

**Δημιουργία Διαγράμματος H-R
Των Πλειάδων**



**Η Αξιοποίηση των Ρομποτικών Τηλεσκοπίων
στην Εκπαίδευση**

**Γεώργιος Κλήμης
Παγκρήτιο Εκπαιδευτήριο
Λύκειο**

Γενικές πληροφορίες

Τίτλος: Δημιουργία διαγράμματος Hertzsprung-Russel (H-R) του ανοιχτού αστρικού σμήνους των Πλειάδων.

Σύντομη περιγραφή: Οι μαθητές θα μετρήσουν το φαινόμενο μέγεθος και τον δείκτη χρώματος αστέρων. Τα δεδομένα θα ληφθούν με τη βοήθεια των ρομποτικών τηλεσκοπίων του Σκίνακα και θα αναλυθούν με χρήση του κατάλληλου λογισμικού.

Λέξεις κλειδιά: Φαινόμενο και Απόλυτο μέγεθος, Λαμπρότητα, Φωτεινότητα, Δείκτης Χρώματος, Θερμοκρασία αστέρων, Μέλαν Σώμα

Εκπαιδευτικό Περιεχόμενο

Ηλικία: 17-18

Προαπαιτούμενα: Φάσματα εκπομπής και απορρόφησης, Ακτινοβολία, Βασικά στάδια αστρικής εξέλιξης.

Επίπεδο Δυσκολίας: Μέτριο προς Δύσκολο

Διάρκεια: -

Σύνδεση με το Αναλυτικό Πρόγραμμα: Φυσική Β' Λυκείου (Φως, Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα, Φάσματα εκπομπής και απορρόφησης, Βαρυτικό πεδίο, Ατομική Δομή, Σύντηξη), Φυσική Γ' Λυκείου (Μέλαν Σώμα, Κύματα).

Εκπαιδευτικοί στόχοι

Γνωστικοί : Η γνωριμία με βασικές αστρικές παραμέτρους και το πώς αυτές παρέχουν πληροφορίες για την παρούσα κατάσταση των άστρων και την εξέλιξη τους.

Συναισθηματικοί : Η ικανοποίηση της επίτευξης μετρήσεων και ανάλυσης , που ξεπερνά τα συνήθη όρια της σχολικής πειραματικής Φυσικής καθώς και η ανάδειξη της σημασίας των επιστημονικών μετρήσεων στη θεμελίωση των Θετικών Επιστημών.

Ψυχοκινητικοί: Να μπορούν να κατασκευάζουν ένα διάγραμμα και να το ερμηνεύουν, εξάγοντας συμπεράσματα και κάνοντας προβλέψεις όπου αυτό είναι εφικτό.

Πρόκληση ενδιαφέροντος και διατύπωση ερωτημάτων

- Έχετε παρατηρήσει ποτέ το χρώμα των άστρων; Έχουν όλα το ίδιο χρώμα;
- Τι πιστεύετε ότι καθορίζει το χρώμα μιας θερμής φωτεινής πηγής;
- Κάποιος σας λέει πως «Αναλύοντας το φως ενός άστρου, μπορούμε να μάθουμε σχεδόν τα πάντα γι' αυτό». Τι πιστεύετε, έχει δίκιο ή όχι;
- Έχετε ακούσει ποτέ για το διάγραμμα H-R; Ξέρετε τι απεικονίζει;



Εικόνα 1 Το Χρώμα των άστρων

Τι είναι το διάγραμμα Hertzsprung-Russel και γιατί είναι σημαντικό;

Ένας αστέρας κατά τη διάρκεια της ζωής του εμφανίζει μεταβολές των φυσικών του χαρακτηριστικών. Πώς όμως μπορούμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξή του, αφού ο χρόνος ζωής του είναι δισεκατομμύρια χρόνια; Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί ως εξής: Αφού δε μπορούμε να έχουμε στοιχεία για τα στάδια της ζωής ενός αστέρα, αρκεί να μελετήσουμε ένα πλήθος αστέρων, που βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια εξέλιξης.

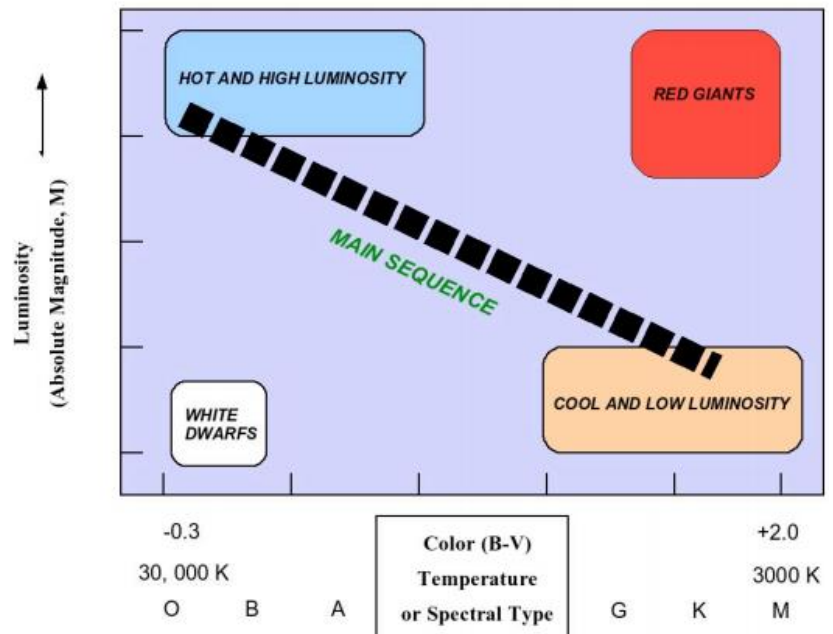
Το 1911, πρώτος ο Δανός αστρονόμος **Ejnar Hertzsprung** και λίγο αργότερα, το 1913 ο Αμερικανός **Henry Norris Russel**, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, διερεύνησαν το ενδεχόμενο ύπαρξης κάποιας σχέσης μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας ή του φασματικού τύπου και της απόλυτης λαμπρότητας (ή φωτεινότητας) ή του απόλυτου μεγέθους των αστέρων.

Σε ένα διάγραμμα με τετμημένες τις θερμοκρασίες των αστέρων και τεταγμένες τις λαμπρότητες τους, τοποθέτησαν τα παρατηρησιακά δεδομένα τους.

Είναι δυνατό να δει το διάγραμμα κάποιος σε διάφορες μορφές και συνδυασμούς δύο π.χ. από τα παραπάνω μεγέθη, όπως Απόλυτο Μέγεθος συναρτήσει του Φασματικού Τύπου, ή Απόλυτο Μέγεθος συναρτήσει της Θερμοκρασίας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι δεν επιλέγουμε τυχαία τα συγκεκριμένα μεγέθη για το σκοπό μας, αλλά επειδή είναι θεμελιώδεις παράμετροι ενός αστέρος και αλληλένδετοι μεταξύ τους. Είναι αυτοί που μας δίνουν τα βασικά και απαραίτητα στοιχεία για να μελετήσουμε ένα άστρο.

Το διάγραμμα αυτό, γνωστό ως διάγραμμα θερμοκρασίας-φωτεινότητας ή συντομευμένα H-R (από τα αρχικά των ονομάτων τους), οδήγησε τους αστρονόμους σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα και σηματοδότησε μια καινούργια εποχή για τη μελέτη των αστέρων.

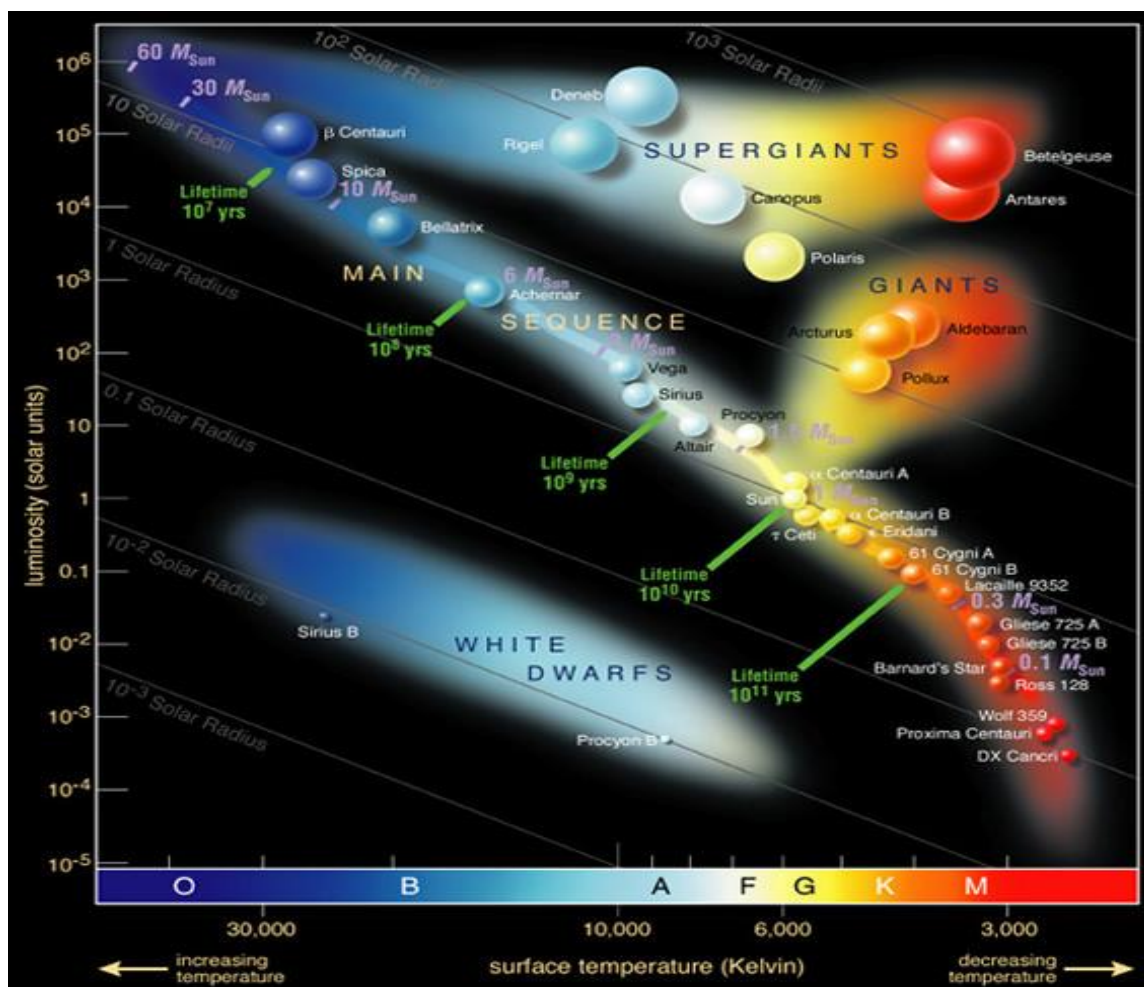
Αλλά ας πούμε μερικά βασικά πράγματα για τα μεγέθη τα οποία αναφέραμε παραπάνω. Πρώτον, η **Θερμοκρασία**, η οποία είναι ο παράγοντας που καθορίζει και το χρώμα ενός αστρού. Κυμαίνεται από περίπου 3000 K (ερυθρά άστρα) έως 25000 K περίπου (κυανά άστρα). Πρόκειται συνήθως για την θερμοκρασία χρώματος την οποία υπολογίζουμε από το φάσμα του αστέρα που φτάνει στη Γη, μέσω του κβαντικού νόμου της μετατόπισης του Wien. Στη συνέχεια, ο **Φασματικός Τύπος**, ο οποίος αφορά την κατάταξη των αστέρων σε 7 κύριες φασματικές ομάδες, τις O, B, A, F, G, K, M, κάθε μία απ' τις οποίες υποδιαιρείται σε 10 υποομάδες (π.χ. G0, G1, G2...G9). Ο διαχωρισμός σε αυτές τις 7 ομάδες έγινε εξαιτίας των διαφορών στα φάσματα που παρατηρούνται στα αστέρια και σχετίζονται με τη διαφορετική θερμοκρασία του καθενός. Όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα, μεγαλύτερη θερμοκρασία (~25000 K) έχουν τα αστέρια τύπου O στα αριστερά και η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς πηγαίνοντας προς τα δεξιά (προς τον τύπο M). Και τέλος, η **Φωτεινότητα** ορίζεται ως ο ρυθμός της εκλυόμενης ακτινοβολίας, σε όλα τα μήκη κύματος, από τη συνολική επιφάνεια του αστέρος.



Εικόνα 2 Τυπική Διάταξη διαγράμματος H-R

Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me

Οι αστέρες δεν κατανέμονται ομοιόμορφα και τυχαία, αλλά ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές περιοχές του διαγράμματος: Οι περισσότεροι από τους αστέρες βρίσκονται πάνω σε μία στενή λωρίδα η οποία αρχίζει από την πάνω αριστερή γωνία του διαγράμματος (θερμοί και φωτεινοί κυανοί γίγαντες αστέρες), διασχίζει διαγώνια το διάγραμμα και τελειώνει στη κάτω δεξιά γωνία (ψυχροί και αμυδροί ερυθροί νάνοι αστέρες). Αυτή η ομάδα αστέρων ονομάζεται **Κύρια Ακολουθία** και αποτελεί τη μεγάλη πλειοψηφία των παρατηρούμενων άστρων γύρω μας, καθότι περιλαμβάνει τα αστέρια που παράγουν την ενέργειά τους με τη σύντηξη του υδρογόνου σε ήλιο. Μια άλλη κατηγορία αποτελεί ο **Κλάδος των Γιγάντων** στην πάνω δεξιά γωνία του διαγράμματος, η οποία χαρακτηρίζει τους ψυχρούς και πολύ φωτεινούς αστέρες, τους **γίγαντες αστέρες** και τους **υπεργίγαντες**, ο αριθμός των οποίων είναι κατά πολύ μικρότερος του αριθμού των αστέρων της κύριας ακολουθίας. Τα άστρα της ομάδας που καταλαμβάνουν τη κάτω αριστερή γωνία του διαγράμματος ονομάζονται **Λευκοί Νάνοι**. Τα γνωστά μας αστρικά πτώματα στα οποία δεν εκτελούνται πια πυρηνικές συντήσεις και στα οποία καταλήγουν αστέρες με μάζα έως και 1,44 Ηλιακές Μάζες (=Όριο Chandrasekhar). Είναι θερμοί και αμυδροί, ενώ αποτελούνται από νουκλεόνια και ηλεκτρόνια. Ακόμα να αναφέρουμε ότι για τη κύρια ακολουθία μόνο, ισχύει ότι μεγαλύτερη φωτεινότητα έχουν οι αστέρες μεγάλης μάζας. Όσο δηλαδή αυξάνεται η μάζα, αυξάνεται και η φωτεινότητα.



Εικόνα 3 Διάγραμμα H-R επιλεγμένων αστέρων

Υπάρχουν δύο ειδών διαγράμματα H-R:

- Τα παρατηρησιακά H-R διαγράμματα, όπου τοποθετούνται τα παρατηρησιακά χαρακτηριστικά των άστρων και παίρνουμε όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά τους (ακτίνα, μάζα κτλ).
- Τα θεωρητικά διαγράμματα H-R, όπου αποτυπώνουν τη θεωρητική εξέλιξη των αστέρων σύμφωνα με τις τιμές των φυσικών τους χαρακτηριστικών.

Έτσι, μπορεί κάθε αστέρι να αντιπροσωπευθεί από ένα σημείο στο διάγραμμα H-R, αλλά ταυτόχρονα ο κύκλος ζωής κάθε αστεριού μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μία τροχιά. Δηλαδή, ένα αστέρι αρχίζει στα δεξιά ως ψυχρό, συστελλόμενο νέφος διαστρικού αερίου. Καθώς θερμαίνεται, θα κινηθεί αριστερά προς την κύρια ακολουθία. Όταν αρχίσουν οι πυρηνικές συντήσεις στο εσωτερικό του και αρχίσει το αστέρι να καίει το υδρογόνο του, «στέκεται» στην κύρια ακολουθία. Εκεί μένει σχεδόν εξ ολοκλήρου σε μια θέση έως να καταναλωθεί όλο το υδρογόνο του πυρήνα σε ήλιο. Ο Ήλιος για παράδειγμα, θα μείνει περίπου 10 δισεκατομμύρια χρόνια στην κύρια ακολουθία. Ήδη βρίσκεται εκεί για 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια. Όταν το υδρογόνο του πυρήνα εξαντληθεί, θα αρχίσουν πιο σύνθετες πυρηνικές αντιδράσεις. Αυτές θα αναγκάσουν την επιφάνεια του Ήλιου μας να ψυχθεί και να διογκωθεί, και ο Ήλιος μας τότε θα μετακινηθεί προς το άνω δεξιό μέρος του διαγράμματος και θα γίνει ένας ερυθρός γίγαντας. Τέλος, όταν σταματήσουν όλες οι πυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα, το μόνο που θα παραμείνει στη θέση του θα είναι ένας λευκός νάνος, που θα βρίσκεται κάτω αριστερά στο διάγραμμα.

Συμπερασματικά, το διάγραμμα H-R έλυσε το πρόβλημα της ταξινόμησης των άστρων, διάταξε τα αστέρια τοποθετώντας τα σαν καθορισμένα σημεία στο διάγραμμα, και αναπαριστά τους κύκλους της ζωής τους, το παρελθόν αλλά το μέλλον των άστρων..

Παρακολουθείστε το παρακάτω βίντεο για την αστρική εξέλιξη

<https://youtu.be/BNifcXtjLsQ>

Αστρικά μεγέθη – Φαινόμενη & Απόλυτη Λαμπρότητα

Πρώτος ο Ίππαρχος το 129 π.Χ., κατέταξε 850 άστρα με βάση τη φαινόμενη τους λαμπρότητα, δηλ. σύμφωνα με το αίσθημα που προκαλούν στο μάτι μας, αποδίδοντάς τους **φαινόμενα** μεγέθη από 1 ως 6, με 1 το λαμπρότερο και 6 το πιο αμυδρό, που μόλις διακρίνεται με γυμνό μάτι. Ένα αστέρι μεγέθους 1 είναι 100 φορές πιο λαμπρό από ένα αστέρι μεγέθους 6. Στην πράξη, η κατάταξη αυτή, ακολουθεί λογαριθμική κλίμακα, κάτι που σχετίζεται με την φυσιολογία των αισθήσεών μας, όπως ήδη έχει πιστοποιηθεί από τα μέσα του 19ου αιώνα (1856 Norman Pogson). Διαφορά ενός μεγέθους, αντιστοιχεί σε

$$\sqrt[5]{100} = 2,512$$

φορές λαμπρότερο άστρο. Το **φαινόμενο μέγεθος m** ενός άστρου μπορεί να έχει και αρνητική τιμή. Όσο μικρότερη η τιμή, τόσο λαμπρότερο φαίνεται. Ο πίνακας που ακολουθεί, δείχνει τα φαινόμενα μεγέθη μερικών χαρ/κών ουράνιων αντικειμένων

Ήλιος	-26.7
Πανσέληνος	-12.6
Αφροδίτη	-4.4
Άρης	-3.0
Σείριος	-1.6
Ουρανός	+5.5
Αμυδρ. αστ. με κυάλια	+9.5
Πλούτωνας	+13.7
Αμυδρ. αστ. με Hubble	+30

Εικόνα 4 Μερικά Φαινόμενα Μεγέθη

- Το **Απόλυτο Οπτικό Μέγεθος M** είναι ο αριθμός που εκφράζει το φαινόμενο μέγεθος ενός αστέρα όταν βρίσκεται σε απόσταση 10 parsec = 32,6 έτη φωτός. Με αυτό το μέγεθος βρίσκουμε ποιο άστρο είναι πράγματι λαμπρότερο από κάποιο άλλο.
- **Φαινόμενη Λαμπρότητα (apparent brightness) ℓ** ορίζεται η ενέργεια ΔE που διέρχεται κάθετα από επιφάνεια ΔS σε χρόνο Δt :

$$\ell = \frac{\Delta E / \Delta t}{\Delta S} \quad \text{σε W/m}^2$$

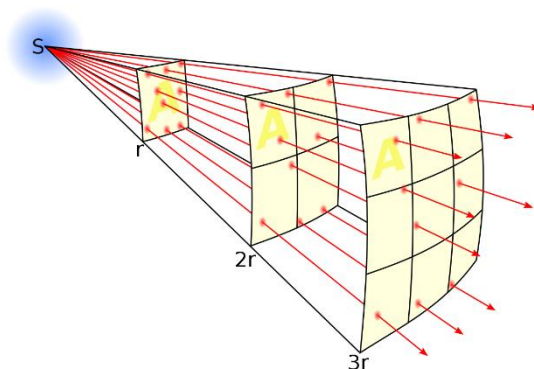
- **Λαμπρότητα ή Φωτεινότητα ή Ισχύς (Luminosity) L** ορίζεται η **συνολική** ενέργεια που εκπέμπει ένα άστρο από την επιφάνειά του στη μονάδα του χρόνου. Καθορίζεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά των άστρων: Το **μέγεθός** τους και την **ενεργή θερμοκρασία** τους. Συχνά, το μέγεθος είναι εκφρασμένο σε ηλιακές ακτίνες R_{\odot} . Αν R η ακτίνα του αστέρα και T η θερμοκρασία στην επιφάνειά του, η λαμπρότητά του δίνεται από τη σχέση:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

με σ είναι την σταθερά Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Σε απόσταση r από το άστρο, η εκπεμπόμενη από το άστρο ενέργεια κατανέμεται σε σφαιρική επιφάνεια ίση με $4\pi r^2$, με αποτέλεσμα η ροή ακτινοβολίας που εκφράζεται από την φαινόμενη λαμπρότητα, να μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση r . Έτσι, η σχέση μεταξύ ℓ και L δίνεται από τη σχέση:

$$\ell = \frac{L}{4\pi r^2}$$



Εικόνα 5 Η φαινόμενη λαμπρότητα μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης

αν αγνοήσουμε την απορρόφηση ακτινοβολίας από τη μεσοαστρική ύλη. Η παραπάνω σχέση δίνει την συνολική (βολομετρική) φαινόμενη λαμπρότητα, που αφορά στην ακτινοβολία όλων των εκπεμπόμενων μηκών κύματος. Αυτή υπολογίζεται μόνο θεωρητικά και όχι πειραματικά.

- **Σχέση Φαινόμενου (m) και Απόλυτου μεγέθους (M)**

$$M = m - 5 \log(D / 10)$$

όπου D η απόσταση του άστρου από τη Γη σε parsec.

- **Σχέση Λαμπρότητας και Μεγέθους**

➤ Φαινόμενη λαμπρότητα ℓ & Φαινόμενο μέγεθος m : $\ell_A / \ell_B = 2,512^{m_B - m_A}$

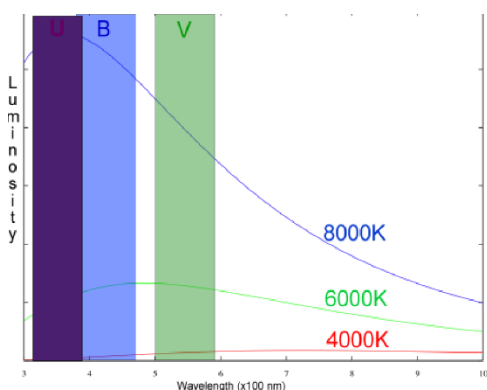
➤ Φωτεινότητα L & Απόλυτο μέγεθος M : $L_A / L_B = 2,512^{m_B - m_A}$

Φωτομετρία UBV

Το σύστημα φωτομετρίας UBV (Ultraviolet, Blue, Visual) ή σύστημα **Johnson-Morgan** αφορά σε μία ευρεία κεντρική ζώνη του Η/Μ φάσματος και αποτελεί την συνήθη μέθοδο κατάταξης των αστέρων σύμφωνα με το χρώμα τους. Τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα έχουν τις αντίστοιχες μέσες τιμές μήκους κύματος:

U: 365nm **B:** 440nm **V:** 550nm

Στο σύστημα αυτό ορίζουμε τις φωτεινότητες L_U, L_B, L_V σαν την συνολική ισχύ εκπομπής ακτινοβολίας υπολογισμένης στη ζώνη $\Delta\lambda$ κάθε φίλτρου, καθώς και τις αντίστοιχες φαινόμενες λαμπρότητες ℓ_U, ℓ_B, ℓ_V και με βάση αυτά ορίζουμε στη συνέχεια τρία φαινόμενα οπτικά μεγέθη m_U, m_B, m_V .



περιοχή	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	F_0 (W/m ²)
U	365	68	3.981×10^{-2}
B	440	98	6.310×10^{-2}
V	550	89	3.631×10^{-2}

Εικόνα 6 Σύστημα UBV

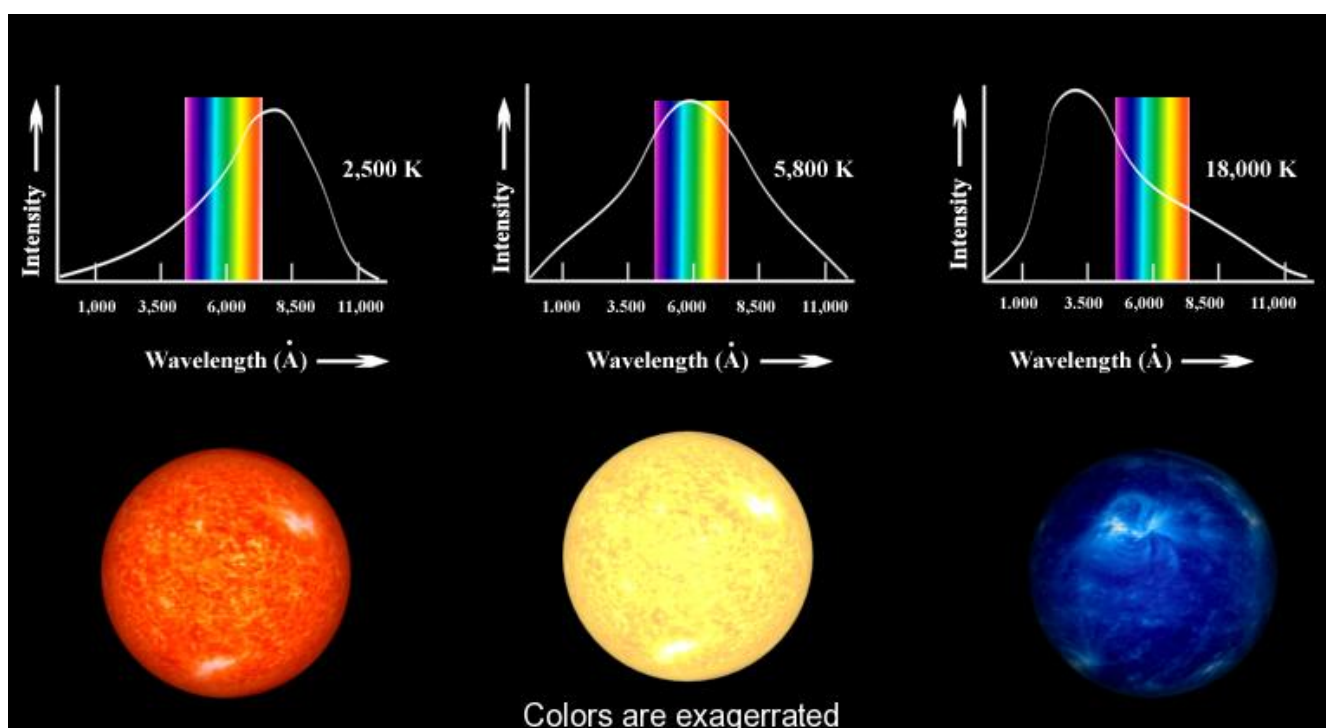
Δείκτες Χρώματος

Δείκτης Χρώματος CI (Color Index) είναι η **διαφορά** των φαινόμενων μεγεθών σε δύο διαφορετικές φασματικές περιοχές:

$$CI \begin{cases} \rightarrow B-V = m_B - m_V \\ \rightarrow U-B = m_U - m_B \end{cases}$$

Αν αγνοήσουμε τη μεσοαστρική απορρόφηση, οι δείκτες χρώματος είναι ανεξάρτητοι της απόστασης του άστρου και εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την ενεργό θερμοκρασία. Συγκεκριμένα:

- Οι **ψυχροί αστέρες** δίνουν μέγιστο εκπομπής στο ερυθρό οπότε **CI > 0**
- Οι **θερμοί αστέρες** δίνουν μέγιστο στο υπεριώδες οπότε **CI < 0**



Εικόνα 7 Μέγιστα εκπομπής θερμών και ψυχρών άστρων

Οι δείκτες χρώματος επηρεάζονται από τη μεσοαστρική απορρόφηση η οποία είναι μεγαλύτερη για μικρότερα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα οι αστέρες να εμφανίζονται πιο ερυθροί από ότι στην πραγματικότητα. Υπάρχει τρόπος διόρθωσης της τιμής των δεικτών χρώματος, που στο παρόν σενάριο δεν θα εφαρμοστεί για λόγους που εξηγούνται παρακάτω.

Spectral Type	O5	B0	A0	F0	G0	K0	M0
Mass (solar)	40	15	3.5	1.7	1.1	0.8	0.5
B-V	-1.2	-0.3	0.0	0.3	0.6	0.8	1.4
MS Lifetime	1.0×10^6	1.1×10^7	4.4×10^8	3.0×10^9	8.0×10^9	1.7×10^{10}	5.6×10^{10}

Εικόνα 8 Φασματικοί τύποι & Δείκτης χρώματος B-V

Δημιουργία υποθέσεων και σχέδιο εργασίας

- Για τις μετρήσεις μας επιλέξαμε ένα αστρικό σμήνος. Γιατί έγινε μια τέτοια επιλογή αντί τυχαίων αστέρων; Πρόκληση συζήτησης.
- Για την κατασκευή του διαγράμματος θα χρειαστεί να μετρήσουμε στον άξονα y την **φωτεινότητα L** ή **το απόλυτο μέγεθος M** των άστρων του σμήνους και στον x τον **δείκτη χρώματος** ή τον **φασματικό τύπο** ή την **θερμοκρασία**. Θα μπορούσαμε στην περίπτωση του σμήνους μας, να αντικαταστήσουμε στον y άξονα την φωτεινότητα ή το απόλυτο μέγεθος με το **φαινόμενο μέγεθος m** ; Τι πρέπει να ισχύει για να είναι αυτό έγκυρο; Συζήτηση.
- Τι πιστεύετε για τις ηλικίες των αστέρων του σμήνους; Είναι μικρές ή μεγάλες; Πώς θα φανεί αυτό στο διάγραμμά μας; Ακολουθεί μια φωτογραφία των Πλειάδων. Φαίνεται σε αυτή κάτι που να υποστηρίζει την απάντησή σας στα προηγούμενα ερωτήματα;



Εικόνα 9 Πλειάδες

Παρακολουθείστε το παρακάτω βίντεο για τα αστρικά σμήνη

<https://www.youtube.com/watch?v=bOM1gQDIbZk>

Σχεδιασμός και Πειραματισμός

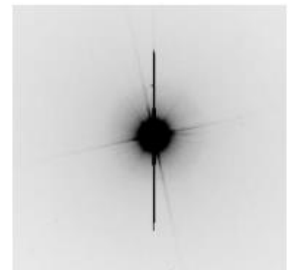
Λήψη Φωτογραφιών

- Χρησιμοποιώντας είτε το ρομποτικό τηλεσκόπιο του Σκίνακα, είτε το παγκόσμιο δίκτυο τηλεσκοπίων του LCO (Las Cumbres Observatory, <https://observe.lco.global/?limit=20>), παίρνουμε φωτογραφίες του σμήνους M45 των Πλειάδων στις συντεταγμένες:

Απόκλιση (Declination D) **+24° 7' 0"** και

Ορθή Αναφορά (Right Ascension RA) **3h 47m 24s**


- Το σμήνος καταλαμβάνει στον ουρανό πεδίο περίπου 2°. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε τηλεσκόπιο με σχετικά μεγάλο οπτικό πεδίο (μικρή εστιακή απόσταση). Επιπλέον επειδή δεν πρόκειται για αμυδρό αντικείμενο, δεν είναι απαραίτητη η χρήση μεγάλου τηλεσκοπίου.
- Επειδή υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην λαμπρότητα των αστέρων του σμήνους, ρυθμίζουμε τον χρόνο έκθεσης έτσι ώστε στα φωτεινότερα άστρα να μην έχουμε υπερέκθεση, γιατί τότε θα κάνουμε λάθος μετρήσεις. Παράδειγμα υπερέκθεσης αποτελεί η διπλανή φωτογραφία.

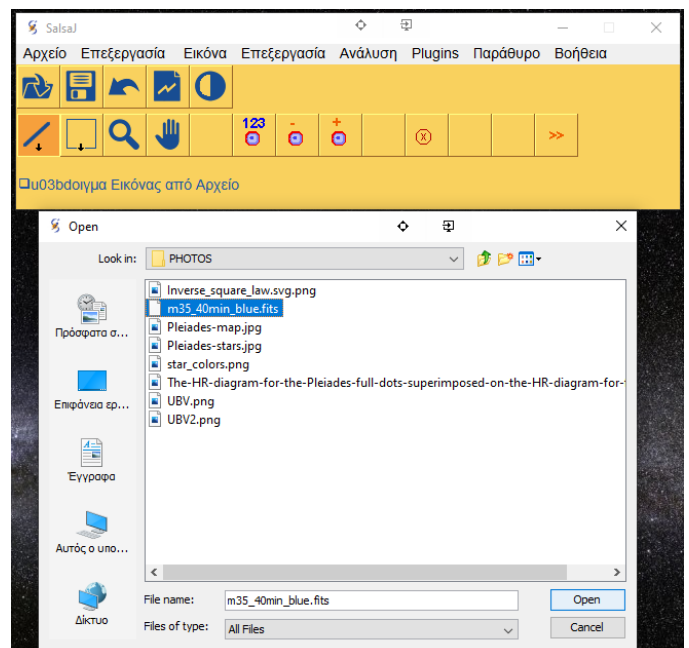



Φωτομετρία με το SalsaJ

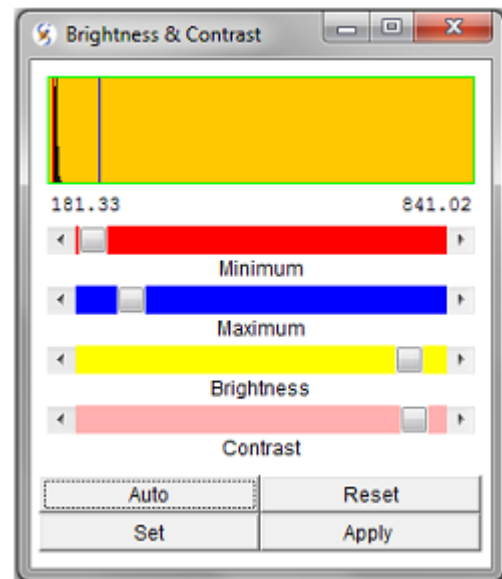
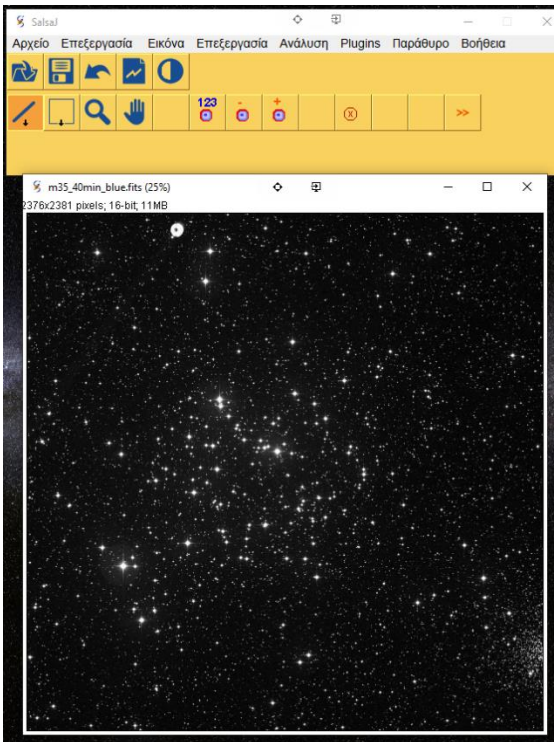
Για την ανάλυση των φωτογραφιών και τη διαδικασία της φωτομέτρησης θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα **SalsaJ** (Such A Lovely Software for Astronomy in Java), ένα εύχρηστο πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα σε περιβάλλον JAVA. Κατεβάστε την έκδοση 2.1 από [εδώ](#) και το JAVA από [εδώ](#) κι [εδώ](#) και εγκαταστήστε τα.

- Ανοίγουμε το SalsaJ

- Πατάμε το κουμπί  για να ανοίξουμε μία εικόνα

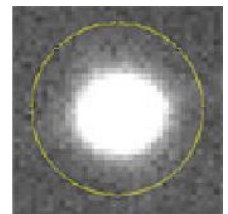


- Πατάμε το κουμπί  για να ρυθμίσουμε την φωτεινότητα και την αντίθεση, σε περίπτωση που η εικόνα μας δεν είναι ευδιάκριτη, χειροκίνητα ή πατώντας το κουμπί “Auto”.



Τι πρέπει να γνωρίζουμε πριν την ανάλυση των εικόνων

- Η λήψη των εικόνων έχει γίνει με CCD κάμερα προσαρμοσμένη στο τηλεσκόπιο. Καρδιά μιας τέτοιας κάμερας είναι ένας αισθητήρας πάνω στον οποίο προβάλλεται το φωτεινό είδωλο στην εστία του τηλεσκοπίου, και αποτελείται από φωτοευαίσθητα στοιχεία που αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία (pixel), της εικόνας που παίρνουμε. Με απλά λόγια, ένα ποσοστό από τα φωτόνια που προσπίπτουν σε κάθε pixel, δημιουργεί αντίστοιχο αριθμό ηλεκτρονίων που αποθηκεύονται σε ένα πυκνωτή που αντιστοιχεί στο pixel αυτό. Στο τέλος του χρόνου έκθεσης, η κάμερα “διαβάζει” το συγκεντρωμένο φορτίο από κάθε pixel και το μετατρέπει σε ψηφιακό αριθμό (ADU: Analog-to-Digital Unit). Το ποσοστό φωτονίων που δίνουν ηλεκτρόνια, καθορίζει την ευαισθησία της κάμερας (quantum efficiency), που στις αστρονομικές κάμερες είναι περίπου 80% (η αντίστοιχη ευαισθησία του ματιού μας είναι μόλις 1%).
- Τα αστέρια, λόγω της μεγάλης απόστασής του από τη Γη, θεωρούνται σημειακές φωτεινές πηγές. Όταν εξετάζετε την εικόνα ενός άστρου, θα δείτε πως αποτελείται από μια ομάδα pixels που κάποια κοντά στο κέντρο είναι λαμπρότερα ενώ αυτά που βρίσκονται στην περιφέρεια είναι αμυδρότερα. Εντούτοις, στην πράξη, το φως των άστρων διαχέεται καθώς περνά από την ατμόσφαιρα και επεκτείνει την κατανομή. Το σημάδι που αναπαριστά το είδωλο του άστρου στην εικόνα λέγεται **seeing disk** επειδή οι ατμοσφαιρικές συνθήκες έχουν ισχυρή επίδραση στην ένταση του φωτός.

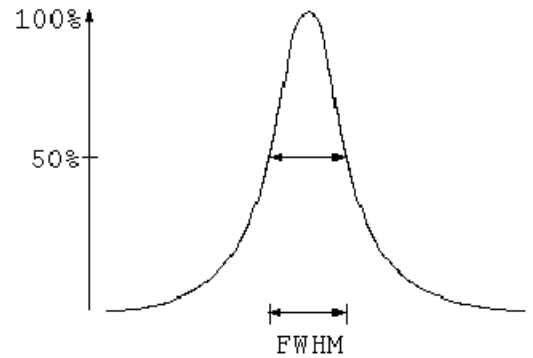


Για να μετρήσουν οι επιστήμονες την ένταση ενός τέτοιου ειδώλου χωρίς σαφή όρια, χρησιμοποιούν τον όρο “Full Width at Half Maximum – FWHM” που ορίζεται ως το πλήθος των εικονοστοιχείων που περικλείονται στο μισό της δυναμικής περιοχής μεταξύ του υποβάθρου και του λαμπρότερου pixel του ειδώλου.

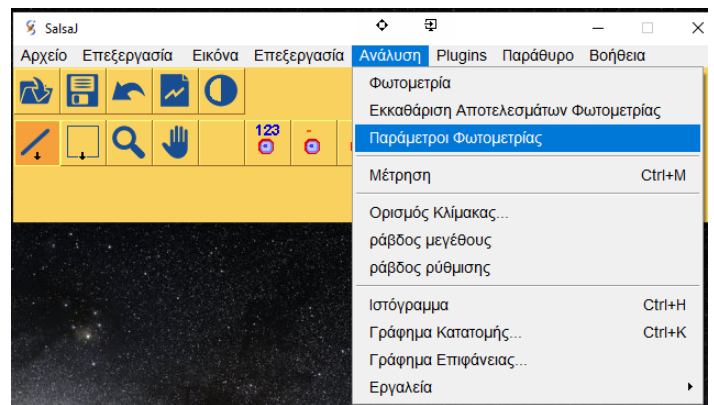
Προτού αρχίσουμε την φωτομετρία, θα πρέπει να καθορίσουμε την ακτίνα ανάλυσης (ή διάφραγμα-aperture) ,δηλ. το μέγεθος του κύκλου εντός του οποίου θα καταμετρηθούν οι τιμές φωτεινότητας των pixel.

Αυτό είναι σημαντικό γιατί, αν μεν η ακτίνα είναι μικρή δεν θα μετρηθεί όλο το φως του άστρου, ενώ αν είναι μεγάλη, η μέτρηση επηρεάζεται από την ακτινοβολία του ουρανού (υποβάθρο) ή την παρουσία άλλων άστρων.

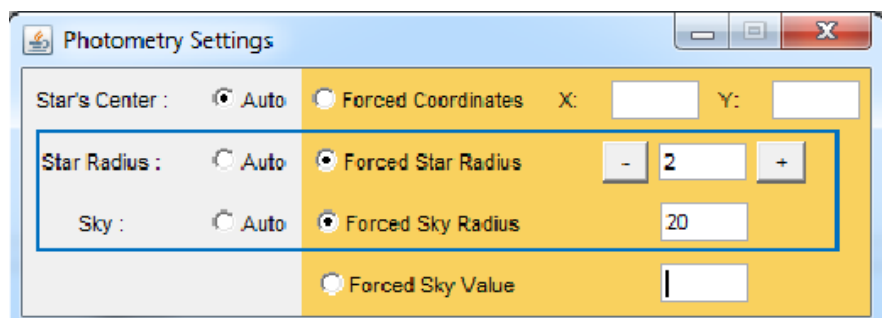
Το SalsaJ υπολογίζει αυτόματα την ακτίνα FWHM στις εικόνες. Συνίσταται παρόλα αυτά να εντοπίσουμε εμείς την τιμή της ακτίνας, για πιο ακριβή αποτελέσματα. Για να το πετύχουμε, εργαζόμαστε ως εξής:



➤ **Ανάλυση → Παράμετροι φωτομετρίας**

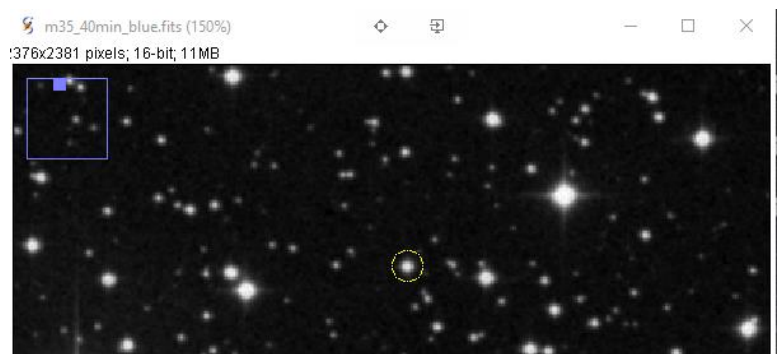


➤ **Εμφανίζεται το παράθυρο:**



➤ **Ανάλυση → Φωτομετρία**

Με το ποντίκι επιλέγουμε ένα άστρο. Εμφανίζεται ένας κύκλος. Με το κουμπί του μεγεθυντικού φακού ζουμάρουμε για να φανεί καλύτερα.



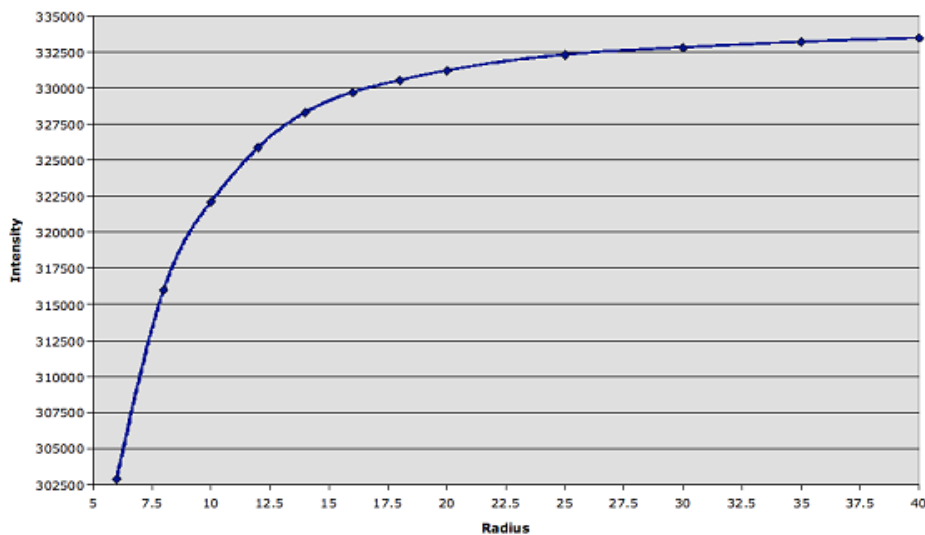
- Βλέπουμε τον υπολογισμό της έντασης στο διπλανό παράθυρο

Index	Image	X	Y	Star's intensity	Star's radius	Sky's intensity	Sky's radius	Message
2	08102015.fits	1189	946	22056	2	204	20	

- Δημιουργούμε ένα φύλλο Excel με δύο τουλάχιστον στήλες **Ακτίνα** και **Ένταση**. Αυξάνουμε στο SalsaJ την ακτίνα ανά βήματα των 2 pixel μέχρι τα 20 και ανά 5 μετά τα 20 και συμπληρώνουμε τον πίνακα στο Excel

Radius	Intensity
6	302877.6
8	315993.42
10	322090.67
12	325863.39
14	328294.36
16	329688.48
18	330517.92
20	331191.98
25	332291.85
30	332795.54
35	333179.15
40	333457.04

- Κάνοντας την γραφική παράσταση θα πάρουμε μια τέτοια καμπύλη, όπου φαίνεται η απότομη αύξηση της έντασης με την ακτίνα. Από κάποια τιμή ακτίνας και μετά, π.χ. 15, ο ρυθμός αύξησης μειώνεται γιατί περιλαμβάνεται όλη η εικόνα του άστρου ενώ η περαιτέρω αύξηση οφείλεται στο αυξανόμενο τμήμα του ουρανού που περιλαμβάνει ο κύκλος.



Εφόσον οι μετρήσεις μας θα γίνουν για το ίδιο σμήνος σε δύο φίλτρα (B, V), πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την ίδια ακτίνα του ίδιου άστρου και στις δύο εικόνες, και ο ευκολότερος τρόπος είναι να έχουμε τις εικόνες τη μια δίπλα στην άλλη.

- Για απλοποίηση της διαδικασίας στη δημιουργία του διαγράμματος H-R, επειδή όλα τα άστρα του σμήνους βρίσκονται στην ίδια περιοχή του γαλαξία και στην ίδια περίπου απόσταση από τη Γη:
 - Μπορούμε στον άξονα Y να χρησιμοποιήσουμε τα φαινόμενα μεγέθη αντί των απολύτων ή της Φωτεινότητας L.
 - Θα μπορούσαμε να αγνοήσουμε την ερύθρωση λόγω μεσοαστρικής απορρόφησης, με δεδομένο την κοινή τους θέση και το ότι η πλειοψηφία των άστρων του σμήνους είναι παραπλήσιου φασματικού τύπου (B και A). Εξάλλου, η επιλογή του συγκεκριμένου σμήνους έγινε με αυτά τα κριτήρια, για την απλοποίηση μιας διαδικασίας που θα μπορούσε να είναι πολύ πιο επίπονη. Οι απλουστεύσεις αυτές δεν αναμένεται να μεταβάλουν τη μορφή του H-R, παρά μόνο τη σχετική θέση της ευθείας της Κύριας Ακολουθίας ως προς τους άξονες. Περιμένουμε δηλ. για τα σημεία του H-R, ίσες μετατοπίσεις προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτό ισχύει επίσης αν δεν χρησιμοποιήσουμε κάποιο άστρο αναφοράς γνωστού φαινόμενου μεγέθους, για τη βαθμονόμηση των αντίστοιχων μεγεθών των άστρων του σμήνους, αλλά κάνουμε χρήση των φωτογραφικών μεγεθών από τις σχέσεις στο τέλος της σελίδας.

Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Έχοντας δημιουργήσει τον πίνακα τιμών της έντασης ακτινοβολίας για τα άστρα του σμήνους με το SalsaJ, μπορούμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα με τη χρήση του Excel, ή και με το χέρι. Για βέλτιστα αποτελέσματα, καλό θα ήταν να αναλύσουμε από 40 ως 50 άστρα.

Μεταφέρουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πίνακα της παρακάτω μορφής.

Άστρο	Ένταση B	Ένταση V	m_B	m_V	B-V
1					
2					
3					

Οι στήλες Ένταση B και Ένταση V θα έχουν τις τιμές έντασης που μετρήσαμε στο SalsaJ, ενώ τα φαινόμενα μεγέθη m_B και m_V υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

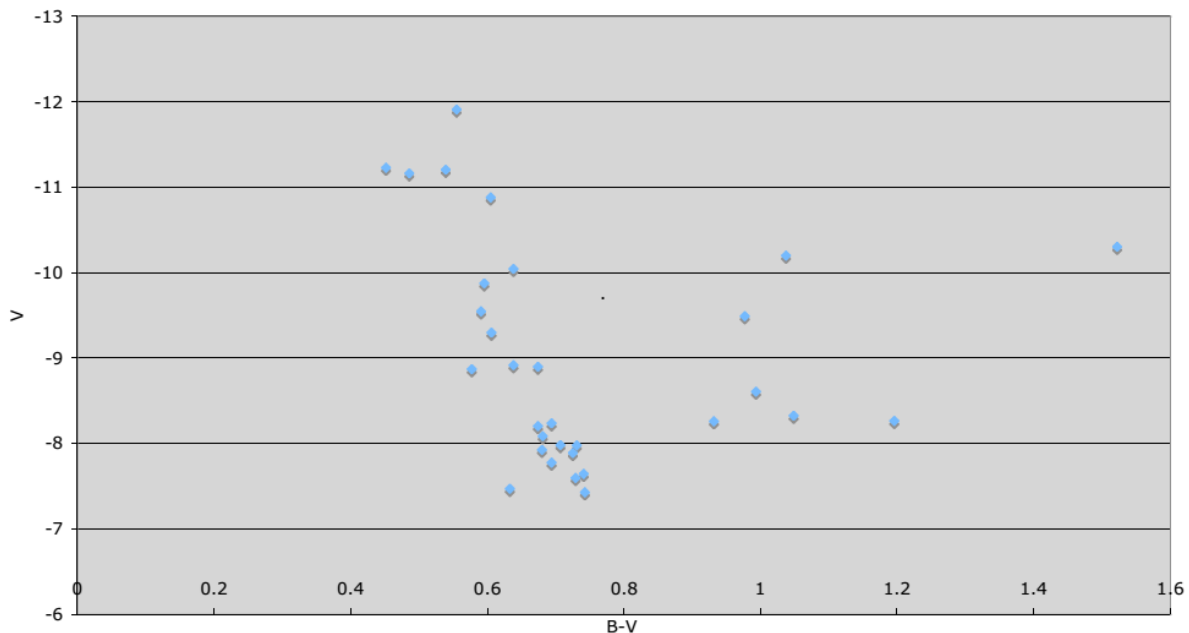
$$m_B = -2,5 \cdot \log(\text{Ένταση B} / \text{χρόνος έκθεσης})$$

$$m_V = -2,5 \cdot \log(\text{Ένταση V} / \text{χρόνος έκθεσης})$$

Έτσι για παράδειγμα, το μέγεθος m_B ενός άστρου με ένταση 8128,59 όπως μετρήθηκε στο SalsaJ από μία έκθεση διάρκειας 10s σε αρχείο FITS, θα δώσει: $m_B = -2,5 \cdot \log(8128,59/10) = -2,5 \cdot \log(812,859) = -7,275$. Στην τελευταία στήλη βάζουμε τα αποτελέσματα της διαφοράς $m_B - m_V$, που στην ουσία αντιπροσωπεύει το

“χρώμα” του άστρου. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, όσο μεγαλύτερη η διαφορά B-V, τόσο πιο κόκκινο το άστρο, ενώ όσο μικρότερη, τόσο πιο μπλε.

Για το διάγραμμα H-R, τοποθετούμε στον άξονα Y τις τιμές V (m_V) σε φθίνουσα αριθμητική διάταξη ώστε τα πιο λαμπρά άστρα να βρίσκονται προς την κορυφή του διαγράμματος, και στον X άξονα τις τιμές B-V. Ένα παράδειγμα για ένα άλλο σμήνος, το NGC 957, φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Ερμηνεία Συμπέρασμα και Αξιολόγηση

Έχοντας δημιουργήσει το διάγραμμα, ας προσπαθήσουμε να το ερμηνεύσουμε.

Έχει την αναμενόμενη μορφή; Πόσο διαφέρουν οι τύποι των άστρων μας;

Τι μπορείτε να συμπεράνουμε από την κατανομή για την ηλικία τους και το μέλλον τους;

Ποια από αυτά θα ακολουθήσουν τον κλάδο των γιγάντων και ποια θα καταλήξουν σε λευκούς νάνους;

Οι λευκοί νάνοι θα πρέπει να απουσιάζουν από το διάγραμμα. Γιατί είναι αναμενόμενο;

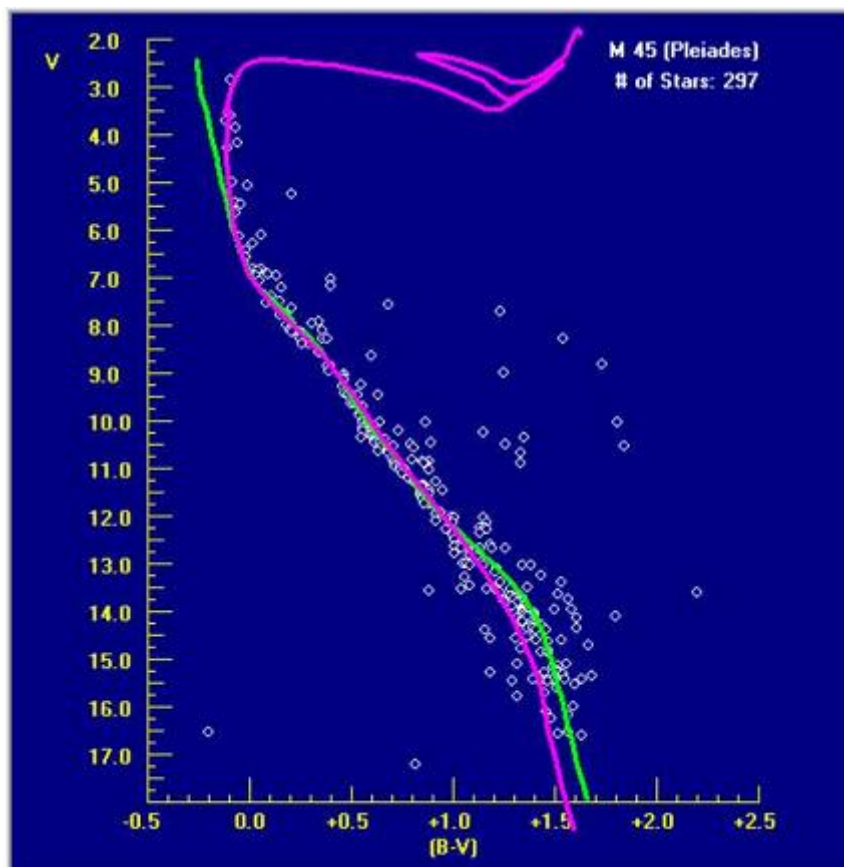
Ο Ήλιος μας έχει φασματικό τύπο G2 με $(B-V) = 0,65$. Έχουμε τέτοια άστρα στην κατανομή μας;

Αντιλαμβανόμαστε όλοι νομίζω την σπουδαιότητα ενός τέτοιου διαγράμματος.

Στη διαδικασία της κατασκευής του, μάθαμε:

- Τα βασικά στάδια της ζωής των άστρων
- Τη σημασία της ανάλυσης του φωτός στην αστροφυσική
- Την επιστημονική μέθοδο πίσω από τις μετρήσεις και τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιούμε προσεγγίσεις ή απλουστεύσεις.
- Το πώς οι μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα ή ακόμα και προβλέψεις για γεγονότα και φαινόμενα που ξεπερνούν κατά πολύ την ιστορική διαδρομή της ζωής στον πλανήτη μας.

Τελειώνοντας, αυτό που συμβολικά θα μπορούσατε να κάνετε είναι να αναζητήσετε όσες περισσότερες πληροφορίες μπορείτε για τα 7 από τα 9 λαμπρότερα άστρα των Πλειάδων, τη **Μαία**, την **Ταϋγέτη**, την **Ηλέκτρα**, την **Στερόπη**, την **Κελαινώ**, την **Αλκυόνη** και τη **Μερόπη**, και γνωρίζοντας μέσα από τη δουλειά σας το παρόν και το μέλλον αυτών των 7 αδελφών, να τις υιοθετήσετε. Να γίνουν τα κορίτσια σας, να τις δείχνετε στον ουρανό και να τις καμαρώνετε...



Εικόνα 10 H-R πλειάδων

Βιβλιογραφία:

- Ξενοφών Δ. Μουσάς: Εισαγωγή στην Αστροφυσική
- Νικόλαος Στεργιούλας: Χαρακτηριστικά Μεγάθη Αστέρων
- Daniel Duggan & Sarah Roberts: P h o t o m e t r y o f s t a r c l u s t e r s w i t h S a l s a J
- Οδηγός της AAVSO για τη φωτομετρία με CCD
- Photometry with SalsaJ: Faulkes Telescopes
- Frank Shu: Astrophysics vol. 1
- Alice Perry : The Hertzsprung-Russell Diagram Help Sheet, University of Birmingham
- Photoelectric Photometry of the Pleiades: Department of Physics Gettysburg College
- Colour - Magnitude Diagram for M 45: Australia Telescope National Facility
- Erik Brogt: University of Canterbury Pedagogical and curricular thinking of professional astronomers teaching the Hertzsprung-Russell diagram in introductory astronomy courses for nonscience majors
- https://en.wikipedia.org/wiki/UBV_photometric_system
- https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l4_p4.html
- https://en.wikipedia.org/wiki/Color_index
- «Αστροφυσική Ι», Χρ. Γούδη, Καθηγητή Παν/μίου Πατρών
- «Περί αστέρων και συμπάντων», Β. Ξανθόπουλου
- «Λεξικό Αστρονομίας», Κ. Δ. Μαυρομμάτη
- <http://www.physics4u.gr/>
- Παναγιώτης Αντωνόπουλος: Το διάγραμμα H-R

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΣΤΕΡΩΝ ΤΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ M45

Star	RA hr min sec	Dec deg min sec	U	B	V	B-V
1	3 41 05	24 05 11				
2	3 42 15	24 19 57				
3	3 42 33	24 18 55				
4	3 42 41	24 28 22				
5	3 43 08	24 42 47				
6	3 43 08	25 00 46				
7	3 43 39	23 28 58				
8	3 43 42	23 20 34				
9	3 43 56	23 25 46				
10	3 44 03	24 25 54				
11	3 44 11	24 07 23				
12	3 44 19	24 14 16				
13	3 44 27	23 57 57				
14	3 44 39	23 27 17				
15	3 44 39	24 34 47				
16	3 44 45	23 24 52				
17	3 45 09	24 50 59				
18	3 45 27	23 17 57				
19	3 45 28	23 53 41				
20	3 45 33	24 12 59				
21	3 46 26	23 41 11				
22	3 46 26	23 49 58				
23	3 46 57	24 04 51				
24	3 47 29	24 20 34				

ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΕΡΩΝ

Κύρια Ακολουθία (V)

Φασματικός Τύπος	Θερμοκρασία (K)	Απόλυτο Μέγεθος	Φωτεινότητα (σε ηλιακές)
O5	54,000	-10.0	846,000
O6	45,000	-8.8	275,000
O7	43,300	-8.6	220,000
O8	40,600	-8.2	150,000
O9	37,800	-7.7	95,000
B0	29,200	-6.0	20,000
B1	23,000	-4.4	4600
B2	21,000	-3.8	2600
B3	17,600	-2.6	900
B5	15,200	-1.6	360
B6	14,300	-1.2	250
B7	13,500	-0.84	175
B8	12,300	-0.23	100
B9	11,400	0.29	62
A0	9600	1.4	22
A1	9330	1.6	18
A2	9040	1.8	15
A3	8750	2.1	12
A4	8480	2.3	10
A5	8310	2.4	9.0
A7	7920	2.7	6.7
F0	7350	3.2	4.3
F2	7050	3.5	3.3
F3	6850	3.7	2.8
F5	6700	3.8	2.4
F6	6550	4.0	2.1
F7	6400	4.1	1.8
F8	6300	4.2	1.7
G0	6050	4.5	1.3
G1	5930	4.6	1.2
G2	5800	4.8	1
G5	5660	4.9	0.86
G8	5440	5.2	0.68
K0	5240	5.4	0.54
K1	5110	5.6	0.46
K2	4960	5.8	0.38
K3	4800	6.0	0.31

K4	4600	6.3	0.24
K5	4400	6.6	0.19
K7	4000	7.3	0.10
M0	3750	7.7	0.069
M1	3700	7.8	0.064
M2	3600	7.9	0.054
M3	3500	8.1	0.046
M4	3400	8.3	0.038
M5	3200	8.7	0.026
M6	3100	8.9	0.022
M7	2900	9.4	0.014
M8	2700	9.9	0.0093

Γίγαντες

Φασματικός Τύπος	Θερμοκρασία (K)	Απόλυτο Μέγεθος	Φωτεινότητα (σε ηλιακές)
G5	5010	0.7	127
G8	4870	0.6	113
K0	4720	0.5	96
K1	4580	0.4	82
K2	4460	0.2	70
K3	4210	0.1	58
K4	4010	0.0	45
K5	3780	-0.2	32
M0	3660	-0.4	15
M1	3600	-0.5	13
M2	3500	-0.6	11
M3	3300	-0.7	9.5
M4	3100	-0.75	7.4
M5	2950	-0.8	5.1
M6	2800	-0.9	3.3

Υπεργίγαντες

Φασματικός Τύπος	Θερμοκρασία (Κ)	Απόλυτο Μέγεθος	Φωτεινότητα (σε ηλιακές)
B0	21,000	-6.4	320,000
B1	16,000	-6.4	280,000
B2	14,000	-6.4	220,000
B3	12,800	-6.3	180,000
B5	11,500	-6.3	140,000
B6	11,000	-6.3	98,000
B7	10,500	-6.3	82,000
B8	10,000	-6.2	73,000
B9	9700	-6.2	61,000
A0	9400	-6.2	50,600
A1	9100	-6.2	44,000
A2	8900	-6.2	40,000
A5	8300	-6.1	36,000
F0	7500	-6	20,000
F2	7200	-6	18,000
F5	6800	-5.9	16,000
F8	6150	-5.9	12,000
G0	5800	-5.9	9600
G2	5500	-5.8	9500
G5	5100	-5.8	9800
G8	5050	-5.7	11,000
K0	4900	-5.7	12,000
K1	4700	-5.6	13,500
K2	4500	-5.6	15,200
K3	4300	-5.6	17,000
K4	4100	-5.5	18,300
K5	3750	-5.5	20,000
M0	3660	-5.3	50,600
M1	3600	-5.3	52,000
M2	3500	-5.3	53,000
M3	3300	-5.3	54,000
M4	3100	-5.2	56,000
M5	2950	-5.2	58,000