσεις 20 και 120 sec διαδοχικά, το λογισμικό έδινε εντολή στην κάμερα να πάρει ακόμα 5 Bias και Dark frames. Μετά άρχιζε η διαδικασία των εικόνων ουρανού όπως και προηγουμένως. Ένα κομμάτι από τον κώδικα του script φαίνεται παρακάτω. Είναι τα πρώτα 50 frames :

```
Dim cam ' "The" Camera object
```

```
Set cam = CreateObject("MaxIm.CCDCamera")
```

Το λογισμικό εδώ ανοίγει το MaxIm DL

```
cam.LinkEnabled = True
```

```
if Not cam.LinkEnabled Then
```

```
Console.WriteLine "Failed to start camera."
```

Quit
End If

Ψάχνει την CCD στην κατάλληλη θύρα του υπολογιστή. Αν δεν την βρει σταματάει το script

cam.Expose 0, 0, 0

τα 0, 0, 0 σημαίνουν ότι η ίριδα της κάμερα είναι κλειστή (άρα πρόκειται για εικόνα θορύβου) και ο χρόνος έκθεσης είναι μηδέν (άρα πρόκειται για Bias frame)

Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS001.fit"

“κατεβάζει” την εικόνα στον υπολογιστή και την σώζει με το όνομα «BIAS001.fit»

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS002.fit"

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS003.fit"

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS004.fit"

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS005.fit"

cam.Expose 120, 0, 0

μετά τα Bias frames αρχίζει να παίρνει εικόνες ξανά με κλειστή την ίριδα, αλλά αυτή την φορά ο χρόνος έκθεσης είναι 120 sec (πρόκειται για Dark frame)

Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DARK001.fit"

ομοίως σώζει το frame σαν «DARK001.fit»

cam.Expose 20, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DARK002.fit"

cam.Expose 120, 0, 0

```
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DARK003.fit"
```

```
cam.Expose 20, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DARK004.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
είναι η πρώτη εικόνα ουρανού με ανοιχτή ίριδα (120, 1, 0) με χρόνο έκθεσης 120 sec
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA001.fit"
την οποία την σώζει σαν «DRA001.fit»
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA002.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA003.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA004.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA005.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA006.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA007.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA008.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
```

cam.SaveImage "DRA009.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA010.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA011.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA012.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA013.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA014.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA015.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA016.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA017.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA018.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA019.fit"

cam.Expose 20, 1, 0

*Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA020.fit"*

*cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA021.fit"*

*cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA022.fit"*

*cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA023.fit"*

*cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA024.fit"*

*cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA025.fit"*

*cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA026.fit"*

*cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA027.fit"*

*cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA028.fit"*

*cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA029.fit"*

*cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA030.fit"*

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA031.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA032.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA033.fit"
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA034.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA035.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA036.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA037.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA038.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA039.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA040.fit"
```

```
cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA041.fit"
```

```
cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
```

```

Loop
cam.SaveImage "DRA042.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA043.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA044.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA045.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA046.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA047.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA048.fit"

cam.Expose 120, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA049.fit"

cam.Expose 20, 1, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "DRA050.fit"

```

μετά από 50 light frames το λογισμικό δίνει εντολή για ακόμα 5 και 4 Bias και Dark frames αντίστοιχα

```

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop
cam.SaveImage "BIAS006.fit"

cam.Expose 0, 0, 0
Do While Not cam.ImageReady
Loop

```

```
cam.SaveImage "BIAS007.fit"
```

```
cam.Expose 0, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "BIAS008.fit"
```

```
cam.Expose 0, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "BIAS009.fit"
```

```
cam.Expose 0, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "BIAS010.fit"
```

```
cam.Expose 20, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DARK005.fit"
```

```
cam.Expose 120, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DARK006.fit"
```

```
cam.Expose 20, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DARK007.fit"
```

```
cam.Expose 120, 0, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DARK008.fit"
```

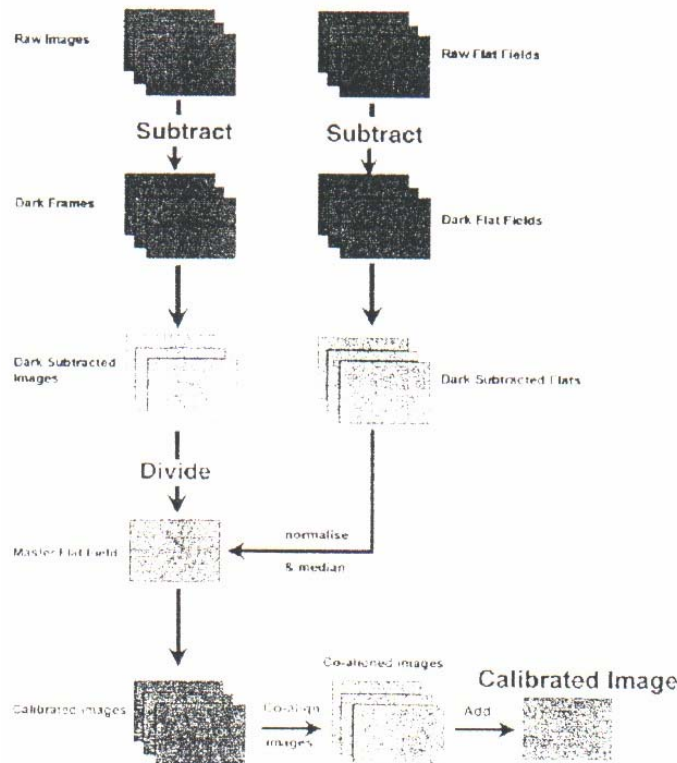
```
cam.Expose 20, 1, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DRA051.fit"
```

και ξανά light frames

```
cam.Expose 120, 1, 0  
Do While Not cam.ImageReady  
Loop  
cam.SaveImage "DRA052.fit"
```


Το script αυτό έχει 1000 παραγράφους. Αν λάβουμε υπόψη μας τα 7 sec που διαρκεί το download της εικόνας αυτό σημαίνει ότι τα 50 frame διαρκούν περίπου 1 ώρα και 10 λεπτά. Άρα όλο το script διαρκεί 23 ώρες και 20 λεπτά. Ποτέ λοιπόν δεν πρόκειται να τελειώσει το script στην μέση της νύχτας.

Αν παρατηρήσουμε τα χαρακτηριστικά άλλων πλανητικών συστημάτων θα δούμε ότι η περίοδο περιφοράς των πλανητών γύρω από τους αντίστοιχους αστέρες είναι της τάξης των ημερών. Έτσι όταν καταγράφουμε συνεχώς το ίδιο πεδίο για έναν μήνα περίπου, τότε είναι πολύ πιθανό να έχουμε ανακαλύψει κάποια διάβαση. Εμείς εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου αλλά και της κακοκαιρίας μπορέσαμε να καταγράψουμε μόνο τις 15 ημέρες, αλλά και αυτές είναι εξίσου ικανοποιητικές. Το δυσκολότερο κομμάτι της έρευνας αυτής είναι η επεξεργασία των δεδομένων. Κάθε frame πρέπει να το επεξεργαζόμαστε ξεχωριστά. Αρχικά αναζητούμε το κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο το MaxIm DL αλλά πρέπει να έχουμε στο μυαλό μας το εξής. Όπως είπαμε πριν η ανίχνευση πλανητών με φωτομετρία απαιτεί την ακριβέστερη φωτομετρία στην ιστορία της Αστρονομίας. Όταν δουλεύουμε στα όρια των μηχανημάτων και αναζητούμε μεταβολές της τάξης του $\Delta m = 0,0017$ στην καλύτερη περίπτωση, είναι λογικό να προτιμήσουμε κάποιο λογισμικό για φωτομετρία μεγάλης ακρίβειας, όπως το ESO – Midas, IRAF, DaoPhot II κτλ. Αρχικά αφαιρούμε τα Bias και Dark frames από τα light και τα flat. Μετά διαιρούμε τα light frames με τα flat και έχουμε τις εικόνες ουρανού έτοιμες για φωτομετρία. Πολύ επεξηγηματικό είναι το σχήμα 3.13.



σχήμα 3.13. Μας δείχνει την διαδικασία της επεξεργασίας των ψηφιακών εικόνων πριν την φωτομετρία.

Για την ψηφιακή φωτομετρία χρειαζόμαστε έναν αστέρα οδηγό ο οποίος θα είναι πολύ σταθερός στην λαμπρότητά του. Έπειτα μετράμε την λαμπρότητα για κάθε αστέρα του πεδίου και αφαιρούμε την αντίστοιχη τιμή του αστέρα οδηγού. Με αυτό τον τρόπο κατασκευάζουμε μια καμπύλη λαμπρότητας – χρόνου σαν αυτήν που είχαμε εξετάσει στην παράγραφο 3.2.3. Σ' αυτές τις καμπύλες ψάχνουμε πολύ μικρές μεταβολές της λαμπρότητας του αστέρα που ίσως να οφείλεται σε διάβαση κάποιου πλανήτη. Εμείς για την φωτομετρία χρησιμοποιήσαμε το πακέτο DaoPhot II το οποίο σε κάθε frame που προέρχονταν από το πεδίο του Δράκου αναγνώριζε περίπου 20000 – 25000 αστέρες. Αν κάθε νύχτα παρατηρούμε για 5 ώρες περίπου θα έχουμε 250 frame και για 15 μέρες θα έχουμε 75 εκατομμύρια αστέρες για φωτομετρία !!!! Φυσικά είναι αδύνατο κάποιος να μπορέσει να εξετάσει όλους τους αστέρες έναν – έναν. Γι' αυτό έχουν αρχίσει προσπάθειες να αυτοματοποιηθεί και η φωτομετρία, αλλά αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο ακόμα και από διεθνείς ερευνητικές ομάδες. Έτσι στα περιορισμένα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας διαλέξαμε κάποιους λαμπρούς αστέρες και προσπαθήσαμε να εξάγουμε την καμπύλη λαμπρότητας χρόνου.

Εδώ πολύ μεγάλο ενδιαφέρον έχει να δούμε τις πιθανότητες ανίχνευσης κάποιου πλανήτη (παράγραφος 3.3). Θα μας βοηθήσει πολύ να κατασκευάσουμε τον πίνακα 3.1 ξανά

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3

Πλανήτης	Μεταβολή φαινομένου μεγέθους Δmag
Ερμής	0,000013
Αφροδίτη	0,000086
Γη	0,000091
Άρης	0,000025
Δίας	0,011022
Κρόνος	0,007408
Ουρανός	0,001260
Ποσειδώνας	0,001042

Τα δικά μας όργανα σήμερα είναι σε θέση να ανιχνεύσουν μεταβολές στο φαινόμενο μέγεθος της τάξης των $\Delta mag = 0,015$ περίπου. Άρα όπως βλέπουμε και στον πίνακα 3.2 σήμερα δεν είμαστε σε θέση να καταγράψουμε παρόμοιους πλανήτες με του δικού μας ηλιακού συστήματος. Ας υποθέσουμε όμως ότι μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε κάποιον πλανήτη σαν τον Δία. Η πιθανότητα να ανιχνεύσουμε κάτι παρόμοιο, από τον πίνακα 3.1 είναι 0,089% άρα σε 20000 αστέρες μόλις τους 18 θα είμαστε σε θέση να τους καταγράψουμε.

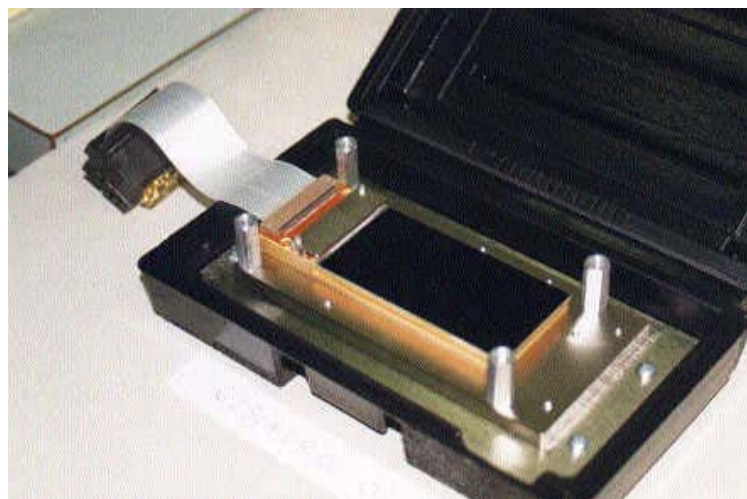
3.5 Άλλες Μέθοδοι Ανίχνευσης Πλανητών

Σήμερα πολλές ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο έχουν κατασκευάσει κάποια μέθοδο ανίχνευσης έξω – ηλιακών πλανητών. Μπορεί πολλές από αυτές τις μεθόδους να έχουν πολλές διαφορές. Ωστόσο όλοι συμφωνούν να προτιμάται γενικά η μέθοδος της φωτομετρίας. Ίσως οι μεγαλύτερες διαφορές σημειώνονται στον εξοπλισμό.

3.5.1 OGLE – III

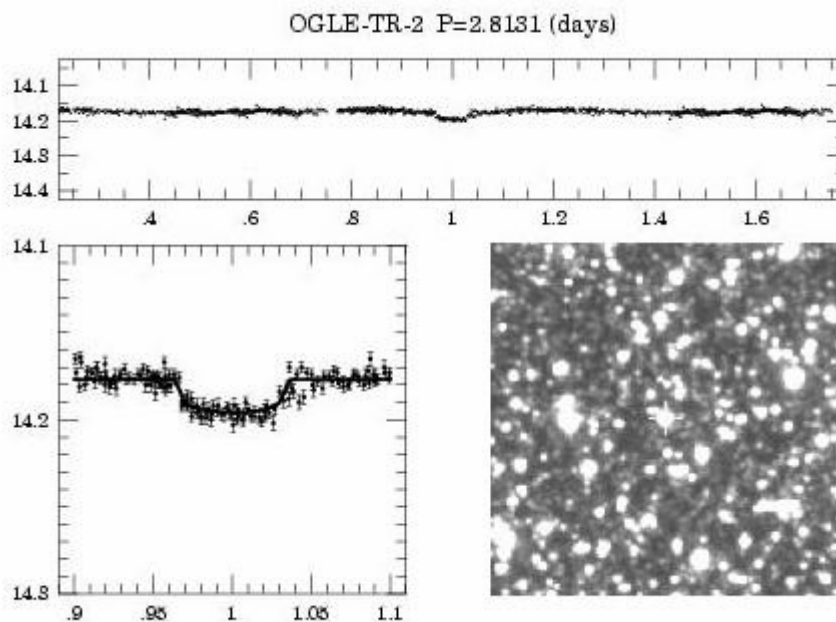
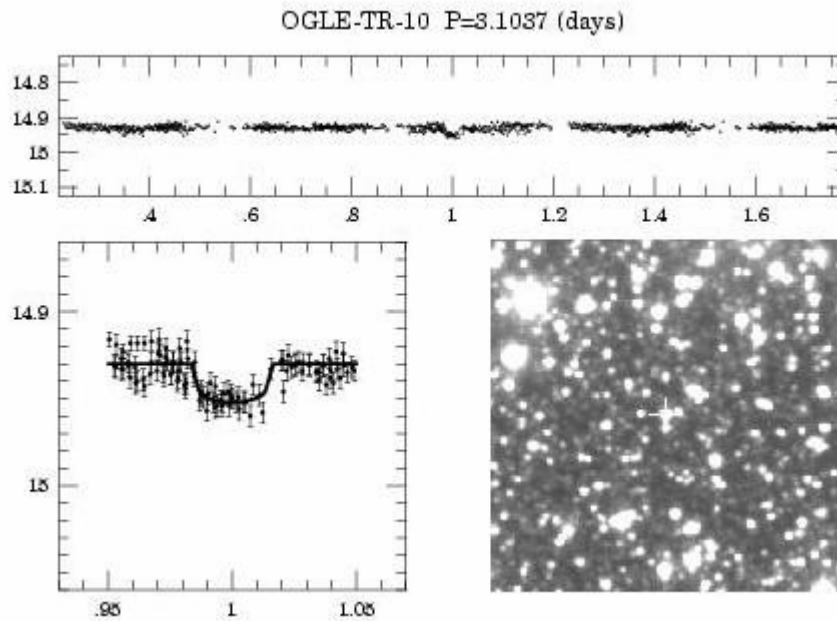


Το πείραμα OGLE τέθηκε σε λειτουργία το 2001 και άρχισε να παρατηρεί μεγάλα πεδία του ουρανού κοντά στο Γαλαξιακό επίπεδο. Χρησιμοποιεί την μέθοδο της φωτομετρίας και το βάρος της έρευνας έχει εστιαστεί σε πολύ αμυδρά αντικείμενα. Μέχρι τώρα υπάρχουν 56 υποψήφια αστέρια που έχουν ανακαλυφθεί από OGLE – III και η συνέχεια αναμένεται πολύ ενδιαφέρουσα. Το σύστημα διαθέτει μια ψηφιακή κάμερα μεγάλης ανάλυσης, 2048 x 2048 pixels, που σε συνδυασμό με το τηλεσκόπιο δίνει ένα πεδίο 35' x 35' στον ουρανό. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας είναι αρκετά καλά και ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το readout noise είναι 6 – 9 ηλεκτρόνια και το gain είναι 13 e⁻/ADU.

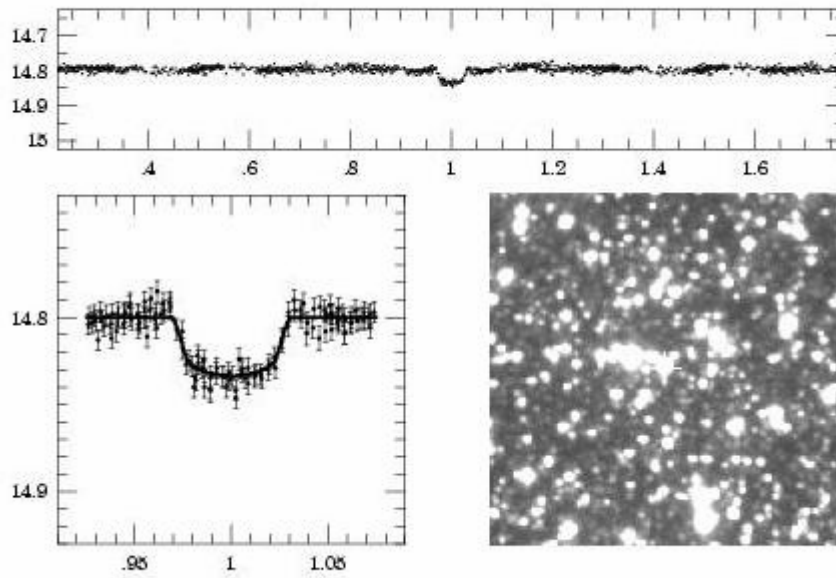


Το chip της ψηφιακής κάμερας

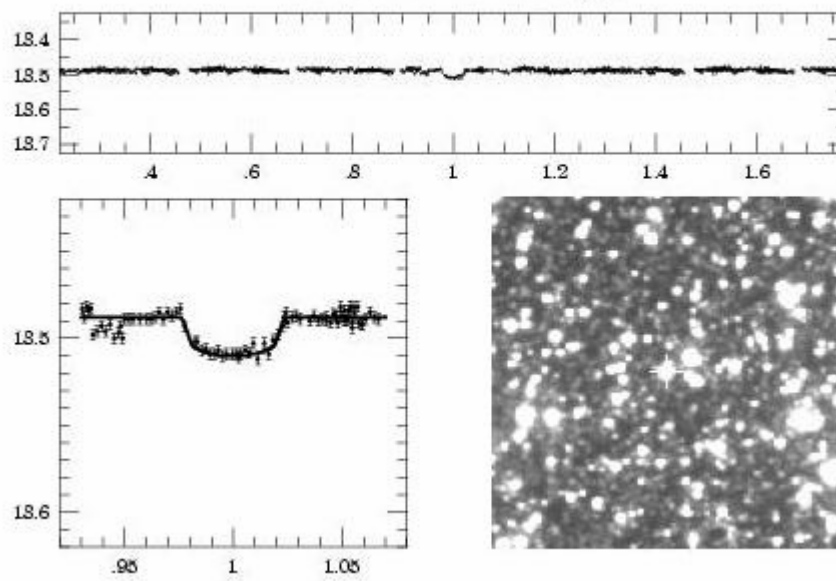
Όμως η επιτυχία της έρευνας αυτής οφείλεται στην ανάλυση των δεδομένων. Ειδικότερα σε ένα εξειδικευμένο λογισμικό επεξεργασίας και φωτομετρίας, που γράφτηκε ειδικά για το OGLE και ελαχιστοποιεί, σχεδόν εξαλείφει τα συστηματικά σφάλματα. Έτσι, όπως θα δούμε και παρακάτω, στις καμπύλες φωτός, η φωτομετρία είναι υπερβολικά πετυχημένη. Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να δούμε μέρος από την δουλειά που έγινε.



OGLE-TR-7 P=2.7179 (days)



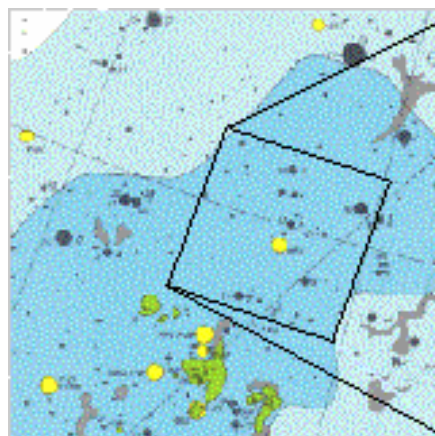
OGLE-TR-41 P=4.5170 (days)



3.5.2 STARE

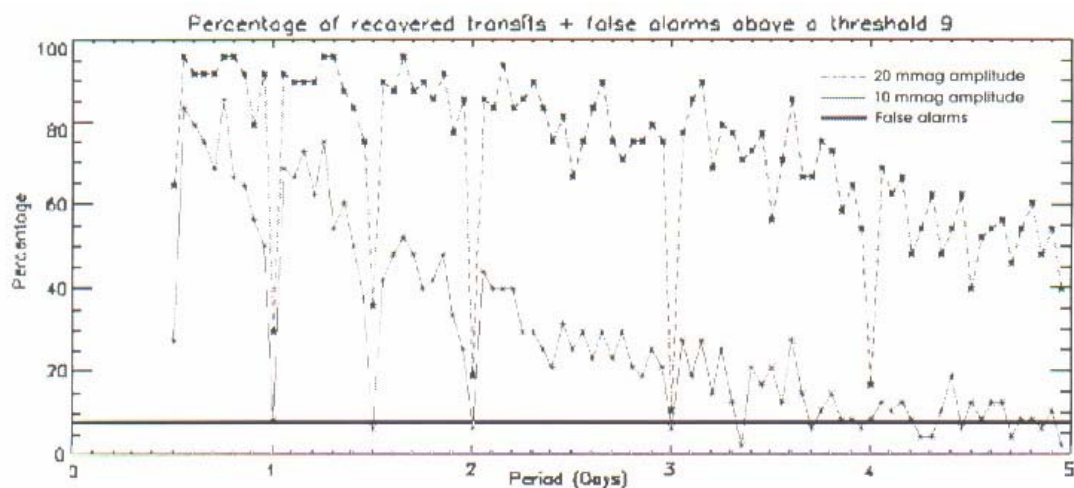
Το STARE είναι ένα πολύ φιλόδοξο πείραμα ανίχνευσης πλανητών σε άλλους αστέρες και λειτουργεί στο Observatorio del Teide στα Κανάρια Νησιά. Χρησιμοποιεί ένα Schmidt τηλεσκόπιο το οποίο μαζί με την ψηφιακή κάμερα σαρώνει 6,1 x 6,1 τετραγωνικές μοίρες στον ουρανό, κοντά στο Γαλαξιακό επίπεδο. Οι συντεταγμένες του πεδίου παρατήρησης είναι

$$\begin{aligned} \text{R.A} &= 19^{\text{h}} 54^{\text{m}} 42^{\text{sec}} \\ \text{Dec} &= +36^{\circ} 59' 44'' \end{aligned}$$



Το πεδίο στο οποίο το πείραμα STARE αναζητεί πλανήτες

Κάθε frame έχει μερικές χιλιάδες αστέρες με μεγέθη από 9,5 έως 13 φαινόμενα μεγέθη. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με το λογισμικό DAOPHOT, το οποίο ανίχνευσε 100000 αστέρες σε υπερέκθεση 5 frames που το καθένα είχε χρόνο έκθεσης 107 sec. Το μειονέκτημα όμως βρίσκεται στην CCD κάμερα, η οποία είναι λίγο αργή. Ο χρόνος που περνάει από την ώρα που η κάμερα τραβάει ένα frame μέχρι αυτό να αποθηκευτεί στον υπολογιστή είναι 13 sec, το οποίο σημαίνει ότι στην καμπύλη φωτομετρίας (λαμπρότητας – χρόνου) έχουμε 1 σημείο κάθε δύο λεπτά. Η τεχνική που εφάρμοσαν ήταν η εξής. Αφού ανακάλυπταν κάποια διάβαση πλανήτη σε ένα από τα αστέρια που κατέγραφαν, προσθέτανε τις καμπύλες φωτομετρίας και έτσι εμφανίζονταν και άλλες διαβάσεις με διαφορετικές περιόδους με μικρότερες μεταβολές στην λαμπρότητα που δεν ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν διαφορετικά. Το πείραμα STARE όμως ασχολήθηκε και με κάτι πολύ ενδιαφέρον παράλληλα. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού δεδομένων μπόρεσαν να ερευνητές εκεί (R. Alonso, J. A. Belmonte, H. Deeg) να κάνουν μια στατιστική μελέτη που αφορούσε τις πραγματικές δυνατότητες που έχουμε στο να καταγράφουμε διαβάσεις πλανητών σε άλλους αστέρες. Έτσι κατασκεύασαν μια καμπύλη με το εκατοστιαίο ποσοστό διαβάσεων που μπορεί να έχει κάποιος αστέρας σε συνάρτηση με την περίοδο παρατήρησης. Τα αποτελέσματα αυτής της στατιστικής φαίνονται στην παρακάτω γραφική παράσταση 3.14



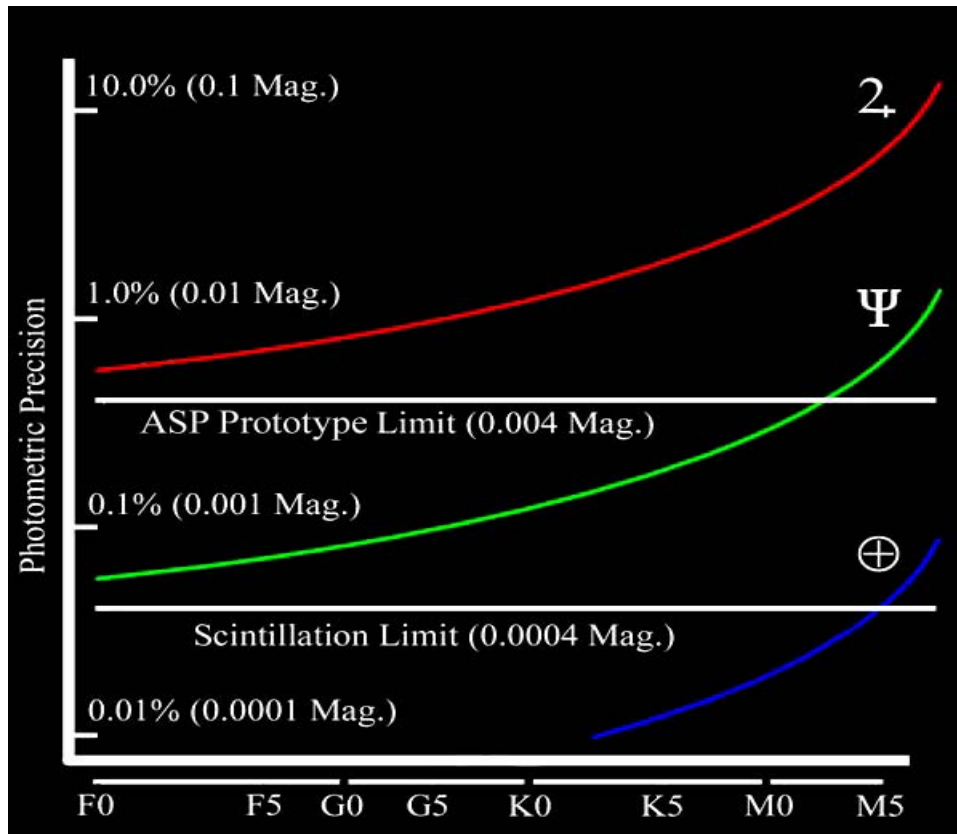
σχήμα 3.14. Βλέπουμε τα συμπεράσματα του πειράματος STARE.

Για να καταλάβουμε τι λέει το παραπάνω σχήμα καλό θα ήταν να κάνουμε ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι καταγράφουμε ένα πεδίο για 4 ημέρες. Τότε είναι πολύ πιθανό, στις διαβάσεις πλανητών που ίσως έχουμε ανακαλύψει να υπάρχουν 15% περισσότερες με μεταβολή φαινομένου μεγέθους ίσο με $\Delta m = 0,01$ mag. Επίσης 5% με μεταβολή $\Delta m = 0,02$ mag και τέλος ένα 8% διαβάσεων που να μην είναι πραγματικές. Δηλαδή μεταβολές που να μην ανήκουν σε κάποιο πλανήτη αλλά σε μεταβλητούς αστέρες ή κάτι άλλο.

Μέχρι σήμερα βάση του πειράματος STARE έχει ανακαλυφθεί 1 πλανήτης.

3.5.3 ASP – Arizona Search for Planets

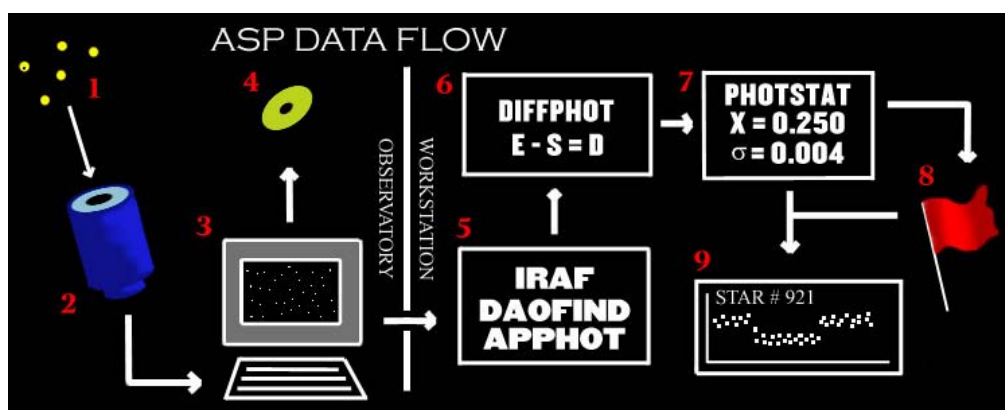
Ακόμα μια έρευνα που υπόσχεται να προσφέρει πολλά στον χώρο της ανακάλυψης νέων πλανητών είναι αυτή που οργάνωσε το πανεπιστήμιο της Αριζόνας. Και αυτή χρησιμοποιεί την φωτομετρική μέθοδο. Από πλευρά πεδίου και ψηφιακής κάμερας δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές από τις άλλες μεθόδους. Διαθέτουν ένα τηλεσκόπιο 8'', αλλά από πλευρά φωτομετρίας και λογισμικού φαίνεται να προτιμούν την σιγουριά του λογισμικού, IRAF, το οποίο έχει την δυνατότητα να κάνει φωτομετρία με ακρίβεια καλύτερη από 1%. Για να καταλάβουμε τη σημαίνει αυτό θα συσχετίσουμε την ακτίνα του αστέρα και του πλανήτη, με την μεταβολή του φαινομένου μεγέθους στο σχήμα 3.15.



σχήμα 3.15.

Το παραπάνω σχήμα είναι πολύ χρήσιμο. Μας δείχνει στην ουσία τα όρια του ASP στην παρατήρηση και ανίχνευση άλλων πλανητών. Για παράδειγμα οι πλανήτες που είναι όμοιοι με τον Δία (κόκκινη γραμμή) και περιφέρονται γύρω από αστέρες κάθε φασματικού τύπου (άρα και κάθε δυνατής ακτίνας) είναι εύκολο να εντοπιστούν αφού η ακρίβεια της φωτομετρίας που απαιτείται είναι 0,01 έως 0,1 mag περίπου, δηλαδή από 10 – 1 %. Οι πλανήτες όμοιοι με τον ουρανό (πράσινη γραμμή) είναι ανιχνεύσιμοι μόνο γύρω από αστέρες φασματικού τύπου M3 – M5. Τέλος οι πλανήτες όμοιοι με την Γη (μπλε γραμμή) δεν είναι ανιχνεύσιμοι από το ASP αφού η ακρίβεια της φωτομετρίας αρχίζει από 0,001 έως 0,0001 mag, δηλαδή από 0,1 – 0,01 %, πράγμα το οποίο είναι εκτός των δυνατοτήτων του ASP.

Η εργασία προκειμένου να ανακαλυφθεί ένας πλανήτης έχει 9 βήματα.



1^ο Βήμα : Επιλέγουν σωστά πεδία στον ουρανό

2^ο Βήμα : Τοποθετούν τον σωστό εξοπλισμό πάνω στο τηλεσκόπιο και ετοιμάζουν την CCD κάμερα

3^ο Βήμα : Αρχίζουν να καταγράφονται τα δεδομένα στον υπολογιστή από την κάμερα

4^ο Βήμα : Γράφουν τα δεδομένα σε CDs και τα μεταφέρουν για επεξεργασία

5^ο Βήμα : Με την βοήθεια του IRAF επεξεργάζονται τα δεδομένα

6^ο Βήμα : Αρχίζουν την φωτομετρία των αστερών που έχουν καταγράψει μετά την φωτομετρία

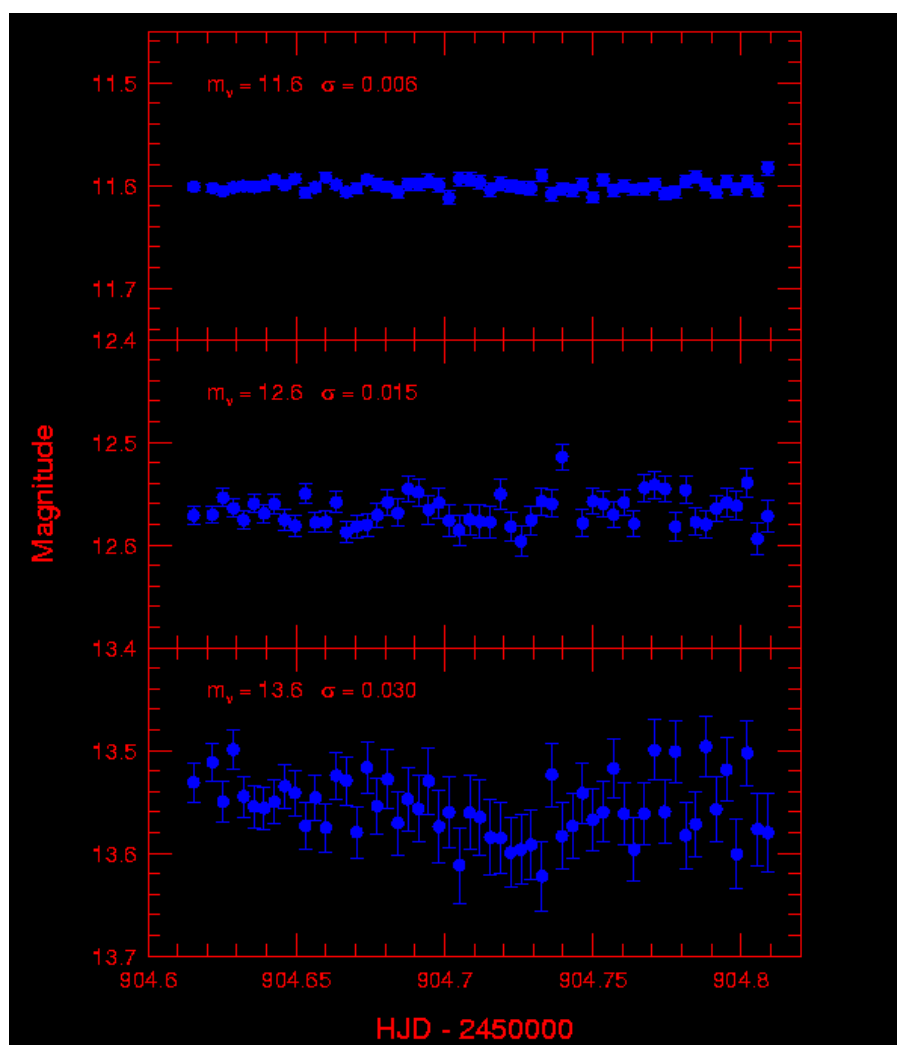
7^ο Βήμα : Οι χιλιάδες καμπύλες φωτός που κατασκευάζονται ελέγχονται από ένα δεύτερο λογισμικό, το οποίο ψάχνει για μεταβολές σ' αυτές της καμπύλες.

8^ο Βήμα : Οι υποψήφιες καμπύλες που πιθανόν να έχουν ικανοποιητικές μεταβολές σημειώνονται.

9^ο Βήμα : Οι καμπύλες φωτός που έχουν σημειωθεί σαν πιθανές διαβάσεις πλανητών εμφανίζονται στην οθόνη και έπειτα οι αστρονόμοι αποφασίζουν για το αν ανήκουν σε πλανήτες ή όχι.

Έτσι μετά από όλη αυτήν την αυτοματοποιημένη διαδικασία, η ανακάλυψη πλανητών γίνεται κάπως πιο εύκολη υπόθεση. Για τον λόγο αυτό το ASP έχει να παρουσιάσει μερικά αστερία που πιθανόν να έχουν πλανητικό σύστημα.

Ο χρόνος έκθεσης ήταν 3 λεπτά και τα παρατηρούμενα αστερία κυμαίνονταν από 9^ο έως 15^ο φαινόμενα μεγέθη. Το πεδίο που παρατηρήθηκε ήταν ο "Μικρός Σκύλος" (Canis Minor). Στο σχήμα 3.16 φαίνονται οι τρεις πιο τυπικές καμπύλες για τρία αστερία του Μικρού Σκύλου. Η πρώτη αντιστοιχεί σε έναν πολύ σταθερό αστέρα, για την δεύτερη δεν είμαστε σίγουροι αν πρόκειται για πλανήτη διότι η μεταβολές είναι μέσα στα όρια του σφάλματος. Τέλος στην τρίτη διακρίνεται καθαρά η μεταβολή του φαινομένου μεγέθους λόγω της διάβασης του πλανήτη.



σχήμα 3.16

Κεφάλαιο 4^ο

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

4.1 WASP0 στην Ελλάδα – Αποτελέσματα

Θεωρητικά ήμασταν σίγουροι για την επιτυχία της μεθόδου WASP0. Έπρεπε όμως να την δοκιμάσουμε και πρακτικά πριν ξεκινήσουμε νέα έρευνα σε νέα πεδία του ουρανού. Γι' αυτό όταν δούλεψε πρώτη φορά στο La Palma, δοκιμάστηκε αν μπορούσε να ανιχνεύσει έναν ήδη γνωστό έξω – ηλιακό πλανήτη. Το πλανητικό σύστημα που επιλέχτηκε ήταν αυτό που υπάρχει γύρω από τον πλανήτη HD 209458. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, αφού μπορέσαμε να διακρίνουμε πολύ εύκολα την διάβαση του πλανήτη (εικόνα 3.1).

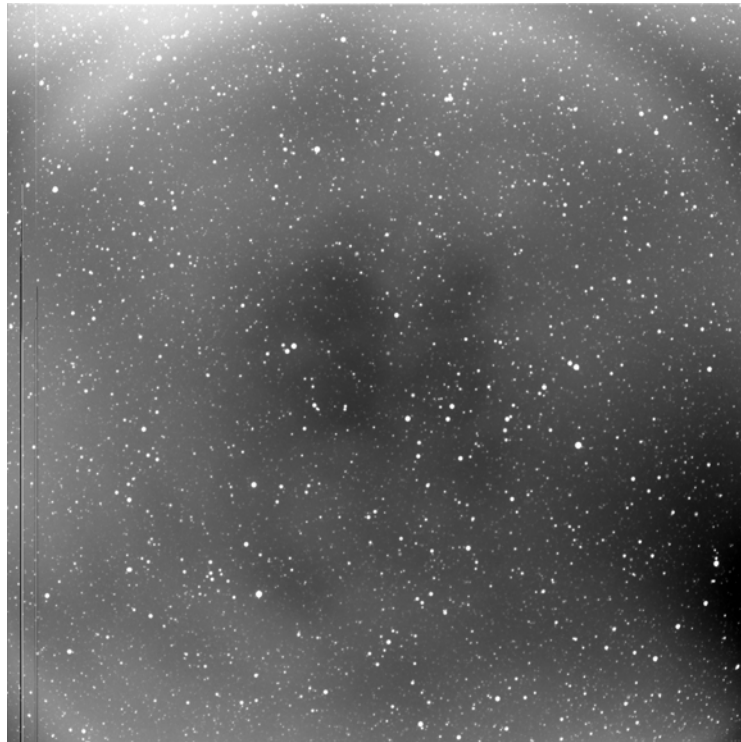
Δοκιμάστηκε η αξιοπιστία της μεθόδου στο Κρυονέρι και αποφασίσαμε να ελέγξουμε την συμπεριφορά και τις δυνατότητες της μεθόδου σε δύσκολες συνθήκες. Δηλαδή παρατηρήσαμε τον αστέρα

HD 209458
R.A = 22^h 03^m
Dec = +18° 53'
Mag = 7,65

κάτω από πανσέληνο. Έπρεπε να γνωρίζουμε αν οι παρατηρήσεις τις νύχτες με πανσέληνο είχαν αποτέλεσμα. Οι παρατηρήσεις έγιναν στις 21/10/2002 από τις 16:50 έως τις 21:51 UT. Τα δεδομένα που συλλέξαμε αυτές τις 7 ώρες έχουν χωρητικότητα περίπου 3,25 GB. Το πεδίο που παρατηρούσαμε φαίνεται παρακάτω, στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1. Το frame αυτό δεν έχει επεξεργαστεί



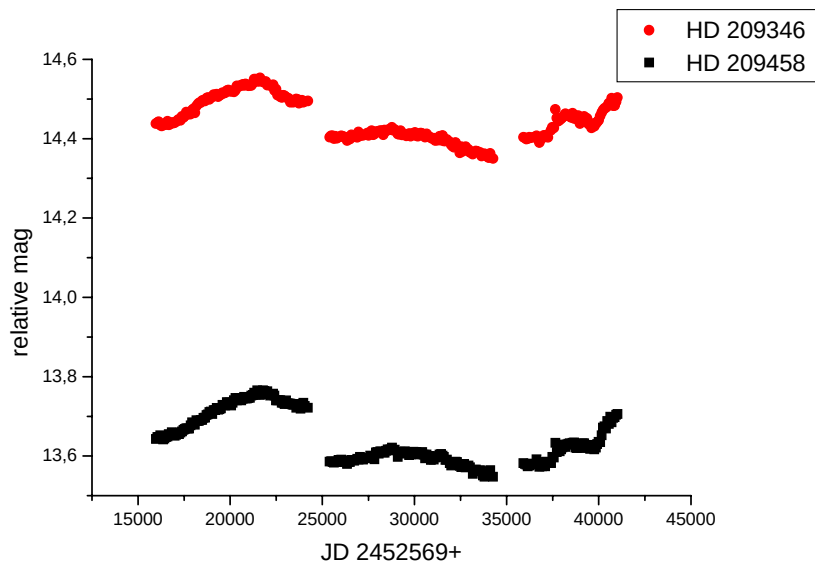
σχήμα 4.2. Το frame αυτό έχει επεξεργαστεί. Η διαφορά είναι εμφανής

Οι δύο μαύρες στήλες στα αριστερά του σχήματος 4.2 δεν είναι τίποτα παραπάνω από δύο κατεστραμμένες στήλες της CCD κάμερας (Apogee 10). Συνολικά είχαμε 306 διαφορετικές εικόνες με χρόνο έκθεσης 60 sec. Για την φωτομετρία δουλέψαμε με το DaoPhot II new generation, με σφάλμα για τον συγκεκριμένο αστέρα είναι 0,002 mag.

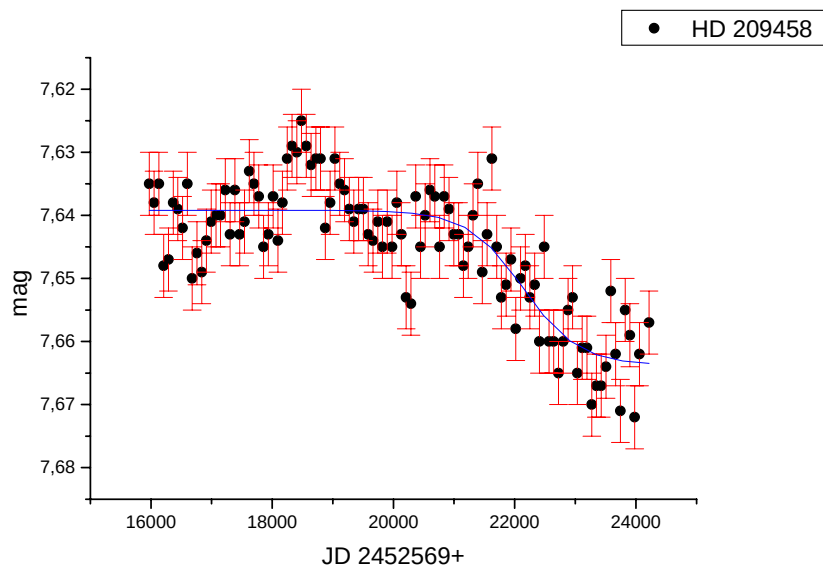
Ο αστέρας που χρησιμοποιήθηκε σαν οδηγός ήταν ο

HD 209346
 R.A = 22^h 03^m
 Dec = + 18° 51'
 Mag = 8,43

Κατά την διάρκεια της φωτομετρίας βρήκαμε τις καμπύλες φωτεινότητας των δύο αστέρων, οι οποίες σημειώνουν μεγάλο ενδιαφέρον. Παρατηρούμε ότι και στις δύο καμπύλες υπάρχουν μεταβολές οι οποίες όμως είναι και για τους δύο αστέρες όμοιες. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταβολές αυτές στις λαμπρότητες των αστέρων δεν προέρχονται σε κάποιο αστρονομικό φαινόμενο, αλλά σε κάποια κακή λειτουργία του λογισμικού ή της αλλαγής του φωτισμού του ουρανού από την πανσέληνο, καθώς αυτή άρχισε να έχει ολοένα μεγαλύτερο ύψος κατά την διάρκεια της παρατήρησης.



Αφού λοιπόν φτάσαμε σε κάποιες καμπύλες λαμπρότητες – χρόνου με περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων καταλήξαμε και στην καμπύλη μεταβολής του φαινομένου μεγέθους του αστέρα HD 209458.



Στην καμπύλη δεν υπάρχουν τα δεδομένα μετά τον χρόνο 2452569.24000. Αυτό συμβαίνει επειδή σε εκείνο τον χρόνο το τηλεσκόπιο έφτασε στο όριό του και έπρεπε να σταματήσει η παρατήρηση για περίπου 15 λεπτά. Μετά από αυτό τα δεδομένα έχασαν την ομοιομορφία του. Παρόλα αυτά όμως είναι εμφανής μια μικρή μεταβολή από τα 7,64 έως τα 7,66. Άρα η τάξη της μεταβολής αυτής είναι περίπου $\Delta mag = 0,02$. Θεωρητικά η μεταβολή του φαινομένου μεγέθους του αστέρα είναι της τάξης των $\Delta mag = 0,017$. Αυτό μας κάνει να πιστεύουμε ότι η παραπάνω καμπύλη αντιστοιχεί πράγματι στην διάβαση του πλανήτη. Επίσης από τους καταλόγους βρήκαμε ότι το φαινόμενο της διάβασης του συγκεκριμένου πλανήτη για τις

21/10/2002 άρχιζε στις 17:06 UT. Η ώρα αυτή αντιστοιχεί σε JD = 2452569,21250 σε Ιουλιανό χρόνο. Το οποίο επιβεβαιώνεται με την καμπύλη φωτός. Το πιο πιθανό είναι η απόκλιση των $\Delta mag = 0,003$ από την θεωρία να οφείλεται στην Πανσέληνο. Γεγονός είναι πάντως ότι η καμπύλη αυτή είναι ένα πολύ ενθαρρυντικό στοιχείο για την έρευνα ανίχνευσης πλανητών με την μέθοδο WASP0, διότι ακόμα δεν ήμασταν σίγουροι για τις δυνατότητές της σε πολύ άσχημες φωτομετρικές νύχτες.

Με αυτά τα δεδομένα προσπαθήσαμε να ανιχνεύσουμε κάποιον πλανήτη σε τροχιά γύρω από κάποιο αστέρα. Όπως είπαμε και στην παράγραφο 3.4.2 κάτι τέτοιο είναι πρακτικά αδύνατο στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Γι' αυτό αρκεστήκαμε να μελετήσουμε την συμπεριφορά μόνο πέντε αστερών στο διάστημα 9 ημερών ώστε να δούμε όλη την μέθοδο WASP0, χωρίς να ελπίζουμε ότι θα ανακαλύψουμε κανέναν πλανήτη. Μάλιστα η πιθανότητα να υπάρχει παρατηρήσιμο πλανητικό σύστημα σ' έναν από αυτούς τους πέντε αστέρες που επιλέξαμε είναι $1,66 \cdot 10^{-16} \%$.

Οι παρατηρήσεις έγιναν από τις 23/4/2003 έως τις 2/5/2003 στον Χολομώντα της Χαλκιδικής. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αυτές τις 9 ημέρες ήταν περίπου 13 GB. Η επεξεργασία των frames (Bias – Dark – Flat) έγινε με το λογισμικό Max Im DL, η φωτομετρία έγινε με το DaoPhot II και η μαθηματική επεξεργασία των καμπυλών με το πρόγραμμα Origin 5.0. Οι αστέρες που επιλέχθηκαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1

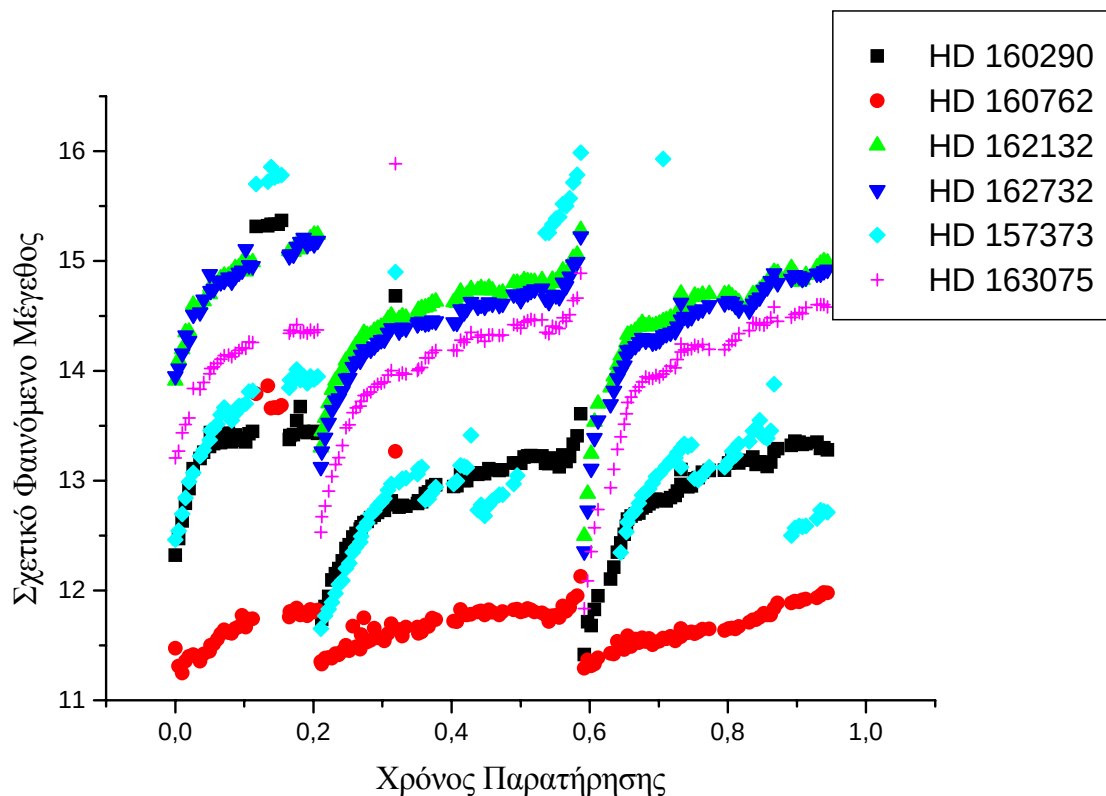
Όνομα	Mag	Φασματικός τύπος	Απόσταση (ly)
HD 160290	5,35	K1III	329,12
HD 162132	6,80	K0	571,20
HD 162732	6,47	A2V	429,15
HD 157373	6,36	F6V	130,67
HD 163075	6,37	K0III	350,33
HD 160762	3,82	B2V	495,68

Ο αστέρας HD 160290 λόγω της σταθερότητας της λαμπρότητάς του θα χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός στην φωτομετρία.



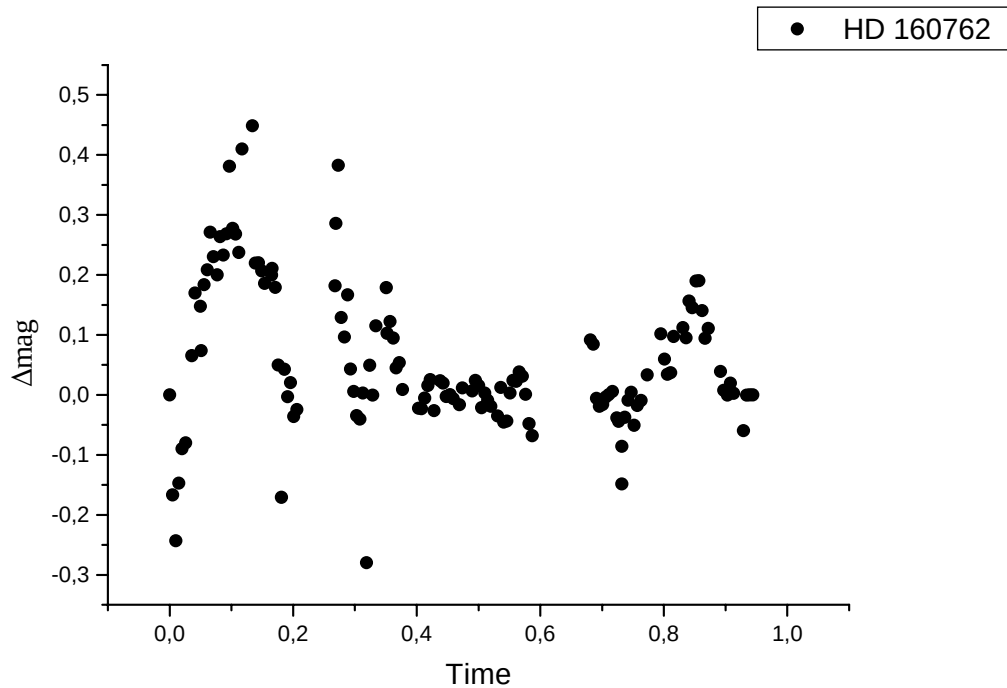
εικόνα 4.3. Αυτό είναι το πεδίο στον αστερισμό του Δράκου όπως φαίνεται από την CCD Apogee 10

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων και την φωτομετρία μπορέσαμε να εξάγουμε μερικές καμπύλες φωτεινότητας για κάθε έναν από του πέντε αστέρες που πίνακα 4.1. Ας δούμε αρχικά λοιπόν πως συμπεριφέρονται όλοι οι αστέρες σε σχέση με τον αστέρα οδηγό. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



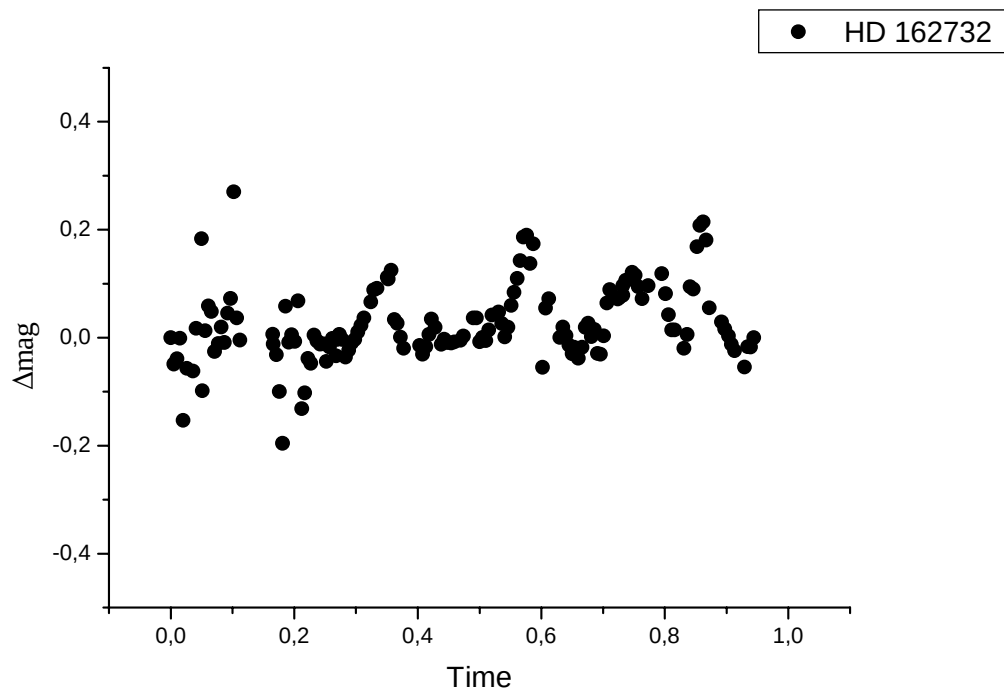
Μπορούμε από το προηγούμενο γράφημα να κατανοήσουμε πόσο χρήσιμο είναι να ορίσουμε έναν αστέρα οδηγό για την φωτομετρία, κάποιον που οι αστρονομικοί κατάλογοι μας διαβεβαιώνουν ότι είναι ιδιαίτερα σταθερής λαμπρότητας. Ο θόρυβος, η ανομοιομορφία και τα πιθανά σφάλματα φαίνονται ξεκάθαρα. Γι' αυτό επιβάλλεται μια περαιτέρω επεξεργασία για κάθε έναν αστέρα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματά μας από την φωτομετρία δίνονται στην αμέσως επόμενη σελίδα.

Αστέρας HD 160762
Μεταβλητός αστέρας
Mag = 3,74 – 3,76



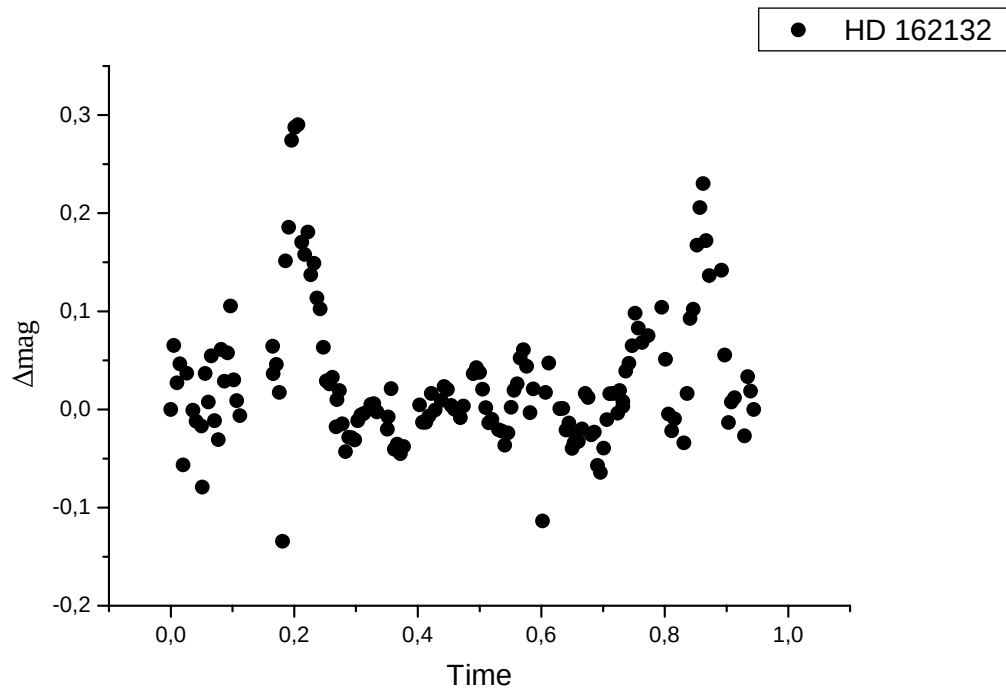
Στο προηγούμενο σχήμα διακρίνουμε μια μεταβολή του φαινομένου μεγέθους του αστέρα της τάξης του $\Delta\text{mag} = 0,2$. Αυτή είναι πάρα πολύ μεγάλη για να οφείλεται σε διάβαση κάποιου πλανήτη. Όπως βρήκαμε έπειτα σε αστρονομικούς καταλόγους ο εν λόγω αστέρας είναι γνωστός μεταβλητός, αλλά με μεταβολή $\Delta\text{mag}=0,02$ (της τάξης της μεταβολής λόγω διάβασης κάποιου πλανήτη). Άρα το πιθανότερο είναι πως η μεταβολή που ανιχνεύσαμε δεν εξηγείται ούτε από αυτό το γεγονός και έχουμε ακόμα μια φορά αρκετό θόρυβο στα δεδομένα.

Αστέρας HD 162732



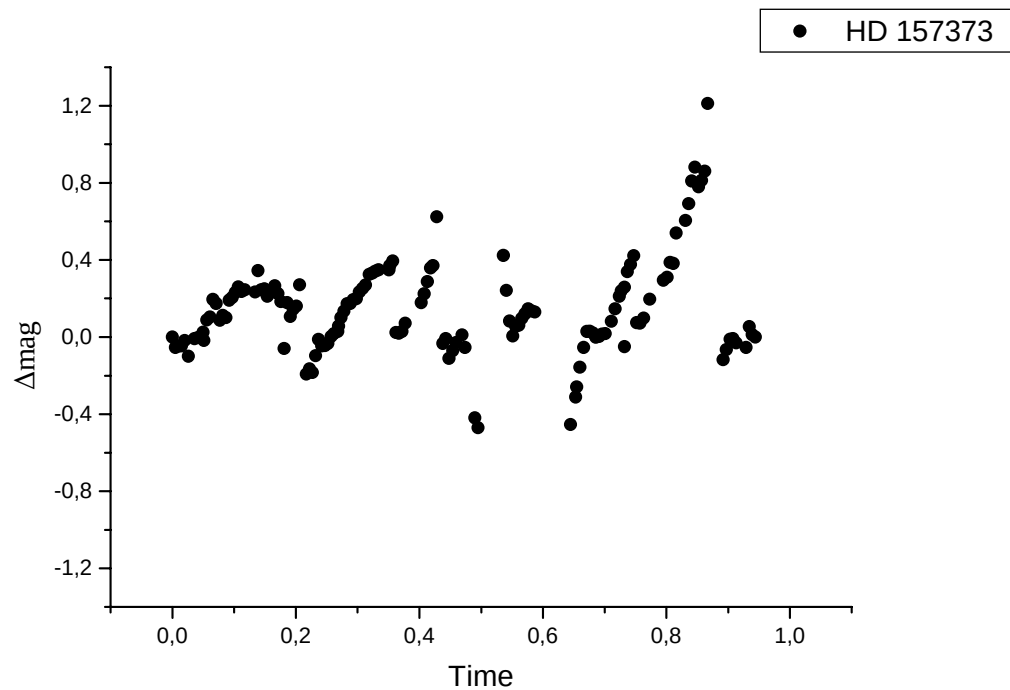
Η καμπύλη που εξάγαμε παραπάνω δεν μας αφήνει περιθώρια να ελπίζουμε στην έμμεση παρουσία κάποιου πλανήτη, αφού η φωτομετρία μας έδειξε ότι ο αστέρας είναι σταθερός. Η μικρο-μεταβολές που παρουσιάζονται οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες και σφάλματα των οργάνων. Επίσης υπάρχει πιθανότητα ο αστέρας να είναι μεταβλητός με μεταβολή περίπου $\Delta\text{mag} = 0,2 \text{ mag}$, αλλά αυτό θα πρέπει να ελεγχθεί πιο προσεκτικά.

HD 162132
Μεταβλητός αστέρας
Mag = 6,72 – 6,76



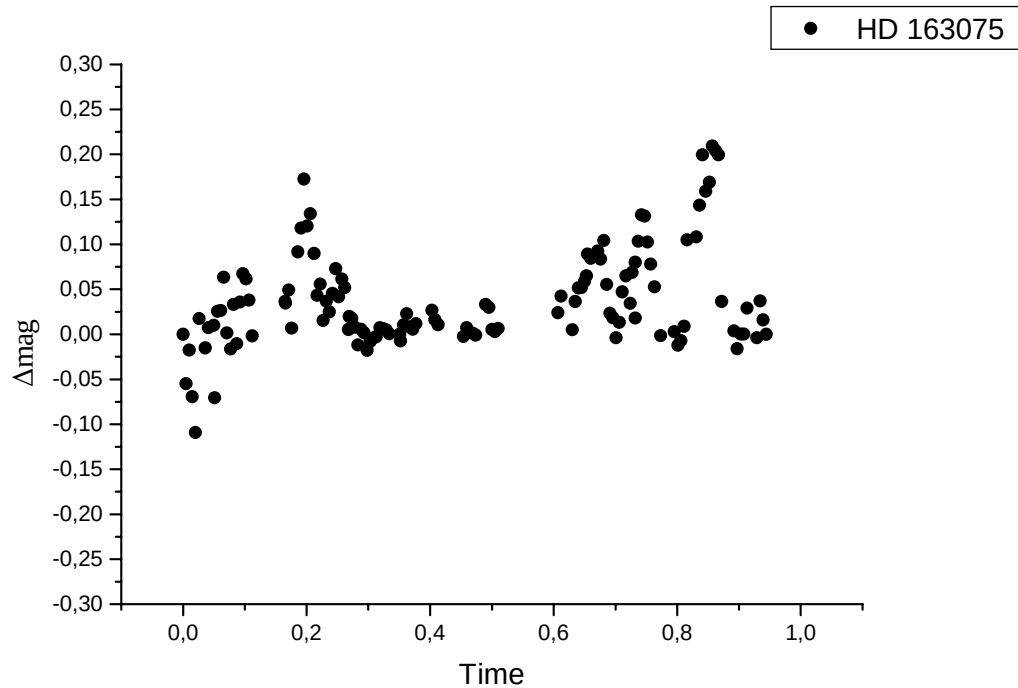
Δυστυχώς, ούτε σε αυτόν τον αστέρα μπορέσαμε να ανιχνεύσουμε κάποιο πλανήτη. Ο αστέρας είναι πολύ σταθερός με εξαίρεση δύο peaks στα οποία έχουμε μεταβολές 0,3 και 0,25 mag αντίστοιχα. Έτσι επιβεβαιώνουμε την μεταβλητότητα του αστέρα.

HD 157373



Ούτε και στην παραπάνω καμπύλη μπορέσαμε να εντοπίσουμε κάποια μεταβολή στην λαμπρότητα του αστέρα που να οφείλεται σε πιθανή διάβαση πλανήτη. Ο αστέρας HD 157373 χαρακτηρίζεται από τους αστρονομικούς καταλόγους ως πολύ σταθερός. Έτσι αρχίζει να επιβεβαιώνεται η πιθανότητα που είχαμε υπολογίσει για την ανίχνευση πλανητικού συστήματος γύρω από αστέρα στο πεδίο του Δράκου, η οποία ήταν μηδενική. Οι μεταβολές πιθανότατα προέρχονται από τον μεγάλο θόρυβο των δεδομένων.

Αστέρας HD 163075

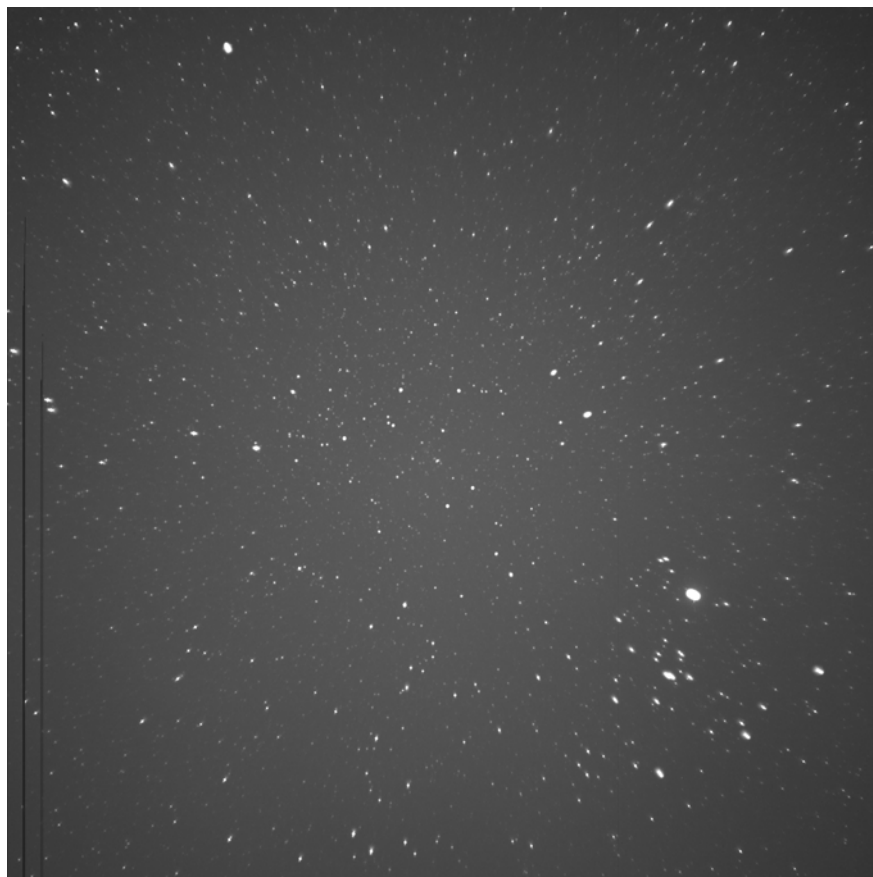


Τέλος, στον αστέρα HD 163075 του οποίου φαίνεται παραπάνω η καμπύλη λαμπρότητας – χρόνου, δεν διακρίνεται καμία μεταβολή που να μπορεί να αποδοθεί σε διάβαση πλανήτη. Παρόλα αυτά αν και ο αστέρας χαρακτηρίζεται σαν σταθερός παρουσιάζει δύο peaks που φτάνουν σε ένταση μέχρι και $\Delta mag = 0,2$. Ίσως και η σταθερότητα αυτού του αστέρα θα έπρεπε να εξεταστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

4.2 Μελλοντικές Έρευνες

Η ανίχνευση έξω – ηλιακών πλανητών βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Με τον εξοπλισμό που διαθέτουμε δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι τα αποτελέσματά μας είναι σίγουρα σωστά. Χρειάζεται ακόμα πάρα πολύ δουλειά και από του αστρονόμους, αλλά και από τους μηχανικούς αστρονομικών οργάνων και ηλεκτρονικών. Με καλύτερες CCD κάμερες, αλλά και με πιο προικισμένες ιδέες μεθόδων ανίχνευσης, στον μέλλον, θα έχουμε σίγουρα εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Μια τέτοια ιδέα προσπαθήσαμε να κάνουμε πράξη στον Χολομώντα κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων. Προσπαθήσαμε να αυξήσουμε το πεδίο του ουρανού το οποίο παρατηρούσαμε. Ο τηλεφακός Nikon που διαθέταμε είχε διάμετρο 180mm και ήταν αυτός που καθόριζε το μέγεθος του πεδίου. Έτσι αν αλλάζαμε με κάποιο τρόπο τον τηλεφακό θα είχαμε και μεγαλύτερο πεδίο, το οποίο συνεπάγεται περισσότερα αστέρια ανά frame. Αυτή ήταν πολύ καλή ιδέα αλλά στην πράξη είχε πολλά προβλήματα. Το κυριότερο ήταν ότι ο φακός που θα χρησιμοποιούσαμε θα έπρεπε να ήταν πάρα πολύ καλής ποιότητας, διαφορετικά θα είχαμε πρόβλημα με τις άκρες του frame. Με έναν μέτριο φακό θα βλέπαμε τα αστέρια να επιμηκύνονται. Το τι αντιμετωπίσαμε όταν αλλάξαμε τον φακό φαίνεται στην εικόνα παρακάτω



Εικόνα 4.3. φαίνεται καθαρά το σφάλμα του φακούς στις άκρες του frame

Ο φακός που τοποθετήσαμε στην CCD για να πάρουμε την παραπάνω εικόνα ήταν 80mm. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό ήταν να μπορέσουμε να το αντιμετωπίσουμε με κάποιο λογισμικό. Δεν μπορούμε να πούμε ότι αυτή απόπειρα ήταν επιτυχής. Έτσι η μόνη λύση είναι να διαθέσουμε αρκετά χρήματα προκειμένου να αποκτήσουμε κάποιο φακό υψηλής ποιότητας ώστε τα αποτελέσματα να είναι άξια για μετρήσεις.

Ένα άλλο φιλόδοξο project είναι και ο απόγονος της μεθόδου WASP0. Πρόκειται για το γνωστό σαν SUPER – WASP. Το SUPER – WASP είναι μια ιδέα που ήδη άρχισε να γίνεται πράξη στο Isaac Newton Group, στο La Palma. Η λογική της μεθόδου, όπως και ο πρόγονός της, είναι απλή. Κατασκεύασαν μια ειδική βάση στήριξης η οποία διαθέτει αστροστάτη χωρίς τηλεσκόπιο. Εκεί στήριξαν τέσσερις CCD κάμερες με τηλεφακούς οι οποίες στοχεύουν σε διαφορετικό πεδίο του ουρανού. Η κάθε κάμερα μαζί με τον αντίστοιχο τηλεφακό σαρώνει πεδίο $6,5^\circ \times 6,5^\circ$ στον ουρανό. Με την εμπειρία που αποκτήσαμε στο WASP0 μπορούμε σ' αυτό το σημείο να κάνουμε μερικούς υπολογισμούς. Μέσα σε τέτοιο πεδίο περιμένουμε περίπου 20000 αστέρες από μία κάμερα. Άρα συνολικά έχουμε 80000 καταγεγραμμένους αστέρες ταυτόχρονα. Στον πίνακα 3.1 βρίσκουμε την πιθανότητα ανίχνευσης πλανητικού συστήματος όμοιο με αυτό του Ήλιου – Δία είναι 0,089%. Έτσι μέσα στους 80000 αστέρες θα υπάρχουν περίπου 71,2 που θα έχουν έναν άλλο Δία σε τροχιά γύρω τους. Μάλιστα με πιθανότητα περίπου 12% (Hot Jupiters) σε 80000 θα περιμένουμε από το SUPER – WASP να ανιχνεύσει 9600 πλανητικά συστήματα.

Τέλος η NASA τα τελευταία χρόνια έχει μπει και αυτή στο κυνήγι εξωτικών κόσμων στο Σύμπαν. Γι' αυτό τα επόμενα χρόνια ελπίζουμε όλοι να αρχίσει το πρόγραμμα Kepler. Αυτό θα αρχίσει με την εκτόξευση ενός διαστημικού τηλεσκοπίου σε τροχιά γύρω απ' τη Γη καταγράφοντας αστέρες σε μια προσπάθεια προσπαθώντας να ανακαλύψει κάποιο πλανήτη με την μέθοδο της φωτομετρίας.

Το τηλεσκόπιο θα σαρώνει 12° μοίρες στον ουρανό, στον αστερισμό του Κύκνου. Συγκεκριμένα

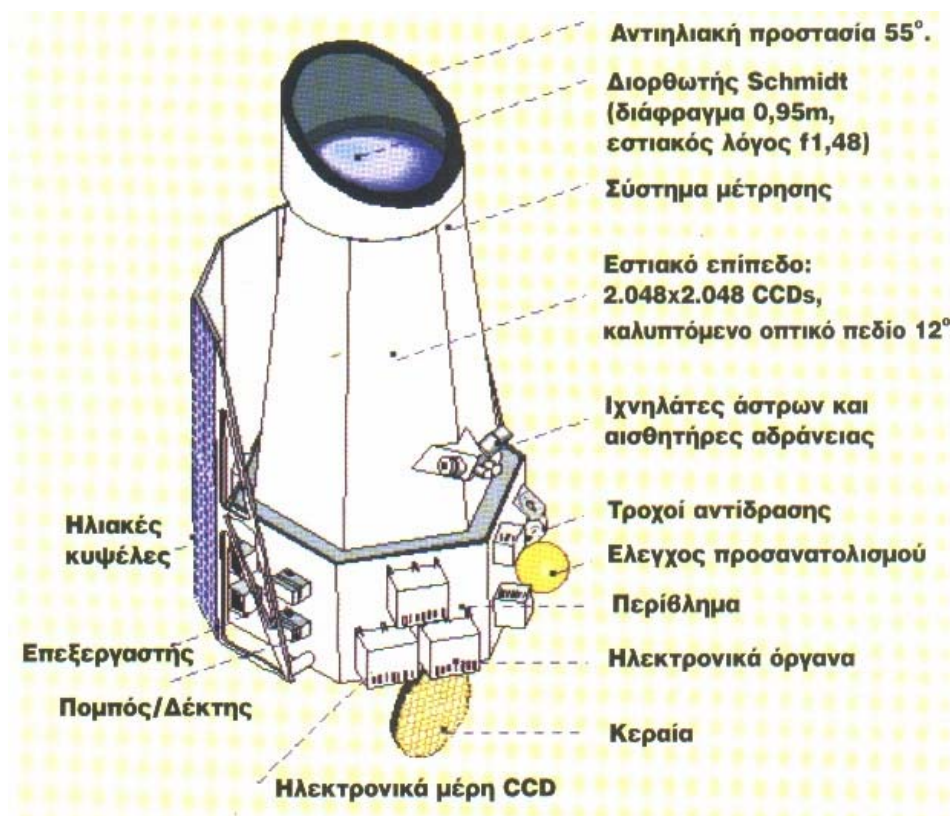
$$\begin{aligned} \text{R.A} &= 19^{\text{h}} 45^{\text{m}} \\ \text{Dec} &= +35^\circ \end{aligned}$$

και η πρώτη του δουλειά θα εστιαστεί στο να ανακαλύψει πλανήτες όμοιους με την Γη. Αυτό θα μπορούσε να γίνει μόνο έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, αφού η μεταβολή του φαινομένου μεγέθους εξαιτίας της διάβασης ενός πλανήτη σαν την Γη είναι από 50 μέχρι 400 μmag . Ο συνολικός αριθμός αστερών ανά frame θα είναι περίπου 160000 πράγμα που σημαίνει πολύ καλές προοπτικές για την ανακάλυψη γήινων πλανητών. Ένα πολύ κατατοπιστικός πίνακας είναι αυτός που υπολόγισαν οι W. J. Borucki, D. G. Koch, E.W. Dunham, J.M. Jenkins και δίνεται παρακάτω. Κατάφεραν να συσχετίσουν τις ακτίνες των πλανητών που μπορούν να ανιχνευθούν από το Kepler, τους φασματικούς τύπους των αστερών και το φαινόμενο μέγεθός τους.

Type **B2** B7 **A2** **A7** **F2** **F7** **G2** **G7** **K2** **K7** **M2** **M8**

m v	Minimum Radius of Planet in Earth Radii											
9.0	4.00	2.64	1.71	1.37	1.20	1.02	0.85	0.75	0.67	0.56	0.43	0.09
9.5	4.03	2.66	1.72	1.38	1.21	1.03	0.86	0.75	0.67	0.57	0.43	0.09
10.0	4.08	2.70	1.74	1.40	1.22	1.05	0.87	0.76	0.68	0.58	0.43	0.09
10.5	4.16	2.75	1.77	1.42	1.25	1.07	0.89	0.78	0.69	0.58	0.44	0.09
11.0	4.27	2.82	1.82	1.46	1.28	1.10	0.91	0.80	0.71	0.60	0.45	0.09
11.5	4.42	2.93	1.89	1.52	1.33	1.14	0.95	0.83	0.73	0.62	0.46	0.09
12.0	4.65	3.07	1.99	1.60	1.40	1.20	1.00	0.87	0.77	0.65	0.49	0.10
12.5	4.94	3.27	2.12	1.70	1.50	1.28	1.07	0.93	0.82	0.69	0.51	0.10
13.0	5.33	3.53	2.28	1.84	1.62	1.38	1.15	1.00	0.88	0.74	0.55	0.11
13.5	5.80	3.84	2.49	2.00	1.77	1.51	1.26	1.09	0.96	0.80	0.60	0.12
14.0	6.38	4.23	2.74	2.21	1.94	1.66	1.38	1.20	1.05	0.88	0.66	0.13
	giant planets		planetary cores		habitable planets	, M<10		M<Earth size				

Τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά, όπως παρατηρούμε. Γι' αυτό ας περιμένουμε την εκτόξευση της αποστολής και τα πρώτα αποτελέσματα. Ένα σχέδιο του διαστημοπλοίου δίνεται παρακάτω



4.3 Συμπεράσματα

Αρχικά μπορούμε να πούμε ότι ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής είναι η εύρεση μιας περιοχής που είναι κάτι περισσότερο από κατάλληλη για αστρονομική έρευνα. Με την μέθοδο H – DIMM μπορέσαμε να μετρήσουμε τον μέσο όρο του seeing των αστέρων για την περιοχή του Πανεπιστημιακού Δάσους Α. Π. Θ, στον Χολομώντα Χαλκιδικής και σε υψόμετρο περίπου 900 μέτρα. Η μέθοδος που περιγράψαμε είναι η καλύτερη και η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης του seeing των αστέρων στον κόσμο. Ο μέσος όρος προήλθε από μετρήσεις των 4 μηνών (Απρίλιος – Μάιος – Ιούλιος – Αύγουστος /2003) και η τιμή του βρέθηκε ίση με

$$\text{Seeing}_{\text{Χολομώντα}} = 0,81''$$

Η τιμή αυτή είναι μια από τις καλύτερες του κόσμου, αν αναλογιστούμε ότι πήραμε τις μετρήσεις στις χειρότερες εποχές του χρόνου (Άνοιξη – Καλοκαίρι). Ευελπιστούμε ότι οι μετρήσεις τον Χειμώνα θα είναι πολύ καλύτερες. Επίσης εξετάσαμε την συμπεριφορά του seeing στις αλλαγές του καιρού, του ύψους των αστέρων, της αέριας μάζας και του υψομέτρου.

Ένα δεύτερο πολύ σημαντικό αποτέλεσμα ήταν ότι για πρώτη φορά στον κόσμο έγινε μια σύγκριση των δύο μεθόδων για την εξαγωγή του seeing. Της μεθόδου ESO – DIMM και της H – DIMM. Το αποτέλεσμα ήταν να επιβεβαιωθεί η ορθότητα και των δύο, αφού οι τιμές που εξήγαμε είχαν μεγάλη συνοχή.

Έτσι αφού καταλήξαμε ότι η περιοχή που διαλέξαμε για αστρονομική έρευνα ήταν η κατάλληλη αρχίσαμε να θέτουμε σε λειτουργία μια διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος ανακάλυψης έξω – ηλιακών πλανητών με την μέθοδο της φωτομετρίας, γνωστή και ως WASP0. Το πρώτο βήμα είναι να γίνει η αναγνώριση ενός ήδη γνωστού πλανήτη σε τροχιά γύρω από τον αστέρα HD 209458 με το WASP0. Και σ' αυτήν την περίπτωση για πρώτη φορά από ελληνική "ομάδα" αστρονομίας και σε ελληνικό χώρο, μπόρεσε να επιβεβαιωθεί πλανήτης σε άλλο ηλιακό σύστημα. Εκτός από την απλή επιβεβαίωση, μια και η παρατήρηση έγινε κάτω από δύσκολες καιρικές συνθήκες για φωτομετρία (πανσέληνο) μπορέσαμε να εξετάσουμε την ακρίβεια της μεθόδου WASP0 υπό συνθήκες πανσελήνου η οποία προφανώς ήταν επιτυχής. Το στοιχείο αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον και βοηθάει αρκετά στην εξέλιξη της έρευνας των έξω – ηλιακών πλανητών.

Η επόμενη δουλειά μας ήταν να στοχεύσουμε μια περιοχή του ουρανού, να την καταγράψουμε και να την αναλύσουμε ελπίζοντας να ανιχνεύσουμε κάποιο καινούριο πλανήτη. Το πεδίο που επιλέξαμε βρισκόταν στον αστερισμό του Δράκου (Κεφάλι). Η έλλειψη λογισμικού για μια αυτοματοποιημένη επεξεργασία των δεδομένων δεν μας άφησε περιθώρια για ανακάλυψη πλανήτη. Έτσι λοιπόν στα πλαίσια της διπλωματικής επιλέξαμε πέντε αστέρες ώστε να παρουσιάσουμε το πώς λειτουργεί η μέθοδος. Τα αποτελέσματα, φυσικά όπως ήταν αναμενόμενο δεν βρέθηκε κάτι καινούριο σ' αυτούς τους πέντε αστέρες εκτός από μια επιβεβαίωση

ενός μεταβλητού από αυτούς (HD 162132) και η πιθανή μεταβλητότητα κάποιων άλλων.

Πιστεύω ότι η αρχή που κάναμε ήταν αρκετά αξιόλογη. Το έδαφος είναι πρόσφορο για κάθε πιθανό συνεχιστή της έρευνας αυτής. Για να μπορέσει κάποιος όμως να βγάλει αξιόλογα συμπεράσματα συγκρίσιμα με διεθνής μετρήσεις, θα πρέπει να κάνει μερικά βήματα παραπάνω. Αρχικά επιβάλλεται να γίνει μια αλλαγή στο τηλεσκόπιο. Θα πρέπει να διαθέτουμε ένα τηλεσκόπιο τουλάχιστον 11'' προκειμένου να είναι πολύ σταθερό και τα αποτελέσματα να μην έχουν μεγάλα σφάλματα θέσης από frame σε frame. Το σημαντικότερο είναι όμως να γραφτεί ένα λογισμικό ειδικά για την επεξεργασία δεδομένων που προέρχονται από την μέθοδο WASP0 προκειμένου η επεξεργασία να γίνεται αρκετά γρήγορα δεδομένου ότι έχουμε μερικά εκατομμύρια φωτομετρίες που είναι αδιανόητο να γίνουν με άλλο τρόπο.

Έπειτα από αυτά το Εργαστήριο Αστρονομίας του Α. Π. Θ θα διαθέτει ακόμα μια ερευνητική ομάδα που πολύ λίγα πανεπιστήμια στον κόσμο μπορούν να έχουν. Επίσης ο τομέας της έρευνας αυτής είναι σύγχρονος και χρειάζεται προικισμένους ανθρώπους για να εξελιχθεί και να καρποφορήσει.

4.4 Μερικά Φιλοσοφικά Συμπεράσματα και Σκέψεις

Ο Μητρόδωρος ο Χίος, που έζησε τον 4^ο αιώνα π. Χ περίπου έλεγε « *ότι το να υποθέτει κανείς ότι η Γη είναι ο μόνος κατοικούμενος τόπος μέσα στο άπειρο διάστημα, είναι σαν να πιστεύει πως σ' ένα ολόκληρο σπαρμένο χωράφι θα βλαστήσει μόνο ένας σπόρος* ». Ο Σιμπλίκιος στα " Φυσικά " αναφέρει ότι ο φιλόσοφος Αναξαγόρας (500 π. Χ) πίστευε στην ύπαρξη άπειρων κόσμων. Ενώ όπως γράφει ο Ιππόλυτος, τόσο ο Λεύκιππος όσο και ο Δημόκριτος πίστευαν ακριβώς το ίδιο. Έπειτα από έναν περίπου αιώνα ο Λουκρήτιος (Ρωμαίος φιλόσοφος και ποιητής) έγραφε ότι « *τίποτα στην φύση δεν είναι μοναδικό και κατά συνέπεια σε άλλες περιοχές θα πρέπει να υπάρχουν άλλοι κόσμοι σαν τη Γη με ανθρώπους και ζώα* ». Τέλος τον 13^ο αιώνα μ. Χ ο Κινέζος φιλόσοφος Τεγκ Μου, της δυναστείας Σουίνγκ έγραφε « *Η Γη δεν είναι παρά ένα άτομο μέσα σε ολόκληρο βασίλειο. Άλλα ένα δέντρο έχει πολλούς καρπούς, κι ένα βασίλειο πολλούς ανθρώπους. Γι' αυτό θα ήταν παράλογο να δεχτούμε ότι δεν υπάρχουν άλλοι κόσμοι σαν την Γη στο Σύμπαν* ». Ωστόσο στην Ιστορία του ανθρώπου υπήρχαν και οι αντίθετες απόψεις. Η πιο αντιπροσωπευτική ήταν αυτή του Αριστοτέλη, που υποστήριζε ότι η Γη βρίσκεται στο κέντρο του κόσμου και έχει κάποια μοναδικότητα που ίσως να σημαίνει ότι είμαστε μοναδικοί στο Σύμπαν.

Η ανθρωπότητα συνέχιζε να προβληματίζεται μέχρι τις μέρες μας για την ύπαρξη ή την μη ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους του Σύμπαντος. Είναι ένα ερώτημα άρρηκτα συνδεδεμένο με την θέση του ανθρώπου μέσα στο πολύ μεγάλο αυτό κόσμο, ένα ερώτημα επίσης που δεν αφορά μόνο τους επιστήμονες, αλλά κάθε σκεπτόμενο άνθρωπο που δεν έχει ξεχωρίσει τους αρχέγονους προβληματισμούς του από την ζωή κάτω από την ατμόσφαιρα της Γης.

Όλες οι προηγούμενες απόψεις δεν είχαν ίχνος από επιστημονική ανάλυση. Απλά ήταν σκέψεις φιλοσόφων. Έτσι το 1960 εμφανίστηκε σε ένα συνέδριο ο Frank Donald Drake και παρουσίασε την ομώνυμη εξίσωσή του καθώς και τις έρευνες που μέχρι τότε είχε κάνει για νοήμονες πολιτισμούς σε άλλα πλανητικά συστήματα. Η εξίσωση του Drake είναι μια στατιστική εξίσωση που σύμφωνα με τα δεδομένα της εποχής καθορίζουν την πιθανότητα πολιτισμών μέσα στον Γαλαξία. Η εξίσωση έχει την εξής μορφή:

$$N = R \cdot f_p \cdot f_e \cdot n_e \cdot f_k \cdot f_l \cdot f_c \cdot L$$

N: είναι ο πιθανός αριθμός νοήμωνων πολιτισμών μέσα στον Γαλαξία μας

R: δηλώνει τον ρυθμό δημιουργίας νέων αστερών στον Γαλαξία μας. Ο παράγοντας αυτός θεωρούνταν ίσος με 10

f_p: ο παράγοντας αυτός περιγράφει το ποσοστό των αστεριών που έχουν πλανήτες. Τότε πίστευαν ότι ήταν ίσος με 0,5 (50%).

f_e: ο παράγοντας σημειώνει το ποσοστό των πλανητικών συστημάτων που περιέχουν πλανήτες στις επιφάνειες των οποίων υπάρχουν συνθήκες κατάλληλες για ζωή. Ο παράγοντας αυτός θεωρούνταν ίσος με 0,1 (10%).

n_e: δηλώνει τον μέσο αριθμό πλανητών κάθε πλανητικού συστήματος οι οποίοι βρίσκονται μέσα στα όρια της ζώνης βιωσιμότητας του αστέρα. Με βάση τα δεδομένα του δικού μας πλανητικού συστήματος παίρνουμε την τιμή αυτή σαν 3.

f_k: ο παράγοντας μας δείχνει το ποσοστό των πλανητών, οι οποίοι πληρούντες τις κατάλληλες συνθήκες, επιτρέπουν την εμφάνιση της ζωής. Αν θεωρήσουμε ότι η ζωή είναι μόνο θέμα συνθηκών τότε η τιμή αυτή είναι ίση με 1 (100%).

f_i: ο παράγοντας περιγράφει το ποσοστό των πλανητών με ζωή, όπου έχει αναπτυχθεί πολιτισμός ικανός να πετύχει μεσοαστρικές επικοινωνίες. Και εδώ η τιμή θεωρήθηκε ίση με 1 (100%).

f_c: ο παράγοντας αυτός δηλώνει το ποσοστό των πλανητών των οποίων οι πολιτισμοί, όχι μόνο έχουν την ικανότητα να αναπτύξουν συστήματα μεσοαστρικών επικοινωνιών, αλλά έχουν και την ικανότητα να τα εξελίσσουν. Ομοίως η τιμή που δόθηκε ήταν ίση με 1 (100%).

L: τέλος ο παράγοντας μετρά τον μέσο χρόνο ζωής ενός πολιτισμού, από την στιγμή που θα έχει την δυνατότητα να επικοινωνήσει με άλλους αστρικούς πολιτισμούς, μέχρι την ώρα της καταστροφής τους. Η τιμή που δόθηκε ήταν ίση με 100.

Αρα αν βάλουμε τις τιμές στην εξίσωση Drake βρίσκουμε ότι ο Γαλαξίας μας, με τα τότε δεδομένα είχε περίπου 150 νοήμονες πολιτισμούς. Τα πράγματα όμως το τελευταία χρόνια έχουν αλλάξει.

Σύμφωνα με μια εργασία των G. Gonzales, D. Brownlee και P. Ward, στις 12 Μαρτίου 2001, λόγω εξέλιξης των γαλαξιών δεν μπορεί ένας πλανήτης με συνθήκες σαν την Γη να δημιουργηθεί οπουδήποτε μέσα στον γαλαξία. Για παράδειγμα υπολογίσανε ότι ένας πλανήτης με μάζα παρόμοια με της Γης μπορεί να δημιουργηθεί μόνο μέσα σε μια ζώνη πλάτους 2,3 kpc. Για την ακρίβεια από τα 7,2 kpc από το κέντρο του γαλαξία μέχρι τα 9,5 kpc. Γνωρίζοντας ότι το πλάτος του γαλαξία στο οποίο ανήκει ο Ήλιος μας είναι 30 pc βρίσκουμε ότι αυτός ο όγκος της ζώνης είναι ίσος με $3,6 \cdot 10^9 \text{ pc}^3$. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα της αστροφυσικής η μέση πυκνότητα του Γαλαξία μας είναι περίπου 0,075 ηλιακές μάζες ανά pc^3 . Αυτό σημαίνει ότι αν όλη η μάζα που βρίσκεται μέσα στην ζώνη βιωσιμότητας του Γαλαξία γίνει αστέρες με μάζα σαν του Ήλιου μας θα έχουμε 272 εκατομμύρια αστέρες. Από αυτούς μόνο το 2 % θα ανήκουν σε μεταγενέστερους φασματικούς τύπους F, G, K, M και έτσι καταλήγουμε στους 5,4 εκατομμύρια αστέρες. Λαμβάνοντας τα δεδομένα από διάφορες ομάδες ανίχνευσης πλανητών βρίσκουμε πάρα πολύ ενδιαφέροντα νούμερα. Για παράδειγμα, η ομάδα του OGLE III κατέγραψε 56 πλανήτες με πιθανότητα ανίχνευσης περίπου 12,1%. Σήμερα το OGLE III έχει ψάξει περίπου 300 εκατομμύρια αστέρες. Αν λοιπόν το 56 είναι το 12,1 % των αστερών με πλανήτες, τότε όλα τα πλανητικά συστήματα παρόμοια με αυτά που ανίχνευσε το OGLE III είναι γύρω στα 462. Άρα μόνο το 0,00015% των άστρων έχουν πλανήτες και όχι το 50%, όπως έθετε ο Drake στην εξίσωσή του πριν 43 χρόνια. Συνεπώς, μέσα σε έναν γαλαξία περιέχονται 8,1 πλανήτες με μάζα περίπου τρεις φορές σαν του Δία και σε απόσταση 1,2 AU περίπου από τον αντίστοιχο αστέρα. Αυτοί οι πλανήτες δεν είναι και τόσο φιλόξενοι για την ζωή. Όμως το ποσοστό των πλανητών σαν την Γη σε σχέση με τον αριθμό των γιγάντων πλανητών είναι 0,85%. Δηλαδή υπάρχουν 0,07 πλανήτες παρόμοιοι με την Γη ανά γαλαξία ή με άλλα λόγια στο Τοπικό Γαλαξιακό Σμήνος της Παρθένου υπάρχουν 175 πλανήτες. Ενδιαφέρον είναι επίσης ότι αν αλλάξουμε μόνο τον παράγοντα f_p στην εξίσωση Drake το αποτέλεσμα θα είναι $8,4 \cdot 10^{-6}$ νοήμονες πολιτισμοί στον γαλαξία.. Το

παραπάνω αποτέλεσμα είναι πολύ μικρότερο στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα όταν έχουμε μια αστρική μάζα είναι αδύνατο να μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε μάζες ίσες με μία ηλιακή ή είναι πολύ πιθανό να ισχύει η υπόθεση της σπάνιας Γης, των P. D. Ward και D. C. Brownlee. Η υπόθεση αυτή υποστηρίζει ότι οι συνθήκες που επικρατούν στην Γη και στο περιβάλλον της είναι πάρα πολύ δύσκολο να ξαναεμφανιστούν σε κάποιο άλλο μέρος του Σύμπαντος. Συνθήκες όπως η ύπαρξη φυσικού δορυφόρου, γίγαντα πλανήτη σε εξωτερική τροχιά, η τεκτονική των πλακών και τα ηφαίστεια είναι στοιχεία που κάνουν ακόμα πιο σπάνιες τις ζώνες βιωσιμότητας.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η ζωή τελικά δεν είναι και τόσο διαδεδομένο φαινόμενο στους γαλαξίες όσο πιστεύαμε κάποτε. Και ίσως αυτό να μικρύνει ακόμα περισσότερο στο μέλλον. Δηλαδή η ζωή τελικά ίσως έχει παραμέτρους που αγνοούμε σήμερα. Για παράδειγμα, ίσως να εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο του γαλαξία, από τα μεσοαστρικά νέφη ή από άλλες παραμέτρους που δεν φανταζόμαστε σήμερα. Ίσως ακόμα να ισχύει και κάτι το οποίο θα ήταν μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις στην ιστορία της ανθρωπότητας, αν μπορούσαμε δηλαδή να ανιχνεύσουμε πλανητικά συστήματα σαν την Γη τα οποία δεν φιλοξενούν ζωή, επομένως η ζωή δεν είναι φαινόμενο συνηθισμένο. Τέλος ακόμα μπορεί να ισχύει μια άλλου είδους κυματοσυνάρτηση η οποία να υπολογίζει το κύμα πιθανότητας της ύπαρξης ζωής μέσα σε κάποιο δυναμικό. Όλα αυτά είναι υποθέσεις του μακρινού μέλλοντος. Όμως τελικά, το αίτημα της Ασθενής Ανθρωπικής Αρχής φαίνεται να βγαίνει από την σφαίρα της επιστημονικής φαντασίας όσο περνάει ο χρόνος και τα αποτελέσματα από την ανίχνευση πλανητών πληθαίνουν. Ίσως βρισκόμαστε σ' ένα δεύτερο πείραμα Michelson – Morley, στην Ιστορία της Επιστήμης, το οποίο θα δείξει ότι αυτό που ψάχνουμε απλά δεν υπάρχει και το Σύμπαν θέλει να μας πει κάτι με τον "εγωισμό" του. Ο άνθρωπος παύει να είναι απομονωμένος στον μικρό του πλανήτη από το υπόλοιπο Σύμπαν και σταματάει να το παρατηρεί παθητικά. Μια άποψη που την υιοθετούν πολλοί αστρονόμοι ανά τον κόσμο είναι ότι η ύπαρξή του παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στις τιμές των παγκόσμιων σταθερών. Πάντως το μόνο σίγουρο είναι ότι σιγά – σιγά ο άνθρωπος βρίσκεται στον δρόμο για να βρει την Φύση του.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ο κόσμος μοιάζει με μια σκακίερα μέσα σ' έναν πολύχρωμο υπερχώρο. Ένα γιγάντιο χρονόμετρο που κανένας δεν μπορεί να αποφανθεί αν μετράει σωστά ή αντίστροφα, καθώς η βαλλίστρα της γνώσης, στοχεύει με το βέλος του χρόνου στο μήλο της αβεβαιότητας. Τα ασπρόμαυρα τετράγωνα έχουν χρωματιστεί στα χρώματα των απείρων νεφελωμάτων και των γαλαξιών, κόσμων που κανένας δεν μπορούσε να φανταστεί πόσο μεγάλη σχέση έχουν με τον καθένα μας. Η μουσική του Σύμπαντος άρχισε να παίζει από τότε που ο Χρόνος έκλαιγε σαν μωρό παιδί στην κούνια και η ανθρώπινη διάνοια δεν μπορεί να γνωρίζει ακόμα, αν δημιουργήθηκε για να τον νανουρίζει ή να τον αφυπνίσει. Ο άνθρωπος, θεατής και ηθοποιός στην αρχαιότερη τραγωδία ή κωμωδία που γράφτηκε ποτέ, παίκτης και πιόνι σ' αυτό το παιχνίδι, αγωνίζεται να φτάσει στο τέλος, να φτάσει απέναντι για να γίνει Βασίλισσα. Τότε ίσως μάθει αν είχε αντίπαλο ή όχι.....

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Τα γνωστά πλανητικά συστήματα που ανακαλύφθηκαν μέχρι σήμερα
(18/7/2003)

NAME		Mass (jup)	SEM-MAJ. AXIS (AU)	PERIOD (days)	ECC
OGLE-TR-56	b	0,9	0,0225	1,2	-----
HD 73256	b	1,85	0,037	2,54863	0,038
HD 83443	b	0,14	0,04	2,985	0,08
HD 46375	b	0,249	0,041	3,024	0,04
HD 179949	b	0,84	0,045	3,093	0,05
HD 187123	b	0,52	0,042	3,097	0,03
Tau Boo	b	3,87	0,0462	3,3128	0,018
BD-10_3166	b	0,48	0,046	3,487	0,0
HD 75289	b	0,42	0,046	3,51	0,054
HD 209458	b	0,69	0,045	3,524738	0,0
HD 76700	b	0,197	0,049	3,971	0,0
51 Peg	b	0,46	0,0512	4,23	0,013
Ups And	b	0,69	0,059	4,6170	0,012
	c	1,19	0,829	241,5	0,28
	d	3,75	2,53	1284	0,27
HD 49674	b	0,12	0,0568	4,948	0,0
HD 68988	b	1,90	0,071	6,276	0,14
HD 168746	b	0,23	0,065	6,403	0,081
HD 217107	b	1,28	0,07	7,11	0,14
HD 162020	b	13,75	0,072	8,428198	0,277
HD 130322	b	1,08	0,088	10,724	0,048
HD 108147	b	0,41	0,104	10,901	0,498
HD 38529	b	0,78	0,129	14,309	0,29
	c	12,7	3,68	2174,3	0,36
55 Cnc	b	0,84	0,11	14,65	0,02
	c	0,21	0,24	44,28	0,34
	d	4,05	5,9	5360	0,16
GI 86	b	4	0,11	15,78	0,046
HD 195019	b	3,43	0,14	18,3	0,05
HD 6434	b	0,48	0,15	22,09	0,3

HD 192263	b	0,72	0,15	24,348	0,0
Gliese 876	c	0,56	0,13	30,1	0,12
	b	1,98	0,21	61,02	0,27
rho Crb	b	1,04	0,22	39,845	0,04
HD 74156	b	1,56	0,276	51,61	0,649
	c	>7,5	4,47	2300	0,395
HD 168443	b	7,7	0,29	58,116	0,529
	c	16,9	2,85	1739,5	0,228
HD 3651	b	0,2	0,284	62,23	0,63
HD 121504	b	0,89	0,32	64,6	0,13
HD 178911 B	b	6,292	0,32	71,487	0,1243
HD 16141	b	0,23	0,35	75,560	0,28
HD 114762	b	11	0,3	84,03	0,334
HD 80606	b	3,41	0,439	111,78	0,1243
HD 219542 B	b	0,3	0,46	112,1	0,32
HD 52265	b	1,13	0,49	118,96	0,29
70 Vir	b	7,44	0,48	116,689	0,4
HD 216770	b	0,7	0,46	118,3	0,32
GJ 3021	b	3,21	0,49	133,82	0,505
HD 37124	b	0,75	0,54	152,4	0,10
	c	1,2	2,5	1495	0,69
HD 104985	b	6,3	0,78	198,2	0,03
HD 73526	b	3,0	0,66	190,5	0,34
HD 82943	b	0,88	0,73	221,6	0,54
	c	1,63	1,16	444,6	0,41
HD 169830	b	2,81	0,79	227,4	0,33
	c	2,33	2,75	1487	0,00
HD 8574	b	2,23	0,76	228,8	0,4
HD 89744	b	7,2	0,88	256	0,54
HD 134987	b	1,58	0,78	260	0,25
HD 40979	b	3,32	0,811	267,2	0,25
HD 12661	b	2,30	0,83	263,6	0,096
	c	1,57	2,56	1444,5	<0,1
HD 150706	b	1,0	0,82	264,9	0,38
HR 810	b	2,26	0,925	320,1	0,161
HD 142	b	1,36	0,98	338	0,37
HD 92788	b	3,8	0,94	340	0,36
HD 28185	b	5,6	1,0	385	0,06
HD 142415	b	1,73	1,07	387,6	0,5
HD 177830	b	1,28	1,00	391	0,43
HD 108874	b	1,65	1,07	401	0,20
HD 4203	b	1,65	1,09	400,944	0,46

HD 128311	b	2,63	1,06	414	0,21
HD 27442	b	1,28	1,18	423,841	0,07
HD 210277	b	1,28	1,097	437	0,45
HD 19994	b	2,0	1,3	454	0,2
HD 20367	b	1,07	1,25	500	0,23
HD 114783	b	0,9	1,20	501	0,1
HD 147513	b	1	1,26	540,4	0,52
HD 75458	b	8,64	1,34	550,651	0,71
HD 222582	b	5,11	1,35	572	0,71
HD 65216	b	1,33	1,31	578	0,29
HD 160691	b	1,7	1,5	638	0,31
	c ?	1 ?	2,3 ?	1300 ?	0,8 ?
HD 141937	b	9,7	1,52	653,22	0,41
HD 41004A	b	2,3	1,31	655	0,39
HD 47536	b	4,96	1,61	712,13	0,2
HD 23079	b	2,61	1,65	738,459	0,1
16 CygB	b	1,69	1,67	798,938	0,67
HD 4208	b	0,80	1,67	812,197	0,05
HD 114386	b	0,99	1,62	872	0,28
gamma Cephei	b	1,59	2,03	902,96	0,2
HD 213240	b	4,5	2,03	951	0,45
HD 10647	b	1,17	2,10	1056	0,32
HD 10697	b	6,12	2,13	1077,906	0,11
47 Uma	b	2,41	2,10	1095	0,096
	c	0,76	3,73	2594	<0,1
HD 190228	b	4,99	2,31	1127	0,43
HD 114729	b	0,82	2,08	1131,478	0,31
HD 111232	b	7,8	2,07	1138	0,25
HD 2039	b	4,85	2,19	1192,582	0,68
HD 136118	b	11,9	2,335	1209,6	0,366
HD 50554	b	4,9	2,38	1279	0,42
HD 196050	b	3,0	2,5	1289	0,28
HD 216437	b	2,1	2,7	1294	0,34
HD 213435	b	1,49	2,7	1442,919	0,34
HD 106252	b	6,81	2,61	1500	0,54
HD 23596	b	7,19	2,72	1558	0,314
14 Her	b	4,89	2,85	1730,461	0,38
HD 39091	b	10,35	3,29	2063,818	0,62
HD 72659	b	2,55	3,24	2185	0,18
HD 70642	b	2,0	3,3	2231	0,1
HD 33636	b	9,28	3,56	2447,292	0,53

Epsilon Eri	b	0,86	3,3	2502,1	0,608
HD 30177	b	9,17	3,86	2819,654	0,3
GI 777A	b	1,33	4,8	2902	0,48

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ DIMM ΜΕ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ Α. Π. Θ – Σ. Σ. Ο

- Αρχικά στήνουμε το τηλεσκόπιο, τον υπολογιστή και τον εξοπλισμό του DIMM (CCD ST4, τροφοδοτικό, ST4 guider). Έπειτα τα συνδέουμε μεταξύ τους.
- Εντοπίζουμε έναν λαμπρό αστέρα κοντά στο ζενίθ με το τηλεσκόπιο και το κεντράρουμε όσο το δυνατόν καλύτερα. Εάν είναι δυνατόν κάνουμε χρήση σταυρονήματος. Συνιστούμε να ελέγξει κανείς πρώτα τον φάκελο C:\dimm-8 και να επιλέξει έναν αστέρα για τον οποίο υπάρχει έτοιμο αρχείο. Τα αρχεία στον φάκελο έχουν κατάληξη ".in". Για παράδειγμα το αρχείο "a-Lyr" αναφέρεται στον αστέρα Βέγα (α Lyr).
- Βγάζουμε τον προσοφθάλμιο και στην θέση του τοποθετούμε την CCD. 1
- Ανοίγουμε τον υπολογιστή και κάνουμε επανεκκίνηση σε MS – DOS. Ελέγχουμε αν υπάρχει ο φάκελος C:/data. Αν δεν υπάρχει τον δημιουργούμε. Αν διαθέτουμε τηλεσκόπιο διαμέτρου 8'', χρησιμοποιούμε τα αρχεία ".in" του υποφακέλου

C:\dimm-8

- Αν διαθέτουμε τηλεσκόπιο διαμέτρου 11'' χρησιμοποιούμε τα αρχεία ".in" του υποφακέλου

C:\dimm-11

Η εργασία σε κάθε φάκελο είναι η ίδια. Τρέχουμε το εκτελέσιμο αρχείο "dimm.exe". Τα μηνύματα που βγαίνουν μας ενημερώνουν για την κατάσταση του συστήματος, αν βρέθηκε η CCD κάμερα και που. Αν δεν βρεθεί η κάμερα το πιθανότερο είναι να έχουμε ξεχάσει να συνδέσουμε τον υπολογιστή με το ST4 guider ή να μην έχουμε ανοίξει το τροφοδοτικό. Επίσης η ένδειξη 99, 9, 9 στην οθόνη του ST4 guider είναι μήνυμα σφάλματος. Εάν η CCD κάμερα συνδέθηκε με ταχύτητα μικρότερη από 57 Kbps, δίνουμε "e" (έξοδο) και τρέχουμε το αρχείο "dimm.exe" ξανά. Στην ερώτηση του συστήματος happy ? μπορούμε να απαντήσουμε με "c" για να συνεχίσουμε ή με "e" για έξοδο. Γράφοντας "c" η επόμενη ερώτηση είναι να δώσουμε το όνομα του αρχείου script. Αυτό εξαρτάται από τον αστέρα που θέλουμε να μετρήσουμε. Για παράδειγμα να θέλουμε να μετρήσουμε τον Βέγα γράφουμε a-lyr.in. Το πρόγραμμα αρχίζει να "τρέχει" εμφανίζοντας στην οθόνη μια τετράγωνη επιφάνεια που αντιστοιχεί στην επιφάνεια του chip της κάμερας. Η επιφάνεια στην οθόνη χωρίζεται από μια κάθετη γραμμή στην μέση. Κάπου μέσα στο παράθυρο βρίσκεται το είδωλο του αστέρα.

- Έπειτα τοποθετούμε την μάσκα με της δύο οπές μπροστά από τον αντικειμενικό φακό (ή το πρωτεύον κάτωπτρο) και αμέσως παρατηρούμε στην οθόνη του υπολογιστή το είδωλο του αστέρα να διαχωρίζεται. Αναλόγως στο τηλεσκόπιο το βήμα αυτό μπορεί να είναι το πρώτο ολόκληρης της διαδικασίας. Αυτό είναι στην κρίση του παρατηρητή.
- Αρχίζουμε τώρα να εστιάζουμε ή να αφεστιάζουμε το τηλεσκόπιο προκειμένου η απόσταση μεταξύ των δύο ειδώλων να είναι περίπου 20 – 30 pixels. Η απόσταση αυτή εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή. Αμέσως μετά περιστρέφουμε την κάμερα έτσι ώστε η νοητή γραμμή που ενώνει τα δύο είδωλα στην οθόνη να γίνει κατακόρυφη.
- Κινώντας το τηλεσκόπιο κατά ωριαία γωνία και απόκλιση (με πολύ μικρές κινήσεις) τοποθετούμε το ζεύγος των ειδώλων στο δεξιό μέρος του παραθύρου και πατάμε “c” για να αρχίσουν οι μετρήσεις. Η οθόνη αλλάζει και οι μετρήσεις γίνονται αυτόματα. Αριστερά εμφανίζονται τα δύο είδωλα. Πάνω δεξιά έχουμε έναν πίνακα με δύο στήλες. Στην αριστερή στήλη έχουμε τον αριθμό της τρέχουσας μέτρησης, τις συντεταγμένες κατά X και Y του πρώτου ειδώλου του αστέρα, τις συντεταγμένες κατά X και Y του δεύτερου ειδώλου του αστέρα, τις αντίστοιχες εντάσεις και το seeing (FWHM – L) στον άξονα των X. Στην δεξιά στήλη έχουμε τον αριθμό της τρέχουσα μέτρησης που αποδέχεται το πρόγραμμα, ομοίως τις συντεταγμένες των δύο ειδώλων αντίστοιχα, τις αντίστοιχες εντάσεις και το seeing (FWHM – T) στον άξονα των Y. Κάτω από τον πίνακα φαίνονται κάποιες γραφικές παραστάσεις οι οποίες δημιουργούνται εκείνη την στιγμή από τα δεδομένα που παίρνουμε. Η πρώτη είναι η καμπύλη του seeing (σε δευτερόλεπτα τόξου) σε συνάρτηση του χρόνου. Έχει εύρος 3’’ (από 0’’ έως 3’’). Από κάτω έχουμε την καμπύλη της ελάχιστης γωνιώδους απόστασης που μπορούμε να ξεχωρίσουμε κάποιο αντικείμενο από τον παρατηρούμενο αστέρα κατά την διεύθυνση του Y. Έχει εύρος 6’’ (από –3’’ έως 3’’). Αμέσως μετά έχουμε ακριβώς την ίδια καμπύλη κατά την διεύθυνση του X. Τέλος έχουμε την καμπύλη της έντασης των ειδώλων σε ψηφιακές μονάδες κάμερας ως συνάρτηση του χρόνου.
- Επειδή δεν διαθέτουμε auto – guider με την πάροδο του χρόνου τα είδωλα βγαίνουν σιγά – σιγά από το πεδίο της κάμερας. Μόλις αρχίζει να γίνεται αυτό, ακούγεται ο χαρακτηριστικός ήχος που κάνει το ST4 guider προκειμένου να διορθώσει την θέση των ειδώλων. Καλό θα ήταν να γίνει η διόρθωση της θέσης χειροκίνητα γιατί αργά η γρήγορα το ζεύγος των ειδώλων θα εξαφανιστεί από το πεδίο και η μέτρηση θα σταματήσει.
- Τέλος όταν πιστεύουμε ότι οι μετρήσεις που πήραμε είναι ικανοποιητικές γράφουμε “ E “ για έξοδο. Είναι πολύ σημαντικό να έχουμε στο μυαλό μας ότι οι μετρήσεις μέχρι να κάνουμε “ έξοδο “ δεν αποθηκεύονται στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή. Έτσι, αν κολλήσει ο υπολογιστής ή υπάρξει διακοπή ρεύματος, ή γενικά σταματήσει η μέτρηση χωρίς να κάνουμε “ έξοδο “ ΧΑΝΟΝΤΑΙ όλες οι μετρήσεις.

- Μετά την έξοδο τα αρχεία σώζονται στον φάκελο

C:\data

Ο οποίος **επιβάλλεται** να υπάρχει εκ των προτέρων για να τρέχει το εκτελέσιμο αρχείο dimm.exe

- Τα δεδομένα σώζονται με την μορφή txt αρχείου. Για παράδειγμα ένα αρχείο είναι το 08200145.sec. Οι αριθμοί σημαίνουν

08: μήνας

20: ημερομηνία

01: ώρα αρχής της μέτρησης

45: λεπτά

Τα περιεχόμενα του αρχείου είναι :

SSO external DIMM

Alpha Lyr

το όνομα του αστέρα

18 37 38 47

οι συντεταγμένες του αστέρα (RA & Dec)

0.10

χρόνοι έκθεσης σε sec

0.01

15

το gain της κάμερας

01483125	31	22	0.55	1.77
01511278	33	26	0.60	1.64
01541157	29	24	0.62	1.79
01571095	32	26	0.51	1.84
01595133	33	29	0.58	1.50
02021387	37	30	0.94	2.26
02050392	33	32	0.94	2.03
02073617	34	31	0.86	1.94
02101924	36	31	0.52	1.80
02130281	34	30	0.58	1.85
02153765	35	27	0.68	1.70
02184187	35	27	0.67	1.58
02210863	34	28	0.67	1.49
02232545	33	25	0.71	1.44
02255215	33	28	0.68	1.56
02282342	33	29	0.55	1.52
02310001	33	27	0.61	1.59

πρώτη στήλη 01: ώρα

48: λεπτά

31: sec

25: εκατοστά

δεύτερη – Τρίτη στήλη: αντίστοιχες εντάσεις

τέταρτη – πέμπτη στήλη: αποτελέσματα seeing κατά X και Y αντίστοιχα

Σημείωση : φρόνιμο είναι να μεταφέρουμε τα δεδομένα (αρχεία “*.txt”) σε κάποιο υποφάκελο που να δηλώνει την τοποθεσία που έγινε η μέτρηση ή / και τα χαρακτηριστικά της. Επίσης θα μπορούσαμε, αφού έχουν σωθεί τα δεδομένα, να επέμβουμε στα αρχεία και να γράψουμε κάτω από τις μετρήσεις πολύτιμες πληροφορίες, όπως καιρικές συνθήκες, προβλήματα στην στήριξη, σφάλματα κατά την διάρκεια της μέτρησης, πιθανές διαβάσεις αραιών συννέφων κτλ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

Παρατηρησιακή Αστρονομία, Σταύρος Αυγολούπης, Ιωάννης Χ. Σειραδάκης

Εισαγωγή στην σύγχρονη Αστρονομία, Ιωάννης Χ. Σειραδάκης, Χαράλαμπος Βάρβογλης

Εισαγωγή στη Φυσική των Αστρικών Συστημάτων, Νικόλαος Καρανικόλας

Εισαγωγή στην Αστροφυσική – Το Σύμπαν που αγάπησα (τόμοι A & B), Μάνος Δανέζης, Στράτος Θεοδοσίου

Μαθήματα Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Φυσικής του Περιβάλλοντος, Χρήστος Ζερεφός

Εργασίες – Δημοσιεύσεις

Quality test of the Kryonerion CCD camera, E. T. Harlaftis

Seeing Measurements at Skinakas Observatory using the DIMM method, P. Boumis, A. Steiakakis, F. Mavromatakis, G. Paterakis and J. Papamastorakis

A Hartmann Differential Image Motion Monitor (H – DIMM) for Atmos Turbulence Characterisation, J. Bally, D. Theil, Y. Billawala, D. Potter, R. F. Loewenstein, F. Mrozek and J. P. Lloyd

Seeing Measurements in Greece, Spain, South West Africa and Chile, K. Birkle, H. Elsasser, Th. Neckel, G. Schnur

Measuring Astronomical Seeing: The DA/IAC DIMM, J. Vernin and C. Munoz - Tunon

From Differential Image Motion to Seeing, A. Tokovinin

The ESO differential image motion monitor, **M. Sarazin and F. Roddier**

Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposure, **D. L. Fried**

An Introduction to Seeing, **V. Dhillon**

A Search for Planetary Transits in Open Clusters, **R. A. Street, K. Horne, A. Penny, Y. Tsiapras, A. Quirrenbach, N. Safizadeh, J. Cooke, D. Mitchell and A. C. Cameron**

Shadow of the planet orbiting HD 209458, **R. A. Street, T. A. Lister, A. C. Cameron and K. Horne**

Recent Results from the Wide Angle Search for Planets (WASP) prototype, **S. R. Kane, K. Horne, R. A. Street, D. L. Pollacco, D. James, Y. Tsiapas and A. C. Cameron**

Theory of Extrasolar Giant Planet Transits, **W. B. Hubbard, J.J. Fortey and J. I. Lunine**

FRESIP: A Mission to Determine the Character and Frequency of Extra-Solar Planets Around Solar – like Stars, **W. J. Borucki, E. W. Dunham, D. G. Koch, W. D. Cochran, J. A. Rose, D. K. Cullers, A. Granados and J. M. Jenkins**

STARE Transit Detection Capabilities, **R. Alonso, J. A. Belmonte and H. Deeg**

The Frequency Content of the Virgo/SoHO Light Curves: Implications for Planetary Transit Detection from Space, **S. Aligrain, G. Gilmore, F. Favata and S. Carpano**

HD 209458: Physical Parameters of the Parent Star and the Transiting Planet, **A. M. Cody and D. D. Sasselov**

Detection of Planetary Transits Across a Sun – like Star, **D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham and M. Mayor**

A Transiting “51 Peg – like” Planet, **G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler and S. S. Vogt**

*Survey for Transiting Extrasolar Planets in Stellar Systems (STEPSS):
The Frequency of Planets in NGC 1245, C. J. Burke, D. L. DePoy,
B. S. Gaudi, J. L. Marsall and R. W. Pogge*

HD 209458 and the Power of the Dark Side, D. Charbonneau

Planetary system around Vega, N. Gorkavyi, T. Taidakova

*The Galactic Habitable Zone I. Galactic Chemical Evolution,
G. Gonzalez and D. Brownlee*

*The Optical Gravitational Lensing Experiment. Additional Planetary and
Low – Luminosity Object Transits from the OGLE 2001 and 2002
Observational Campaigns, D. Udalski, G. Pietrzynski, M. Szymanski,
M. Kubiak, K. Zebrun, I. Soszynski, O. Szewczyk and
L. Wyrzykowski*

*The Kepler Mission: A Mission to Determine the Frequency of Inner
Planets Near the Habitable Zone of a Wide Range of Stars, W. Boruki,
D. G. Koch, E. W. Dunham and J. M. Jenkins*

Περιοδικά – διάφορα :

Sky & Telescope, April 2002

Sky & Telescope, June 2002

Sky & Telescope, September 2002

Astronomy Now, April 2002

Astronomy Now, July 2002

Astronomy Now, August 2002

Scientific American, Ιούνιος 1999

Scientific American, Ιούλιος 1999

Scientific American, Δεκέμβριος 1999

Scientific American, **Ιανουάριος 2000**

Scientific American, **Σεπτέμβριος 2000**

Περισκόπιο της Επιστήμης, **Σεπτέμβριος 2000**

Quantum, **Μάρτιος – Απρίλιος 1999**

Millennium Διάστημα, **Οκτώβριος 1998**

Millennium Διάστημα, **Νοέμβριος 1998**

Millennium, **Μάρτιος 1998**

Millennium, **Μάρτιος 1999**

Night Sky, **Νοέμβριος – Δεκέμβριος**

To Βήμα, **28/11/1999** Χάρης Βάρβογλης

To Βήμα, **13/08/2000** Χάρης Βάρβογλης

CCD Camera Operating Manual for Model ST-7 and ST-8

MaxIm DL Image Progressing software

DaoPhot II, New Generation Manual

Internet:

<http://www.obspm.fr/encycl/catalog.html>

<http://www.psi.edu/~esqerdo/asp/method.html>

<http://www.physics.psu.edu/mamajek/exo.html>

<http://cannon.sfsu.edu/~williams/planeSearch.html>

<http://www.kepler.arc.nasa.gov/index.html>