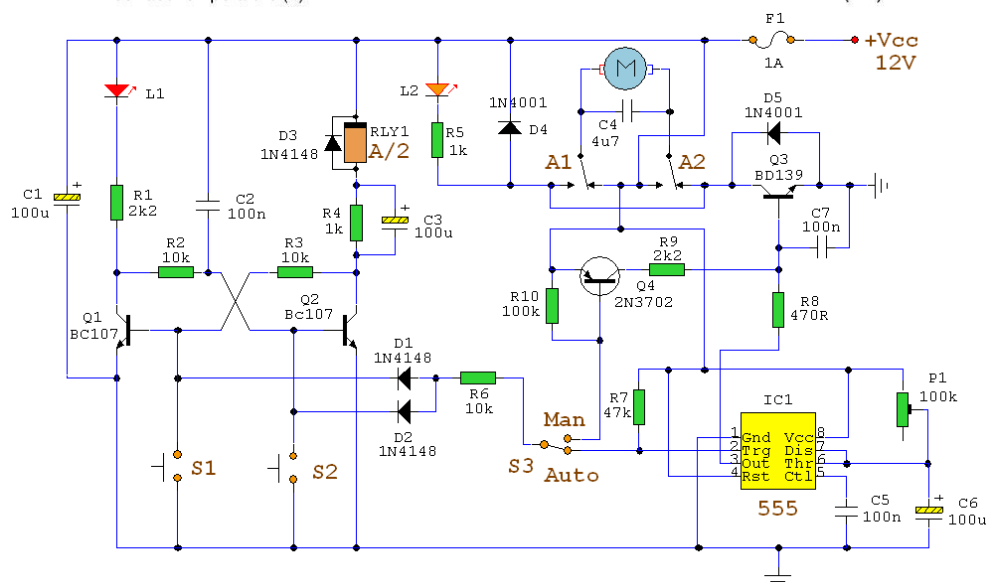
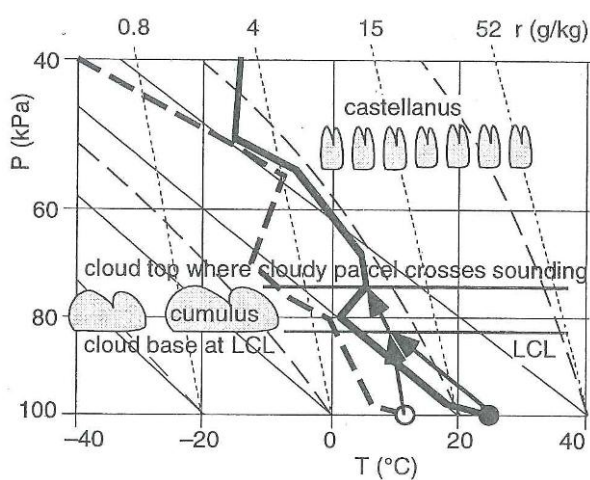
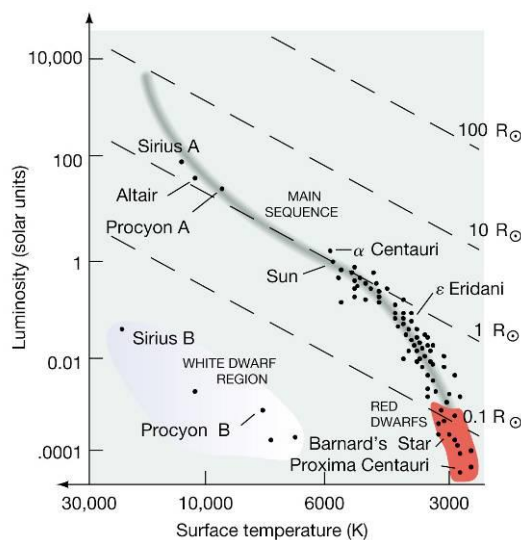




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΟΡΜΟΥ Ι

Αστροφυσική-Ηλεκτρονική-Περιβάλλον



ΑΘΗΝΑ 2013

Την ευθύνη συντονισμού των επί μέρους εργαστηριακών ασκήσεων έχουν: Νικόλαος Καλτσουνίδης (για το Περιβάλλον), Έκτωρ Νισταζάκης (για την Ηλεκτρονική), Δέσποινα Χατζηδημητρίου (για την Αστροφυσική).

Επιμέλεια έκδοσης στις ασκήσεις Αστροφυσικής: Δέσποινα Χατζηδημητρίου, Κοσμάς Γαζέας. Τμήματα των ασκήσεων Αστροφυσικής περιλαμβάνονται σε παλαιότερους εργαστηριακούς οδηγούς του τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής (AAM), με συγγραφείς τους: Θεοχάρης Αποστολάτος, Μάνος Δανέζης, Ιωάννης Δεληγιάννης, Στράτος Θεοδοσίου, Μαρία Κοντιζά, Α. Μαστιχιάδης, Ξενοφών Μουσάς, Παναγιώτης Νιάρχος, Κανάρης Τσίγκανος, Δ. Παπαθανάσογλου, Παναγιώτα Πρέκα- Παπαδήμα, Μ. Σταθοπούλου. Όλα τα μέλη του τομέα Αστρονομίας, Αστροφυσικής και Μηχανικής ΑΜ συμμετείχαν στην τελική διαμόρφωση των ασκήσεων.

Επιμέλεια φυλλαδίου: Ανδρέας Καραμπαρμπούνης και Νεκτάριος Μαμαλούγκος

Περιεχόμενα

Ασφάλεια στο Εργαστήριο Φυσικής	4
A1. Η ακτινοβολία των αστερών. Ήλιος, Ηλιακή σταθερά, Ηλιακό φάσμα.....	7
A2. Μέτρηση βασικών φυσικών μεγεθών αστερών. Άμεση μέτρηση μαζών και ακτίνων αστερών διπλών εκλειπτικών συστημάτων	4
A3. Αστρική εξέλιξη, Μέτρηση ηλικιών. Διάγραμμα Hertzsprung-Russell, Αστρικά Σμήνη.....	13
A4. Η διαστολή του Σύμπαντος. Μέτρηση της σταθεράς του Hubble	24
H1. Εισαγωγικές έννοιες - Απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα και ηλεκτρικές μετρήσεις	31
H2. Μελέτη Τελεστικών Ενισχυτών	44
Παραρτήματα.....	57

Ασφάλεια στο Εργαστήριο Φυσικής

Σε κάθε Εργαστηριακό χώρο ισχύουν μερικοί απλοί και αποτελεσματικοί κανόνες που σκοπό έχουν την αποφυγή ατυχημάτων ή τις φθορές εξοπλισμού και την παροχή βοήθειας σε περίπτωση ανάγκης.

Επισημαίνουμε ότι οι κύριοι κίνδυνοι στο Βασικό Εργαστήριο ΦΥΣΙΚΗΣ I, II, III και IV, πηγάζουν από την **φωτιά, τον ηλεκτρισμό** και την **χρήση ειδικών υλικών**. Σε κάθε περίπτωση οι Επιβλέποντες και το προσωπικό του Εργαστηρίου θα σας βοηθήσουν όπου χρειαστεί.

Η δομή των χώρων του Εργαστηρίου είναι απλή· υπάρχουν δύο έξοδοι στα αντίστοιχα δύο άκρα του διαδρόμου του εργαστηρίου. **Αν χρειασθεί να γίνει εκκένωση των χώρων κινούμαστε αντίστοιχα προς την κατάλληλη ασφαλή έξοδο.**

Ασθένεια - ατύχημα

Είναι δυνατόν κάποιος από εσάς να αρρωστήσει και να αισθανθεί άσχημα ή ακόμα και να πάθει ένα μικρό ατύχημα κλπ.. Ανάλογα με την περίπτωση η βοήθεια από τον Επιβλέποντα, η μεταφορά στο Ιατρείο της Πανεπιστημιούπολης (Τηλ. **210 7277873**) ή η κλήση ασθενοφόρου στο 166 (**διευκρινίζοντας που ακριβώς ευρίσκεται το άτομο**), είναι κάτι που πρέπει να σταθμιστεί άμεσα και ανάλογα.

Η συνδρομή του ίδιου του ασθενούς με πληροφόρηση, ειδοποίηση οικείου προσώπου αν χρειαστεί ή πληροφόρηση από φίλου/ης είναι επίσης ουσιαστική για την γρηγορότερη ανακούφιση του.

Επίσης, έξω από το Γραφείο των Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Εργαστηρίου (Παρασκευαστήριο) υπάρχει ένα μικρό φαρμακείο εξοπλισμένο με τα βασικά για την παροχή πρώτων βοηθειών.

<http://www.redcross.gr>

Ηλεκτρισμός

Στα κυκλώματα των ασκήσεων του Εργαστηρίου χρησιμοποιούνται χαμηλές τάσεις. Παρόλο που ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας είναι σαφώς μικρότερος του αντίστοιχου που έχουμε στο σπίτι μας, είναι απαραίτητη η προσοχή μας ιδίως στην σύνδεση οργάνων στο δίκτυο. Ποτέ δεν βάζουμε στη πρίζα ένα κύκλωμα πριν ο Επιβλέπων το ελέγξει. **Ποτέ δεν βάζουμε στη πρίζα ένα κύκλωμα πριν ο Επιβλέπων το ελέγξει!**

Σε περίπτωση ηλεκτροπληξίας θα πρέπει πρώτα να αποκόπτεται το ρεύμα από τους ασφαλειοδιακόπτες που είναι κατανεμημένοι κοντά στις παροχές· αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε **πρέπει να απομακρύνεται το άτομο με κατάλληλο μονωτικό υλικό (π.χ. ένα στεγνό ρούχο)**. Ο χρόνος εδώ είναι βασικό στοιχείο. Άμεσα θα πρέπει να γίνει κλήση για ασθενοφόρο στο 166 περιγράφοντας το τι έχει συμβεί και **που ακριβώς ευρίσκεται το άτομο**. Η **επαγγελματική** γνώση τεχνητής αναπνοής μπορεί σε κάποια σοβαρή περίπτωση να σώσει ζωή.

http://www.electronics-lab.com/articles/files/electric_shock.pdf

Ραδιενέργεια

Χρήση ραδιενεργών πηγών: Η χρήση των ειδικών στην εκπαίδευση ραδιενεργών πηγών γίνεται με τις κατάλληλες οδηγίες του Διδάσκοντα. Θα τις χρησιμοποιήσετε στο Εργαστήριο Φυσικής II και αργότερα στο Εργαστήριο της Πυρηνικής Φυσικής. Στα Εργαστήρια Φυσικής ο φοιτητής πρέπει να υπογράψει σε κατάλληλο φύλλο την παραλαβή και μετά την χρήση, αντίστοιχα για την επιστροφή της πηγής στο Παρασκευαστήριο.

Οι πηγές αυτές είναι ασφαλείς. Ωστόσο δεν πρέπει να τις χειριζόμαστε χωρίς λόγο, να κοιτάζουμε από κοντά την έξοδο των σωματιδίων ή να τις τοποθετούμε έτσι ώστε τα σωματίδια να κατευθύνονται σε μάς ή στους συμφοιτητές μας. **Ποτέ** δεν τις κρατούμε με τα δάχτυλα στο «παράθυρο» της πηγής. Σε περίπτωση που δείτε ότι το ειδικό προστατευτικό παράθυρο είναι χαραγμένο ή σπασμένο να το αναφέρετε αμέσως στον Επιβλέποντα. Αστειότητες με τις ραδιενεργές πηγές συνεπάγεται άμεση διαγραφή από το Εργαστήριο.

<http://www.eeae.gr>

Ακτινοβολίες Laser

Χρήση συσκευών παραγωγής Laser: Οι συσκευές παραγωγής ακτινών Laser χρησιμοποιούνται στα νέα Εργαστήρια Φυσικής II, III και IV. **Απαγορεύεται** να κατευθύνουμε την δέσμη τους στα μάτια μας είτε στα μάτια κάποιου συνάδελφου. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ώστε να μη συμβεί αυτό και από ισχυρή ανάκλαση της δέσμης από ιδιαίτερα στιλπνή επιφάνεια ή καθρέπτη. Ο Επιβλέπων θα σας δώσει οδηγίες για την ασφαλή χρήση του laser του πειράματός σας.

http://www.osha.gov/SLTC/etools/eyeandface/ppel/laser_safety.html

Υλικά

Χρήση υγρού άζωτου: Το υγρό άζωτο (LN_2) βρίσκεται (σε ατμοσφαιρική πίεση) σε θερμοκρασία -196°C !! Διατηρείται και μεταφέρεται μέσα σε ειδικά θερμομονωτικά δοχεία (δοχεία Dewar – παρόμοια με τα γνωστά μας "θερμός"). **Κατά την διαδικασία ενός πειράματος με υγρό άζωτο ακολουθείτε τις οδηγίες του** Επιβλέποντα **αποφεύγοντας απότομες κινήσεις που θα οδηγούσαν στο να χυθεί ποσότητα LN_2 πάνω σας.** Η δράση του αν πέσει μεγάλη ποσότητα πάνω σας είναι σαν να έχετε πάθει ένα έγκαυμα. Στα ρούχα επιφέρει μερική καταστροφή. Αν από ατύχημα πάθετε έγκαυμα θα πρέπει να ειδοποιηθεί το 166 (διευκρινίζοντας που ακριβώς βρίσκεται το άτομο) Ασθενοφόρο για την παροχή επαγγελματικής και υπεύθυνης βοήθειας.

<http://www.matheson-trigas.com/msds/00202589.pdf>

Πυρκαγιά

Να θυμάστε ότι για να έχουμε φωτιά, χρειάζεται να συνυπάρχουν 3 προϋποθέσεις **(α) το κατάλληλο εύφλεκτο υλικό (β) το οξυγόνο και (γ) η υψηλή θερμοκρασία.** Όταν έστω και ένας από τους παραπάνω 3 παράγοντες δεν υπάρχει τότε δεν έχουμε φωτιά. Ειδικά πρέπει να προσέχουμε τα εύφλεκτα υλικά (π.χ. οινόπνευμα). Φυσικά οι δύο πρώτοι παράγοντες πάντα υπάρχουν, άρα ο τρίτος είναι ο κύριος κίνδυνος ώστε να εκδηλωθεί φωτιά στο εργαστήριο.

Αν απομακρύνουμε έναν από τους τρεις αυτούς παράγοντες τότε η φωτιά θα σβήσει. Στο χώρο του Εργαστηρίου, λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού ρεύματος, απομακρύνουμε το οξυγόνο από την φωτιά με την χρήση των ειδικών πυροσβεστήρων. Υπάρχουν πολλοί πυροσβεστήρες κατάλληλου τύπου (CO_2) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος.

Να θυμάστε ότι το πυροσβεστικό υλικό για να έχει αποτελεσματικότητα θα πρέπει να κατευθύνεται στη βάση της φωτιάς (όπου γίνεται η καύση του υλικού) και ότι ο χρόνος εκροής από ένα πυροσβεστήρα είναι ~30- 40 δευτερόλεπτα **μόνο!**

Ακόμη μία καλά βρεγμένη (προσοχή να μην χρησιμοποιείται τίποτα το βρεγμένο αν η φωτιά είναι συνδυασμένη με υπό τάση συσκευή) πετσέτα ή ρούχο αποτελούν έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο κατάσβεσης πυρκαγιάς σε αρχικό στάδιο.

Να θυμάστε επίσης ότι **ο χρόνος** είναι ουσιαστικό στοιχείο της αντιμετώπισης μιας πυρκαγιάς. Οι πυροσβέστες, για να τονίσουν το θέμα της άμεσης αντίδρασης σε περίπτωση φωτιάς, αναφέρουνε μισοσοβαρά – μισοαστεία ότι «το πρώτο λεπτό η φωτιά σβήνει με ...ένα ποτήρι νερό, το 5' με πυροσβεστήρα και μετά από 15-20 λεπτά μόνο με παρέμβασή τους!». Προφανώς

άμεση πρέπει να είναι, εφόσον απαιτείται, και η κλήση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας στο 199, προσδιορίζοντας με ακρίβεια τόπο και ειδικές συνθήκες / υλικά στο χώρο της φωτιάς.

<http://www.fireservice.gr>

Σεισμός

Ισχύουν οι γενικές οδηγίες του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας προς τον πληθυσμό. Την ώρα του σεισμού καλυφθείτε αμέσως κάτω από μία εργαστηριακή έδρα (πάγκο) και απομακρυνθείτε από τζαμαρίες και βαριές οργανοθήκες. Μη τρέξετε προς την έξοδο. Μετά το πέρας του σεισμού, αν χρειάζεται, εξέρχεστε χωρίς πανικό από το κτίριο και αν υπάρχει ανάγκη βοήθειας προς άλλα άτομα, προσπαθείτε να την προσφέρετε στο μέτρο του δυνατού. Καλέστε ασθενοφόρο, εφόσον απαιτείται. Καταφύγετε στην συνέχεια σε ανοικτό ασφαλή χώρο, είτε προς την πλευρά του Κοιμητηρίου Ζωγράφου, είτε προς το ανοικτό μέρος της Φιλοσοφικής Σχολής, είτε προς τον ανοικτό χώρο σταθμεύσεως της Σχολής Θετικών Επιστημών.

<http://www.oasp.gr/defaultflash.htm>

Ιοί - Γρίπη

Οδηγίες σχετικά με την κοινή γρίπη:

http://www.keel.org.gr/keelpno/2009/id994/afisa_mv.pdf

ΠΡΟΣΟΧΗ: Προστατεύστε τον εαυτό σας και τους γύρω σας από την γρίπη. Μη διασπείρετε τα μικρόβια: Καλύψτε το στόμα και την μύτη σας με χαρτομάντιλο, όταν βήχετε ή φταρνίζεστε. Πετάξτε αμέσως το χαρτομάντιλο στο καλάθι των απορριμμάτων. Αν δεν έχετε χαρτομάντιλο; Φταρνιστείτε στον αγκώνα σας και όχι στα χέρια σας. Πλύνετε τα χέρια σας με σαπούνι και νερό ή χρησιμοποιήστε αλκοολούχο αντισηπτικό διάλυμα. Μην αγγίζετε τα μάτια, την μύτη και το στόμα σας.

Υπουργείο Υγείας & Κοινωνικής Αλληλεγγύης, Κέντρο Ελέγχου & Πρόληψης Νοσημάτων (ΚΕ.ΕΛ.Π.ΝΟ.) <http://www.keel.org.gr>

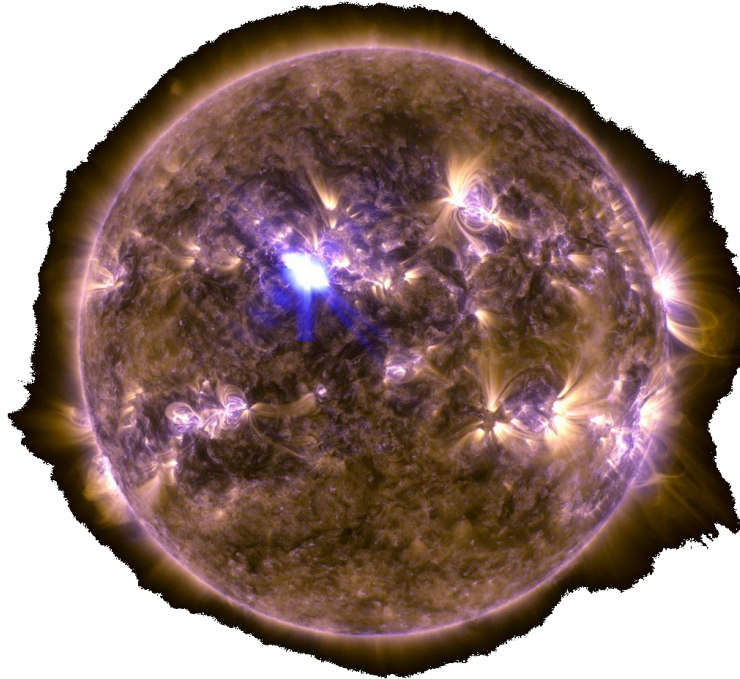
Πληροφορίες για την νέα γρίπη Α (H1N1) στον ιστοχώρο του Πανεπιστημίου Αθηνών: <http://www.uoa.gr/h1n1/> και στην τηλεφωνική γραμμή: 210-3689797

Ιός του Δυτικού Νείλου

Πληροφορίες κλπ. Για την λοίμωξη από τον ιό του Δυτικού Νείλου: Τι είναι, πώς μεταδίδεται, ποια τα συμπτώματα, ποια η θεραπεία, πώς αποφεύγεται η μόλυνση, στην διεύθυνση:

<http://news.in.gr/files/1/2010/WNV.pdf>

A1. Η ακτινοβολία των αστέρων. Ήλιος, Ηλιακή σταθερά, Ηλιακό φάσμα



Φωτογραφία του Ήλιου με το «Atmospheric Imaging Assembly» του «Solar Dynamics Observatory» (NASA Goddard Flight Center) <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>

Σκοπός της άσκησης

Ο κύριος σκοπός της άσκησης είναι:

- Η γνωριμία και κατανόηση βασικών στοιχείων της ακτινοβολίας των αστέρων και ειδικότερα της ακτινοβολίας του Ήλιου.
- Η γνωριμία με τον Ήλιο ως αστέρα. Κατασκευή της κατανομής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος. Σύγκριση με ακτινοβολία μέλανος σώματος. Υπολογισμός της ενεργού θερμοκρασίας του Ήλιου. Υπολογισμός της ηλιακής σταθεράς.
- Εισαγωγή στις έννοιες του αστρονομικού μεγέθους και στο φωτομετρικό σύστημα UBVRI. Εφαρμογή στον Ήλιο. Κατανόηση της έννοιας του δείκτη χρώματος, που επιτρέπει να εκτιμούμε την ενεργό θερμοκρασία ενός αστέρα.
- Εξοικείωση με την αστρονομική φασματοσκοπία. Ανάλυση ηλιακού φάσματος (βαθμονόμηση και αναγνώριση χαρακτηριστικών γραμμών απορρόφησης).
- Εισαγωγή στην έννοια του φασματικού τύπου αστέρα.. Φασματική ταξινόμηση.

Βασικά στοιχεία θεωρίας

Αστρική ακτινοβολία - Βασικές αρχές και ορισμοί

Ας θεωρήσουμε αστέρα ακτίνας R και σε απόσταση r από τη Γη. Από την επιφάνεια του αστέρα σε χρόνο t εκπέμπεται προς όλες τις διευθύνσεις και σε όλες τις συχνότητες ολική ενέργεια E . Η ποσότητα $L=E/t$ (σε W , ή σε ηλιακές μονάδες $L_{\odot} = 3.84 \times 10^{33} \text{ ergs}^{-1}$) ονομάζεται **φωτεινότητα** (luminosity) του αστέρα, και είναι μια ποσότητα ανεξάρτητη της απόστασής του από τη Γη.

Η ενέργεια που διέρχεται από μια μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση της οπτικής ακτίνας αστέρα-παρατηρητή, στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, προς κάθε κατεύθυνση, στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται **ροή ακτινοβολίας** (flux).

Φαινόμενη λαμπρότητα (ή απλώς λαμπρότητα) του αστέρα σε απόσταση r από το κέντρο του είναι η ροή ακτινοβολίας του αστέρα στη μονάδα της επιφάνειας σε απόσταση r , δηλ.

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

Αν θέσουμε $r=R$ (R η ακτίνα του αστέρα), τότε παίρνουμε την **επιφανειακή λαμπρότητα** του

$$\text{αστέρα } F_o = \frac{L}{4\pi R^2}.$$

Από τους ορισμούς προκύπτει ότι $\frac{F_r}{F_o} = \frac{R^2}{r^2} \Rightarrow F_r = F_o \frac{R^2}{r^2}$, που είναι η ροή της ακτινοβολίας

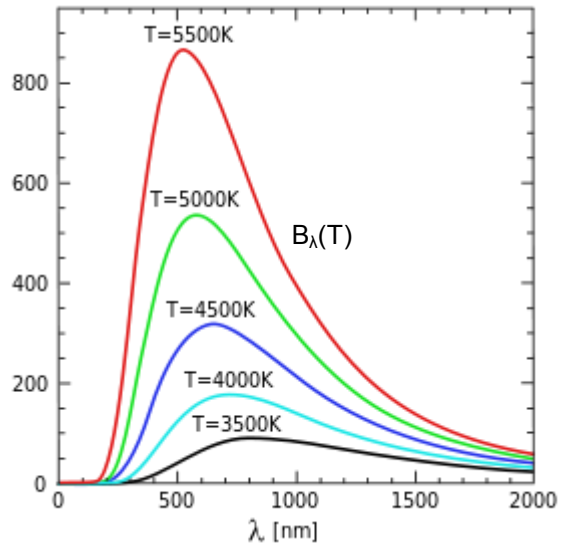
που φτάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας (αγνοώντας την μεσοαστρική απορρόφηση).

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να αναφέρονται σε μία μόνο συχνότητα (ή μήκος κύματος), οπότε λαμβάνουν τον προσδιορισμό «μονοχρωματική» και τον δείκτη ν (ή λ) στο αντίστοιχο σύμβολο.

Οποιοδήποτε σώμα που έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία T και βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το δικό του πεδίο ακτινοβολίας (που στην ουσία απαιτεί το σώμα να είναι επαρκώς αδιαφανές) εκπέμπει φωτόνια με φασματική κατανομή που δίνεται από τον νόμο του Planck (βλ. πίνακα 1.1, σχ. 1.1) και ονομάζεται μέλαν σώμα.

Οι αστέρες σε πρώτη προσέγγιση μπορούν να θεωρηθούν μέλανα σώματα. Αυτό οφείλεται στο ότι το εσωτερικό του αστέρα είναι σχεδόν αδιαφανές στο πεδίο ακτινοβολίας του.¹

Η **ενεργός θερμοκρασία** ενός αστέρα φωτεινότητας L και ακτίνας R είναι η θερμοκρασία επιφάνειας που θα είχε αν ήταν



Σχ. 1.1. Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες. Γραφική αναπαράσταση του νόμου του Planck (ο ορισμός του $B_{\lambda}(T)$ φαίνεται στον πίνακα 1.1)

¹ Το συνεχές φάσμα μέλανος σώματος δίνει μόνο πληροφορία για την θερμοκρασία του εκπέμποντος σώματος και όχι για την σύστασή του.

τέλειο μέλαν σώμα, δηλ. $T_{eff} = \sqrt[4]{\frac{L}{\sigma 4\pi R^2}}$.

Βέβαια η θερμοκρασία του αστέρα δεν διατηρείται στην πραγματικότητα σταθερή σε όλο του τον όγκο. Οπωσδήποτε (αναμενόμενο εξάλλου από τη θερμοδυναμική) τα εξωτερικά στρώματα πρέπει να είναι ψυχρότερα, αραιότερα και πιο διαφανή στην φωτεινή ακτινοβολία. Η εξωτερική στιβάδα του αστέρα, από όπου είναι δυνατή η διαφυγή της ακτινοβολίας λέγεται **φωτόσφαιρα** και αποτελεί μια οριακή περιοχή μεταξύ του αδιαφανούς εσωτερικού του αστέρα και του μεσοαστρικού χώρου. Η στιβάδα εκείνη που αρχίζει από τη φωτόσφαιρα και φθάνει μέχρι τον μεσοαστρικό χώρο ονομάζεται **ατμόσφαιρα** του αστέρα. Η ακτινοβολία που φθάνει σε μας προέρχεται από την φωτόσφαιρα (συνεχές φάσμα μελανού σώματος χαρακτηριστικής ενεργού θερμοκρασίας) και από τα υπερκείμενα στρώματα (ατμόσφαιρα), στα οποία με διαδικασίες απορρόφησης και σκέδασης δημιουργούνται οι **γραμμές απορρόφησης** στο συνεχές φάσμα (που εξαρτώνται και από την χημική σύσταση της ατμόσφαιρας), προκαλώντας αποκλίσεις από την ακτινοβολία μέλανος σώματος, που μπορεί να είναι αρκετά σημαντικές σε κάποιες περιπτώσεις.

Πίνακας 1.1 Ακτινοβολία μέλανος σώματος - Τυπολόγιο

Συνάρτηση Planck: Ειδική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη μονάδα επιφάνειας μέλανος σώματος θερμοκρασίας T	$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (W \ m^{-2} Hz^{-1} sr^{-1})$ ή $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$ $h = 6.626 \times 10^{-34} \ Js$ (σταθερά του Planck) $c = 3 \times 10^8 \ m/s$ $k = 1.38 \times 10^{-23} \ J/K$ (σταθερά του Boltzmann)
Νόμος Stefan-Boltzmann Δίνει τη ροή της ολικής ακτινοβολούμενης ενέργειας μέλανος σώματος θερμοκρασίας T συναρτήσει της T. Στην αστροφυσική, δίνει την επιφανειακή φωτεινότητα του αστέρα	$F(T) = \sigma T^4$ $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} \quad (W \ m^{-2})$ (σ: σταθερά Stefan-Boltzmann)
Νόμος του Wien Η συνάρτηση του Planck έχει μέγιστο για $\lambda = \lambda_{max}$ που είναι αντιστρόφως ανάλογο της T	$\lambda_{max} T = hc / 5k = 2.8978 \times 10^{-3} m.K$
<i>Σημ. Από τον νόμο Stefan-Boltzmann προκύπτει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας μέλανος σώματος, αυξάνεται και η ροή της ολικής ακτινοβολούμενης ενέργειας. Από τον νόμο του Wien προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μέλανος σώματος τόσο το μέγιστο που παρουσιάζει η $B_\nu(T)$ μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος και άρα σε μεγαλύτερες συχνότητες.</i>	

Για να μελετήσουμε τη φύση ενός αστέρα χρειαζόμαστε τόσο τη συνολική ενέργεια που εκπέμπει η φωτόσφαιρά του στο χώρο, όσο και την κατανομή της ενέργειας αυτής συναρτήσει της συχνότητας της ακτινοβολίας (ή του μήκους κύματος). Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούμε για τον σκοπό αυτό είναι η **αστρονομική φωτομετρία** και η **αστρονομική φασματοσκοπία** τις οποίες θα συζητήσουμε στις επόμενες παραγράφους.

Ο Ήλιος

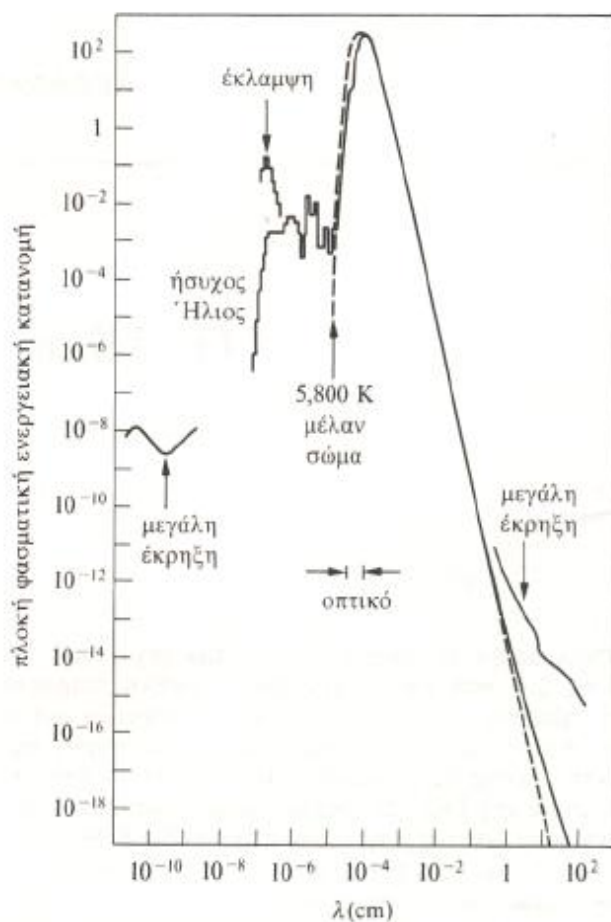
Ο Ήλιος είναι αστέρας της κύριας ακολουθίας, δηλ. η πηγή ενέργειάς του είναι η θερμοπυρηνική «καύση» υδρογόνου στον πυρήνα του (βλ. θεωρία 3^{ης} άσκησης για περισσότερες λεπτομέρειες).

Στον Πίνακα 1.2 δίνονται τα βασικά δεδομένα για τον Ήλιο (από Allen's Astrophysical Quantities, 4th edition, A. Cox editor, 2000).

Η ενέργεια που προσπίπτει κάθετα ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφάνειας ακριβώς έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα έχει μετρηθεί ότι είναι $f=1.36\text{kW/m}^2$ και ονομάζεται **ηλιακή σταθερά**.

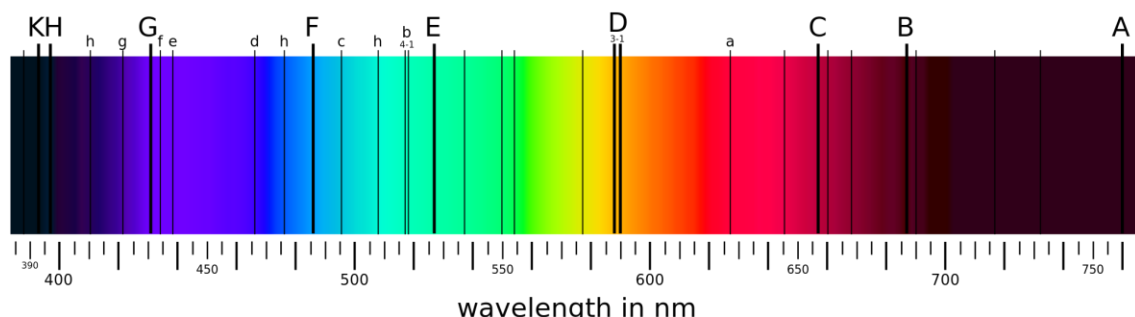
Η **ηλιακή φωτεινότητα** $L_{\odot}$ που είναι, σύμφωνα με τους ορισμούς της παραγράφου 1.2.1, το ολικό ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται από τον ήλιο ανά μονάδα χρόνου, μπορεί να υπολογιστεί από την ηλιακή σταθερά και την απόσταση r Γης-Ήλιου, $L_{\odot} = f \cdot 4\pi r^2$ (έχουμε υποθέσει ότι δεν υπάρχει ούτε απορρόφηση ούτε εκπομπή ακτινοβολίας στο μεσοπλανητικό χώρο μεταξύ Γης και Ήλιου).

Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας του ήλιου έχει **φασματική ενεργειακή κατανομή** που συμφωνεί με εκείνη μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800K. Η συμφωνία είναι πολύ καλή από το κοντινό υπεριώδες μέχρι το υπέρυθρο, ενώ εμφανίζονται αποκλίσεις στην περιοχή του σκληρού υπεριώδους, στις ακτίνες X αλλά και στα ραδιοκύματα (βλ. Σχ. 1.2), που σχετίζονται κυρίως με την ηλιακή δραστηριότητα (εκλάμψεις, μεγάλες εκρήξεις). Όμως, ακόμα και σε οπτικά μήκη κύματος, υπάρχουν ανιχνεύσιμες αποκλίσεις.



Σχ. 1.2. Η ηλιακή φασματική ενεργειακή κατανομή (σχ. 5.1 F.Shu, Αστροφυσική τομ.1, ΠΕΚ)

Σε φάσμα μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας (βλ. σχ. 1.3) εμφανίζονται σκοτεινές γραμμές απορρόφησης, που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα επιφανειακά (ατμοσφαιρικά) στρώματα του Ήλιου δεν βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το πεδίο ακτιβολίας τους: η ατμόσφαιρα του Ήλιου χαρακτηρίζεται από ψυχρότερες, χαμηλότερης πυκνότητας περιοχές, υπερκείμενες θερμών και πυκνών στρωμάτων.



Σχ. 1.3. Οπτικό φάσμα απορρόφησης του ήλιου, όπου φαίνονται χαρακτηριστικές σκοτεινές γραμμές απορρόφησης.

Πίνακας 1.2: Τα βασικά δεδομένα για τον Ήλιο

Ηλιακή ακτίνα	$R_{\odot} = 6.95508 \pm 0.00026 \times 10^8 m$
Ηλιακή μάζα	$M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} kg$
Μέση πυκνότητα	$\rho_{\odot} = 1.409 g / cm^3$
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής στον ισημερινό	$2.85 \times 10^{-6} rad / s$
Μέση απόσταση από την Γη	$1AU = 1.495979 \times 10^{11} m$
Ηλιακή σταθερά	$1.365-1.369 Wm^{-2}$
Ηλιακή φωτεινότητα (luminosity)	$L_{\odot} = 3.845 \times 10^{26} W$
Φαινόμενο μέγεθος	$V=-26.75, B=-26.10, U=-25.91$
Απόλυτο μέγεθος	$M_V=+4.82, M_B=+5.47, M_U=+5.66$
Δείκτες χρώματος	$B-V=+0.650, U-B=+0.195, V-R=+0.54$
Φασματικός τύπος	G2 V
Ηλικία	$(4.5-4.7) \times 10^9 yr$

Φωτομετρία – δείκτες χρώματος

Αστρονομική φωτομετρία είναι η τεχνική μέτρησης της «λαμπρότητας» αστρονομικών αντικειμένων.

Η ροή ακτινοβολίας που λαμβάνεται από ένα αστέρα συνήθως εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η αστρονομική φωτομετρία είναι πάντα συγκριτική. Η κλίμακα των αστρονομικών μεγεθών ορίζεται έτσι ώστε μια διαφορά 5 αστρικών «μεγεθών» μεταξύ δύο αστέρων να αντιστοιχεί σε ένα λόγο 100 των ροών ή των φαινομένων λαμπροτήτων τους. Έτσι, τα φαινόμενα μεγέθη δύο αστέρων, m_1 και m_2 με ροές F_1 και F_2 συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση $m_1 - m_2 = -2.5 \log(F_1 / F_2)$. Εξ ορισμού τα λαμπρότερα αντικείμενα έχουν μικρότερο μέγεθος.

Το **φαινόμενο μέγεθος** (m) δεν αποτελεί μια εγγενή ιδιότητα του αστέρα διότι προφανώς

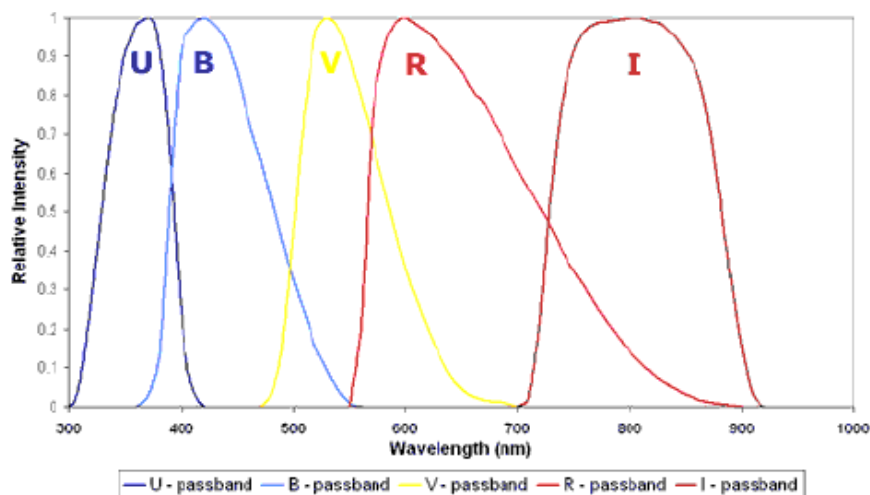
εξαρτάται τόσο από την απόσταση του αστέρα από την Γη, όσο και από το ποσό της μεσοαστρικής απορρόφησης μεταξύ αστέρα και παρατηρητή.

Το **απόλυτο μέγεθος** (M) ενός αστέρα αποτελεί εγγενή ιδιότητα του αστέρα και σχετίζεται με τη φωτεινότητά του. Το απόλυτο μέγεθος ορίζεται ως η τιμή που θα είχε το φαινόμενο μέγεθος του αστέρα αν αυτός βρισκόταν σε απόσταση 10pc από τη Γη.

Για δύο αστέρες με φωτεινότητες L_1 και L_2 , τα αντίστοιχα απόλυτα μεγέθη τους M_1 και M_2 σχετίζονται μεταξύ τους με τη σχέση $M_1 - M_2 = -2.5 \log(L_1 / L_2)$.

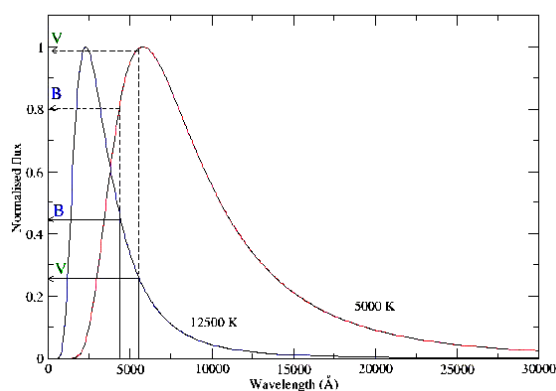
Μπορούμε να ορίσουμε φαινόμενα και απόλυτα μεγέθη σε οποιαδήποτε περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που λαμβάνονται με παρατήρηση μέσα από κατάλληλα φίλτρα.

Ένα σύστημα από τέτοια φίλτρα που χρησιμοποιούμε για να μελετήσουμε φωτομετρικά έναν αστέρα ορίζει ένα φωτομετρικό σύστημα, όπως είναι το ευρέως διαδεδομένο **φωτομετρικό σύστημα Johnson UBVRI** (U υπεριώδεις, B μπλέ, V ορατό, R κόκκινο, I κοντινό υπέρυθρο). Το σχήμα 1.4 δείχνει την απόκριση των φίλτρων αυτών.

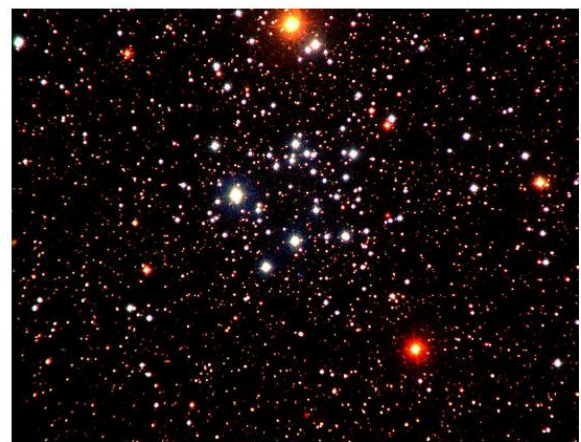


Σχ. 1.4. Κανονικοποιημένες καμπύλες απόκρισης των φωτομετρικών φίλτρων UBVRI (Photometry Passbands), που συναποτελούν το φωτομετρικό σύστημα **Johnson**.

Δείκτης χρώματος (colour index), CI , ενός αστέρα είναι η διαφορά μεταξύ δύο φαινομένων μεγεθών του m_{λ_1} και m_{λ_2} σε δυο φασματικές περιοχές αντίστοιχων κεντρικών μηκών κύματος λ_1 και λ_2 δηλ. $CI = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}$ με $\lambda_1 < \lambda_2$. Ο δείκτης χρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της ενεργού θερμοκρασίας ενός αστέρα. (βλ. σχ. 1.5).



Σχ. 1.5. (Κανονικοποιημένες) Καμπύλες μέλανος



Σχ. 1.6. Φωτογραφία του ανοικτού σμήνους M50

σώματος για θερμοκρασίες 12500K και 5000K. Σημειώνονται οι θέσεις των κεντρικών μηκών κύματος των φίλτρων B και V. Είναι φανερό ότι η αλγεβρική τιμή του B-V είναι μικρότερη για το ψυχρότερο σώμα.

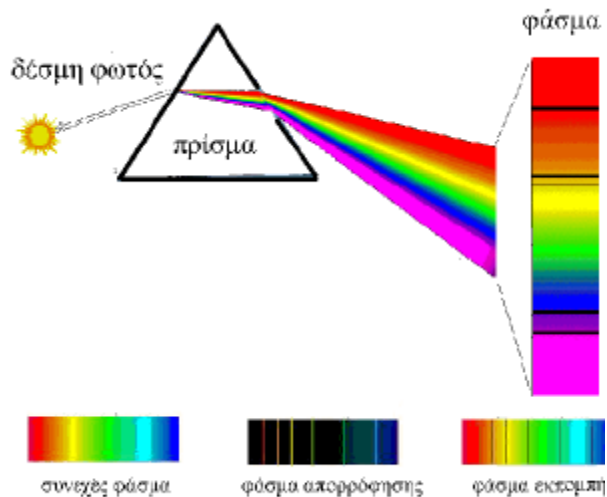
(credit & copyright S. Kohle, T. Credner et al.) όπου φαίνονται τα διαφορετικά χρώματα των αστέρων.

Αστρονομική φασματοσκοπία – βασικές αρχές

Γενικά Περί Φασμάτων

Φάσμα εκπομπής ονομάζουμε την ενεργειακή κατανομή της ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή. Φάσμα είναι η κατανομή της ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος (ή τις αντίστοιχες συχνότητες). Ασφαλώς είμαστε πιο εξοικειωμένοι με την έγχρωμη φωτεινή ταινία που βλέπουμε μέσω φασματοσκοπίου, ως αποτέλεσμα της ανάλυσης του φωτός στα λεγόμενα χρώματα της ίριδας, που ουσιαστικά μας δείχνουν την κατανομή της ενέργειας συναρτήσει του μήκους κύματος (ή της συχνότητας).

Τα φάσματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: **Φάσματα εκπομπής** & **Φάσματα απορρόφησης**.



Σχ. 1.7. Έγχρωμη φωτεινή ταινία φάσματος - Σχηματική αναπαράσταση φάσματος απορρόφησης

α. Φάσματα Εκπομπής

Τα φάσματα εκπομπής διακρίνονται σε συνεχή, γραμμικά και ταινιωτά (που είναι υποκατηγορία των γραμμικών φασμάτων).

Συνεχή φάσματα εκπομπής: Τα φάσματα αυτά αποτελούνται από μια συνεχή ταινία που δεν διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές ή σκοτεινές περιοχές. Συνεχή φάσματα εκπομπής δίνουν τα στερεά και τα υγρά σώματα όταν βρίσκονται σε διάπυρη κατάσταση. Το συνεχές φάσμα εκπομπής των στερεών και των υγρών οφείλεται στο γεγονός ότι τα σώματα αυτά αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων για τα οποία έχουμε και πολλές στάθμες ενέργειας. Επειδή αυτές βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους δίνουν πρακτικά συνεχείς ζώνες.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής: Τα γραμμικά φάσματα εκπομπής αποτελούνται από ορισμένες μεμονωμένες φωτεινές γραμμές μέσα σε σκοτεινό πεδίο (υπόβαθρο) με απολύτως καθορισμένες συχνότητες για το είδος της ύλης που εκπέμπει, δηλαδή το χημικό στοιχείο ή τη χημική ένωση. Γραμμικά φάσματα εκπομπής δίνουν τα άτομα των αερίων ή ατμών όταν διεγερθούν κατάλληλα και έχουν τη μορφή αυτή επειδή τα διάφορα άτομα των αερίων εκπέμπουν ορισμένες μόνο συχνότητες όταν διεγερθούν (δεύτερη συνθήκη του Bohr).

Ταινιωτά φάσματα εκπομπής: Ταινιωτά φάσματα εκπομπής δίνουν τα αέρια τα οποία τη στιγμή της ακτινοβολίας τους βρίσκονται σε μορφή μορίων (O_2 , N_2 κλπ). Της ίδιας μορφής φάσματα παρέχουν και ατμοί διάφορων χημικών ενώσεων όπως SO_2 , CO_2 , κ.ά.

β. Φάσματα Απορρόφησης

Φάσματα απορρόφησης παίρνουμε αν μεταξύ της πηγής του λευκού φωτός και της σχισμής του κατευθυντήρα του φασματογράφου τεθεί ένα σώμα διαφανές το οποίο απορροφά μόνο σε ορισμένες ακτινοβολίες οπότε εμφανίζονται σκοτεινές γραμμές σε φωτεινό υπόβαθρο φάσματος. Τα φάσματα απορρόφησης διακρίνονται επίσης σε συνεχή, γραμμικά και ταινιωτά.

Συνεχή φάσματα απορρόφησης: Τα φάσματα αυτά παρουσιάζονται σαν φωτεινές ταινίες που διακόπτονται από σκοτεινές περιοχές. Τέτοια φάσματα δίνουν διαφανή στερεά και υγρά καθώς και τα έγχρωμα διαφανή αέρια.

Γραμμικά φάσματα απορρόφησης: Το γραμμικό φάσμα απορρόφησης αποτελείται από συνεχές φάσμα εκπομπής στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές ακριβώς στα μήκη κύματος τα οποία έχουν απορροφηθεί από το αέριο ή τον ατμό (υπό μορφή διακριτών ατόμων) που έχουν παρεμβληθεί. Το γραμμικό φάσμα απορρόφησης είναι χαρακτηριστικό του είδους των ατόμων του αερίου ή ατμού που απορροφά.

Ταινιωτά φάσματα απορρόφησης: Τα φάσματα αυτά, αποτελούνται από σκοτεινές ταινίες που διακόπτουν το συνεχές φάσμα εκπομπής του λευκού φωτός. Οι ταινίες αυτές είναι ένα σύνολο σκοτεινών γραμμών που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Τα φάσματα αυτά δημιουργούνται αν μεταξύ της πηγής του λευκού φωτός και του φασματογράφου, παρεμβάλουμε διατομικά ή τριατομικά αέρια ή ατμούς ή μοριακά διαλύματα υγρών ή στερεών.

Σχηματισμός των Αστρικών Φασμάτων

Η ενέργεια που φθάνει τελικά σε μας από τα αστέρια σε μορφή ακτινοβολίας οφείλεται κυρίως στις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Αυτή η ενέργεια περνά διαδοχικά από τα στρώματα που αποτελούν τα αστέρια και πριν βγει στο μεσοαστρικό διάστημα διασχίζει την «ατμόσφαιρα» του αστεριού. Η ατμόσφαιρα του αστεριού δεν έχει σαφή όρια και γενικά είναι ένα λεπτό και αραιό στρώμα μικρού πάχους. Είναι φανερό ότι η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα αστέρια υφίσταται απορρόφηση από την ατμόσφαιρά τους και η τελική ενεργειακή κατανομή που φτάνει σε μας ονομάζεται **αστρικό φάσμα**.

Ένα αστρικό φάσμα είναι ένα **γραμμικό φάσμα απορρόφησης**, αποτελείται δηλαδή από ένα φωτεινό υπόβαθρο που διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές (γραμμές απορρόφησης) σε συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Η μορφή αυτή των αστρικών φασμάτων εξηγείται σε πρώτη προσέγγιση ως εξής:

Τα άστρα δεν έχουν επιφάνεια, αφού είναι αέριες μάζες. Όμως σαν επιφάνεια ενός αστεριού μπορούμε να θεωρήσουμε το βαθύτερο εκείνο στρώμα από το οποίο μπορεί η ακτινοβολία που παράγεται στο εσωτερικό του να διαφύγει προς τα έξω. Υποθέτουμε ότι το στρώμα αυτό είναι πυκνότερο και θερμότερο από όλα τα υπερκείμενα στρώματα της ατμόσφαιρας του αστεριού. Είναι, λοιπόν, φανερό ότι η ακτινοβολία που αναδύεται από την «επιφάνεια» του αστεριού μάς δίνει το συνεχές φάσμα. Η ακτινοβολία, όμως αυτή στη συνέχεια διασχίζει, πριν φτάσει σε μας, αραιότερα και ψυχρότερα αέρια στρώματα οπότε δημιουργούνται οι γραμμές απορρόφησης.

Συνοπτικά οι άμεσες πληροφορίες που παίρνουμε από τα αστρικά φάσματα είναι οι πιο κάτω.

Πίνακας 1.3 Άμεσες πληροφορίες από αστρικά φάσματα

Παρατήρηση	Πληροφορίες
A. Συνεχές Φάσμα	Ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό του αστέρα.
Προσέγγιση με την καμπύλη ενεργειακής κατανομής του μέλανος σώματος. (Ισχύς συναρτήσει του μήκους κύματος λ).	Επιφανειακή ή πιο σωστά ενεργός θερμοκρασία T_{eff} του άστρου.
B. Γραμμικό Φάσμα	Αστρική Ατμόσφαιρα
1. Φασματικές γραμμές εκπομπής ή απορρόφησης.	Χημική ανάλυση: Ανίχνευση στοιχείων που υπάρχουν στην αστρική ατμόσφαιρα.
2. Μετατόπιση των γραμμών ως προς το εργαστηριακό μήκος κύματος.	Σχετική ταχύτητα του αστεριού ως προς εμάς. (Σχ. 1.8)
3. Η μορφή του προφίλ των φασματικών γραμμών.	

α. ταχύτητα μπλε πτέρυγας

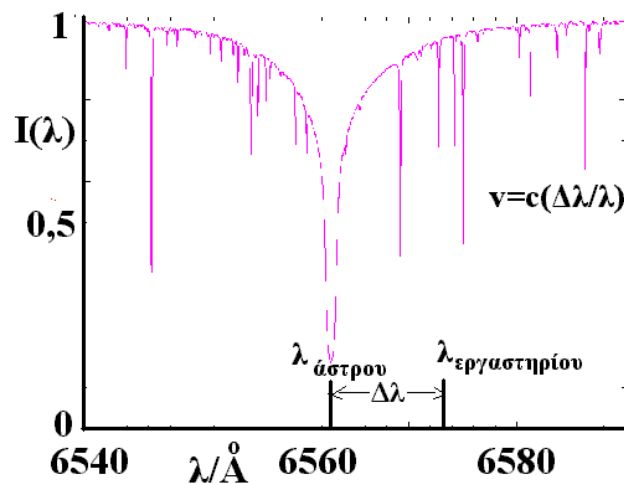
β. εύρος της γραμμής

γ. ένταση της γραμμής

Μελέτη των κινήσεων στην αστρική ατμόσφαιρα,

περιστροφή του αστεριού, ποσοστό αφθονίας του στοιχείου που την παράγει στην αστρική ατμόσφαιρα.

Έμμεσα συμπεράσματα που βγάζουμε είναι οι ηλικίες, αποστάσεις, χημικές συστάσεις, στοιχεία για το εσωτερικό του αστεριού (πίεση, χημικές αντιδράσεις κλπ.).



Σχ. 1.8. Παράδειγμα φασματικής γραμμής Balmer H_α του υδρογόνου. Λόγω φαινομένου Doppler η διαφορά $\Delta\lambda=\lambda_{\text{αστρου}}-\lambda_{\text{εργ}}$ της γραμμής του υδρογόνου μας δίνει πληροφορίες για τη σχετική ταχύτητα (ακτινική) του αστέρα ως προς εμάς.



Όργανα παρατήρησης

Ο φασματογράφος DADOS είναι ένα όργανο που προέκυψε από τη συνεργασία του ερευνητικού ινστιτούτου Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik (www.mpe.mpg.de) και της εταιρίας αστρονομικών οργάνων Baader Planetarium GmbH (www.baader-planetarium.de).

Πρόκειται για ένα φασματογράφο φράγματος μικρής ανάλυσης, ο οποίος είναι μικρός, ελαφρύς και φορητός, έχοντας το πλεονέκτημα να συνδέεται άμεσα με τα περισσότερα ερασιτεχνικά και επαγγελματικά τηλεσκόπια και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και κάμερες (Σχήμα 1.9).

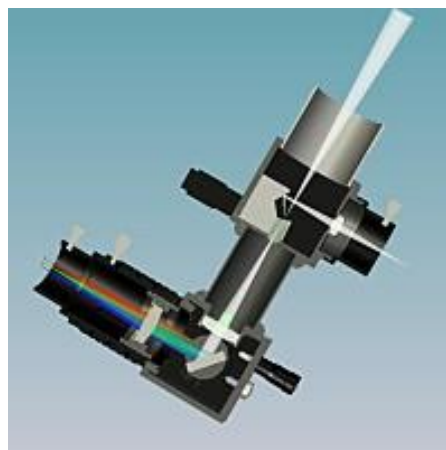
Με το φασματογράφο αυτό μπορεί κανείς να παρατηρήσει και να καταγράψει το φάσμα λαμπρών αντικειμένων, όπως ο Ήλιος, η Σελήνη, οι πλανήτες και τα πιο φωτεινά αστέρια στον ουρανό. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εργαστηριακή έρευνα, μελετώντας τα φάσματα εκπομπής ή απορρόφησης διαφόρων στοιχείων, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν άριστα φάσματα βαθμονόμησης (Σχ. 1.10).

Ο φασματογράφος DADOS στην είσοδό του έχει τρεις σχισμές (εύρους 25, 30 και 50 μm , βλ. Σχ. 1.11), οι οποίες φωτίζονται ταυτόχρονα χωρίς την απαραίτητη εναλλαγή από τη μία στην άλλη. Έτσι, παρέχεται στον παρατηρητή η ταυτόχρονη λήψη φασμάτων με μεγάλη διακριτική ικανότητα αλλά μικρό φωτισμό (λεπτή σχισμή) ή με μικρή διακριτική ικανότητα αλλά με περισσότερο φωτισμό (ευρεία σχισμή). Για την ανάλυση του φωτός ο φασματογράφος διαθέτει δύο φράγματα περίθλασης με 200 l/mm και 900 l/mm, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα φράγματα με μεγαλύτερη ανάλυση (π.χ. 1200 l/mm).

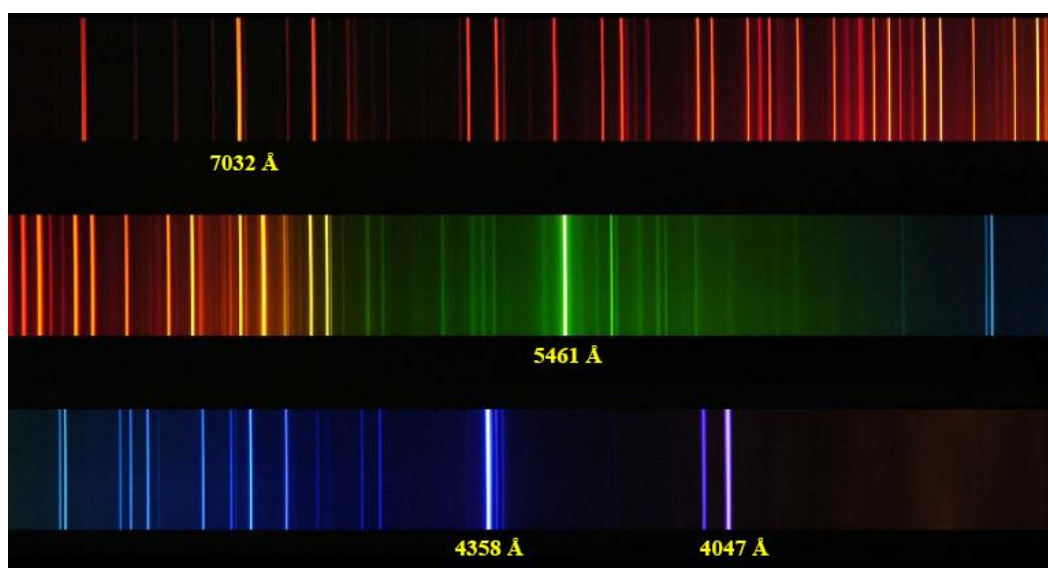
Ο φασματογράφος είναι εφοδιασμένος με λυχνία βαθμονόμησης Ne, αλλά μπορεί να λάβει φάσμα από οποιαδήποτε άλλη εργαστηριακή λυχνία.

Τέλος, διαθέτει δακτυλίδια προσαρμογής για ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και κάμερες και υποδοχή για προσοφθάλμιο φακό για την άμεση οφθαλμοσκοπική παρατήρηση και καταγραφή των φασμάτων.

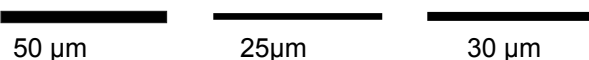
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φασματογράφου φράγματος δίνονται στον πίνακα 1.4.



Σχ. 1.9. Ο φασματογράφος DADOS και το αντίστοιχο οπτικό διάγραμμα λειτουργίας του.



Σχ. 1.10. Το φάσμα βαθμονόμησης τριών ατομικών στοιχείων (He, Ne και Xe), τα οποία έχουν ληφθεί ταυτόχρονα με μία λήψη. (Η εκτέλεση του πειράματος έγινε στο Εργαστήριο Αστρονομίας και Εφαρμοσμένης Οπτικής, από τους Δ. Παπαθανάσογλου και Κ. Γαζέα)



Σχ. 1.11. Οι τρεις σχ
δυνατότητα ταυτόχρονη
μικρό φωτισμό ή με μικ

στον παρατηρητή τη
τα (λεπτή σχισμή) αλλά
περισσότερο φωτισμό.

Πίνακας

Ι DADOS,

Βάρος	
Διαστάσεις	80×150×205 mm
Ηλεκτρική υποστήριξη (μπαταρία)	LR41
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	από -10 °C έως +30 °C
Εστιακός λόγος κατευθυντήρα φακού	f/10
Εστιακή απόσταση κατευθυντήρα φακού	80 mm
Εστιακή απόσταση απεικονιστικού φακού	96 mm
Γωνία εκτροπής	90 deg
Διασπορά στα 550 nm	
Με φράγμα 200 l/mm	36 nm/mm
Με φράγμα 900 l/mm	8 nm/mm

Η λήψη των φασμάτων στη συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση έγινε με την SBIG ST402 CCD camera, η οποία έχει ένα μονοχρωματικό (ασπρόμαυρο) chip διαστάσεων 6.9×4.6 mm, το οποίο διαθέτει 765×510 pixels, μεγέθους 9×9 μm το καθένα.

Εκτέλεση

Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός γήινης ατμόσφαιρας

Στον Πίνακα 1.5, δίνεται η μονοχρωματική φαινόμενη φωτεινότητα του Ήλιου στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, δηλ. η ροή ηλιακής ακτινοβολίας f_{λ} (σε $10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$) στο αντίστοιχο μήκος κύματος λ , ανά μονάδα επιφάνειας και ανά διάστημα μήκους κύματος, για $200\text{nm} \leq \lambda \leq 5000\text{nm}$. Οι τιμές του πίνακα προέρχονται από παρατηρήσεις τόσο επίγειες όσο και δορυφορικές (Allen's Astrophysical Quantities, 4th edition, A. Cox editor, 2000).

Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 1.5:

1. Να κατασκευάσετε την καμπύλη φασματικής κατανομής του ηλιακού φωτός (χρησιμοποιώντας το λογισμικό πρόγραμμα EXCEL).
2. Να εκτιμήσετε το μήκος κύματος στο οποίο η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται μέγιστη. Να εκτιμήσετε το αντίστοιχο σφάλμα.
3. Υπολογίστε την ηλιακή σταθερά, από το εμβαδόν του σχήματος που περιβάλλεται από την καμπύλη και τον οριζόντιο άξονα (καλύτερα να χρησιμοποιήσετε το logger-pro).
4. Συγκρίνετε με την τιμή της βιβλιογραφίας και σχολιάστε.

5. Υποθέτοντας ότι η καμπύλη σας προσεγγίζει ικανοποιητικά την καμπύλη μέλανος σώματος (θα το εξετάσετε σε επόμενο ερώτημα), βρείτε την ενεργό θερμοκρασία του ήλιου χρησιμοποιώντας τον νόμο του Wien. Εκτιμήστε το αντίστοιχο σφάλμα.

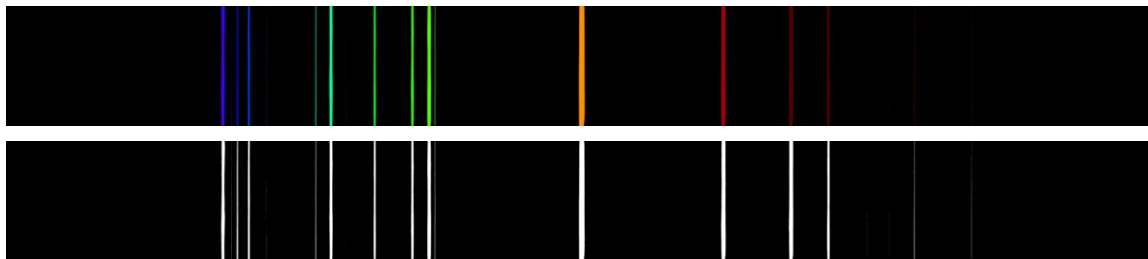
6. Από τον νόμο του Planck, υπολογίστε την f_λ και σχεδιάστε την με άλλο χρώμα πάνω στην καμπύλη με τα παρατηρησιακά δεδομένα. Σχολιάστε. (αυτό το ερώτημα να γίνει στο σπίτι).

Πίνακας 1.5: Ηλιακή φασματική κατανομή

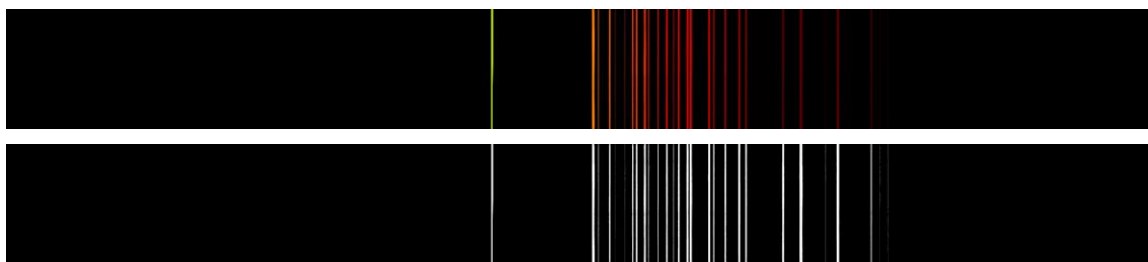
λ	f_λ	λ	f_λ	λ	f_λ
(nm)	($10^{-3} \text{Wm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$)	(nm)	($10^{-3} \text{Wm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$)	(nm)	($10^{-3} \text{Wm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$)
200	0.7	410	170.0	800	114.0
220	4.5	420	173.0	900	94.0
240	5.2	430	159.0	1000	75.0
260	13.0	440	184.0	1100	61.0
280	23.0	450	200.0	1200	52.0
300	56.0	460	205.0	1400	35.0
320	76.0	480	203.0	1600	25.5
340	91.0	500	192.0	1800	16.9
360	97.0	550	188.0	2000	11.6
370	113.0	600	177.0	2500	5.2
380	107.0	650	159.0	3000	2.6
390	103.0	700	141.0	4000	0.9
400	148.0	750	127.0	5000	0.4

Ανάλυση ηλιακού φάσματος

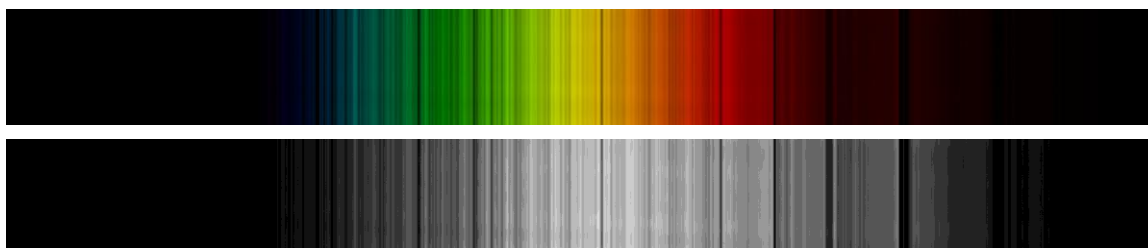
Δίνεται αρχείο με το ηλιακό φάσμα όπως καταγράφηκε με τον φασματογράφο DADOS που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο. Με τον ίδιο φασματογράφο έχει ληφθεί φάσμα βαθμονόμησης με λυχνίες He και Ne. Τα φάσματα αυτά δίνονται στα Σχ. 1.12 (α,β,γ) και οι γραμμές εκπομπής των λυχνιών και τα αντίστοιχα μήκη κύματος στους πίνακες 1.6 και 1.7 και Σχήματα 1.13 και 1.14. Οι εικόνες φαίνονται ασπρόμαυρες διότι η CCD camera που χρησιμοποιήθηκε είναι μονοχρωματική. Το χρώμα έχει προστεθεί τεχνητά σε μετέπειτα επεξεργασία της εικόνας.



Σχ. 1.12α. Το φάσμα εκπομπής του ατομικού στοιχείου ηλίου (He).



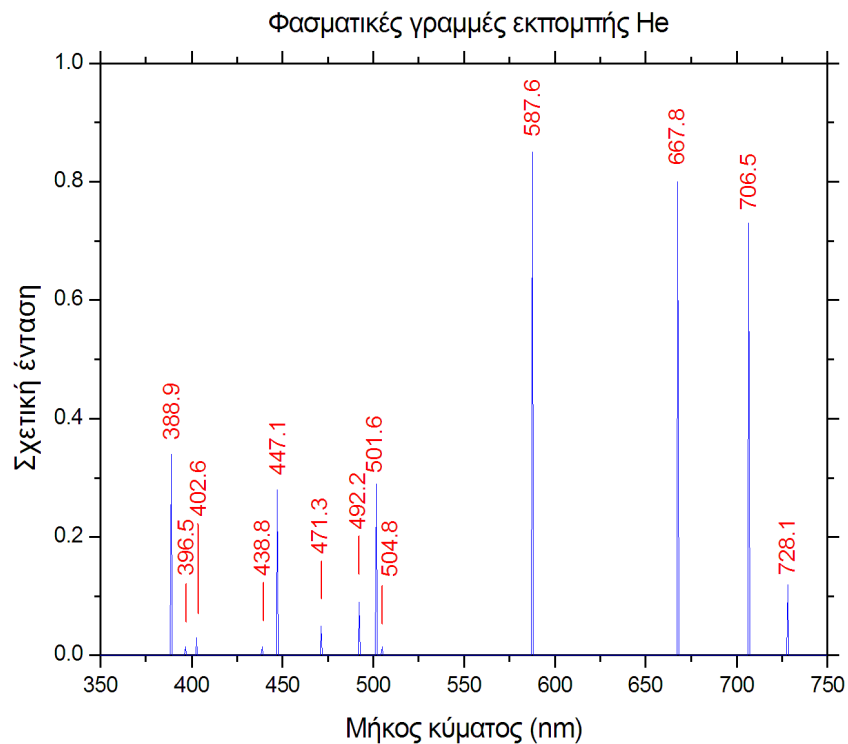
Σχ. 1.12β. Το φάσμα εκπομπής του ατομικού στοιχείου νέου (Ne).



Σχ. 1.12γ. Το ηλιακό φάσμα με τις χαρακτηριστικές (για τον Ήλιο) γραμμές απορρόφησης.

Πίνακας 1.6: Βασικές γραμμές εκπομπής του ατομικού στοιχείου ηλίου (He).

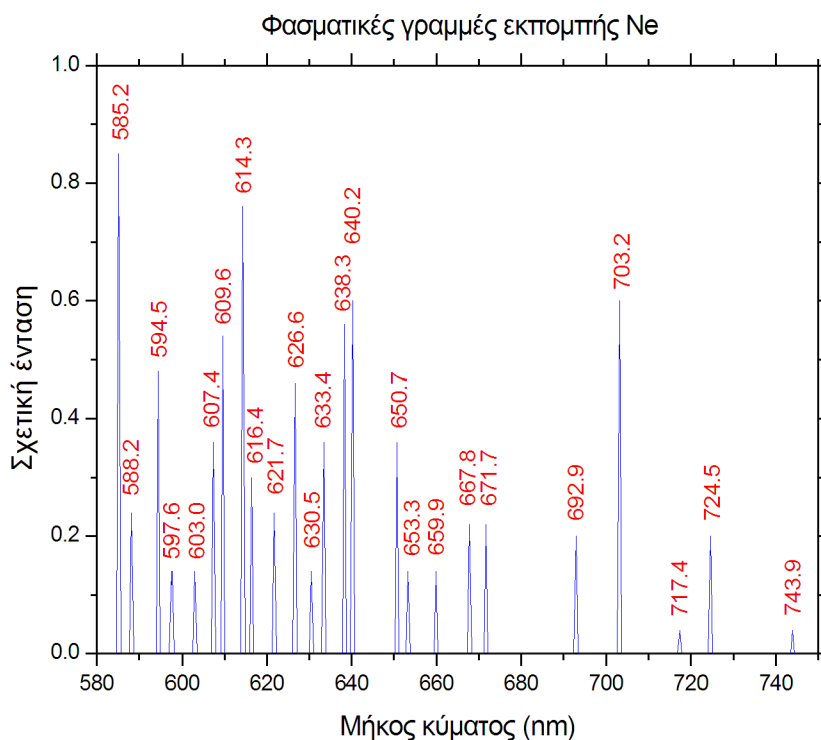
pixel	λ(nm)	χρώμα	χαρακτηρισμός	pixel	λ(nm)	χρώμα	χαρακτηρισμός
	388.9	ιώδες	έντονη		501.6	πράσινο	έντονη
	396.5	ιώδες	αμυδρή		504.8	πράσινο	αμυδρή
	402.6	ιώδες	αμυδρή		587.6	κίτρινο	έντονη
	438.8	ιώδες	αμυδρή		667.8	κόκκινο	έντονη
	447.1	ιώδες	έντονη		706.5	κόκκινο	έντονη
	471.3	κυανό	μεσαία		728.1	κόκκινο	μεσαία
	492.2	κυανό	μεσαία				



Σχ. 1.13. Βασικές γραμμές εκπομπής του ατομικού στοιχείου ηλίου (He).

Πίνακας 1.7: Βασικές γραμμές εκπομπής του ατομικού στοιχείου νέου (Ne).

pixel	λ(nm)	χρώμα	χαρακτηρισμό	pixel	λ(nm)	χρώμα	χαρακτηρισμός
	540.1	πράσινο	έντονη		653.3	κόκκινο	αμυδρή
	585.2	κίτρινο	έντονη		659.9	κόκκινο	αμυδρή
	588.2	κίτρινο	μεσαία		667.8	κόκκινο	μεσαία
	594.5	κόκκινο	έντονη		671.7	κόκκινο	μεσαία
	597.6	κόκκινο	αμυδρή		692.9	κόκκινο	μεσαία
	603.0	κόκκινο	αμυδρή		703.2	κόκκινο	έντονη
	607.4	κόκκινο	έντονη		717.4	κόκκινο	αμυδρή
	609.6	κόκκινο	έντονη		724.5	κόκκινο	μεσαία
	614.3	κόκκινο	έντονη		743.9	κόκκινο	αμυδρή
	616.4	κόκκινο	μεσαία				
	621.7	κόκκινο	μεσαία				
	626.6	κόκκινο	έντονη				
	630.5	κόκκινο	αμυδρή				
	633.4	κόκκινο	έντονη				
	638.3	κόκκινο	έντονη				
	640.2	κόκκινο	έντονη				
	650.7	κόκκινο	μεσαία				



Σχ. 1.14β Βασικές γραμμές εκπομπής του ατομικού στοιχείου νέου (Ne) (μόνο η κόκκινη περιοχή του φάσματος).

Ακολουθήστε τα εξής βήματα:

1. Χρησιμοποιώντας το αστρονομικό λογισμικό που παρέχεται στο εργαστήριο, ανοίξτε τις εικόνες των φασμάτων βαθμονόμησης He και Ne και του ηλιακού φάσματος, ακολουθώντας τις οδηγίες των διδασκόντων.
2. Σαρώστε τις εικόνες με μια οριζόντια γραμμή, με το αντίστοιχο εργαλείο του προγράμματος και αποθηκεύστε το αρχείο στην επιφάνεια εργασίας.
3. Το αρχείο αυτό μπορείτε να το ανοίξετε με κάποιο πρόγραμμα γραφικών (π.χ. EXCEL). Κάνετε την γραφική παράσταση του ηλιακού φάσματος και του φάσματος της λυχνίας (άξονας X: αριθμός pixel, άξονας Y: μήκος κύματος).
4. Αναγνωρίστε τις γραμμές εκπομπής της κάθε λυχνίας και συμπληρώστε τον αντίστοιχο πίνακα με τον αριθμό pixel και το αντίστοιχο μήκος κύματος στο οποίο αντιστοιχεί κάθε γραμμή (όπως τους πίνακες 1.6 και 1.7). Αντιστοιχήστε τις γραμμές εκπομπής που παρατηρείτε στις εικόνες με αυτές των πινάκων 1.6 και 1.7 και το μήκος κύματός τους.
5. Υπολογίστε τη σχέση βαθμονόμησης των φασμάτων αυτών, εφαρμόζοντας μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα (αριθμός pixel και μήκος κύματος) δηλαδή βρείτε την εξίσωση που μετατρέπει τον αριθμό του κάθε pixel σε μήκος κύματος (nm). Η διαδικασία αυτή να επαναληφθεί και για τα δύο φάσματα βαθμονόμησης και να συγκρίνετε τις δύο σχέσεις βαθμονόμησης που βρήκατε.
6. Κάνετε τη βαθμονόμηση του ηλιακού φάσματος, εφαρμόζοντας αντίστροφα τις εξισώσεις βαθμονόμησης (του προηγούμενου βήματος) στα δεδομένα του ηλιακού φάσματος και μετατρέψτε τον αριθμό pixel σε μήκος κύματος (nm).
7. Κάνετε τη γραφική παράσταση του βαθμονομημένου πλέον ηλιακού φάσματος (άξονας X: μήκος κύματος, άξονας Y: ένταση).
8. Αναγνωρίστε τις βασικές γραμμές απορρόφησης που παρατηρείτε στο ηλιακό φάσμα, χρησιμοποιώντας τον βοηθητικό πίνακα 1.8.

9. Συγκρίνετε τις τιμές που βρήκατε για τα μήκη κύματος που αναγνωρίσατε με τα εργαστηριακά μήκη κύματος για τα αντίστοιχα ατομικά και μοριακά στοιχεία.
10. Πόση απόκλιση έχουν οι τιμές που βρήκατε (ποσοστιαίες μονάδες);
11. Από την εξίσωση βαθμονόμησης βρείτε την κλίμακα ειδώλου επάνω στο chip (πόσα nm αντιστοιχούν σε κάθε pixel και κατ' επέκταση πόσα nm αντιστοιχούν σε κάθε mm του chip). Ποιο φράγμα (γραμμές/mm) χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των φασμάτων της άσκησης;
12. Διατυπώστε περιληπτικά τα αποτελέσματα και τα κύρια συμπεράσματά σας (και από τα δύο μέρη της άσκησης).

Πίνακας 1.8: Βασικές γραμμές απορρόφησης Fraunhofer στο ηλιακό φάσμα

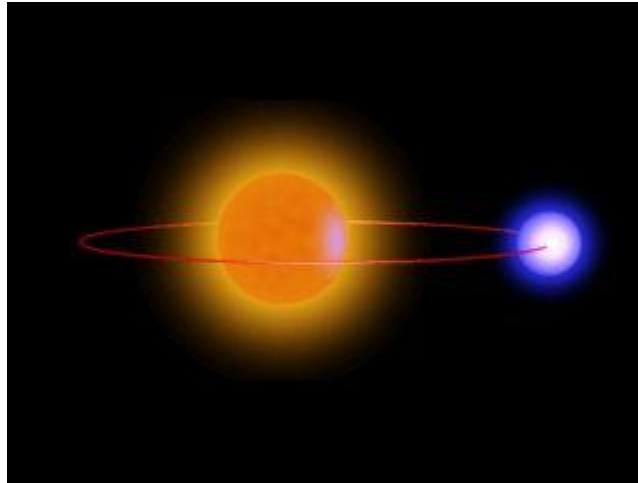
λ(nm)	όνομα	στοιχείο	λ(nm)	όνομα	στοιχείο
299.444	t	Ni I	516.733	b ₄	Mg I
302.108	T	Fe I	516.891	b ₃	Fe I
336.112	P	Ti II	517.270	b ₂	Mg I
358.121	N	Fe I	518.362	b ₁	Mg I
382.044	L	Fe I	527.039	E ₂	Fe I
393.368	K	Ca II	546.073	e	Hg I
396.847	H	Ca II	587.562	D ₃ ή d	He I
410.175	h	H I (Hδ)	588.995	D ₂	Na I
430.774	G	Ca I	589.592	D ₁	Na I
430.790	G	Fe I	627.661	a	O ₂
434.047	G'	H I (Hγ)	656.281	C	H I (Hα)
438.355	e	Fe I	686.719	B	O ₂
466.814	d	Fe I	759.370	A	O ₂
486.134	F	H I (Hβ)	822.696	Z	O ₂
495.761	c	Fe I	898.765	y	O ₂

* Το σύμβολο «I» που ακολουθεί το στοιχείο υποδηλώνει ουδέτερο άτομο, το σύμβολο «II» απλά ιονισμένο άτομο, κ.ο.κ.

Βιβλιογραφία

- Allen's Astrophysical Quantities, 4th edition, A. Cox editor, 2000.
- Carroll, B.W. & Ostlie, D.A., 2007, An introduction to Modern Astrophysics, pub. Pearson-Addison Wesley
- Δανέζης, Ε. & Θεοδοσίου, Ε. 1999, Εισαγωγή στην Αστροφυσική, τομ. Α', εκδ. Δίαυλος
- Κοντιζά Μ., Δανέζης, Ε., Θεοδοσίου Ε., Δεληγιάννης Ι., Τσίγκανος Κ., Πρέκα-Παπαδήμα Π., Μαστιχιάδης Α., Αποστολάτος Θ., Νιάρχος, Π., Σταθοπούλου Μ., Παπαθανάσογλου Δ., Μουσάς Ξ.Δ., 2007, Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ
- Shu, F., Αστροφυσική (Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος) Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991

A2. Μέτρηση βασικών φυσικών μεγεθών αστέρων. Άμεση μέτρηση μαζών και ακτίνων αστέρων διπλών εκλειπτικών συστημάτων



Σκίτσο εκλειπτικού συστήματος αστέρων από: <http://www.mogivice.com/Pagine/Downloads.html>

Σκοπός της άσκησης

Ο κύριος σκοπός της άσκησης είναι:

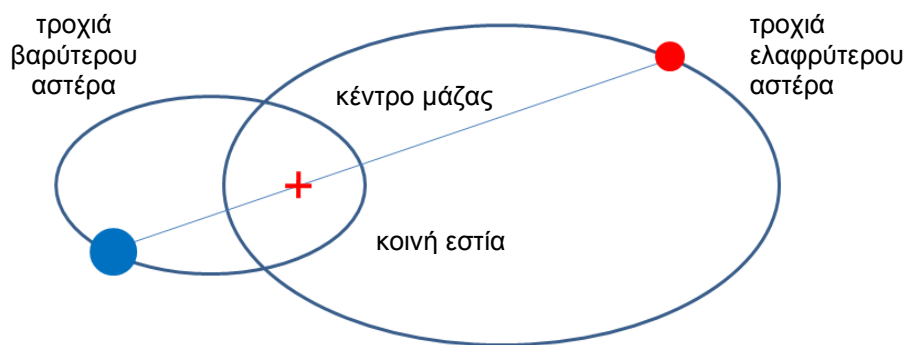
- Μέτρηση βασικών παραμέτρων αστέρων μέσω της παρατήρησης διπλών αστρικών συστημάτων.
- Κατανόηση ιδιοτήτων μεταβλητών και διπλών εκλειπτικών αστέρων.
- Φωτομετρικές παρατηρήσεις. Διαφορική φωτομετρία. Διάγραμμα φάσης. Ηλιοκεντρική διόρθωση χρόνου.
- Σχηματισμός της καμπύλης φωτός, προσδιορισμός των χρόνων των εκλείψεων (χρόνος ελαχίστου φωτεινότητας στις καμπύλες φωτός) και υπολογισμός της περιόδου και της αστρονομικής εφημερίδας των διπλών αυτών συστημάτων. Υπολογισμός των απολύτων στοιχείων των συστημάτων και εκτίμηση της εξελικτικής τους κατάστασης.

Βασικά στοιχεία θεωρίας

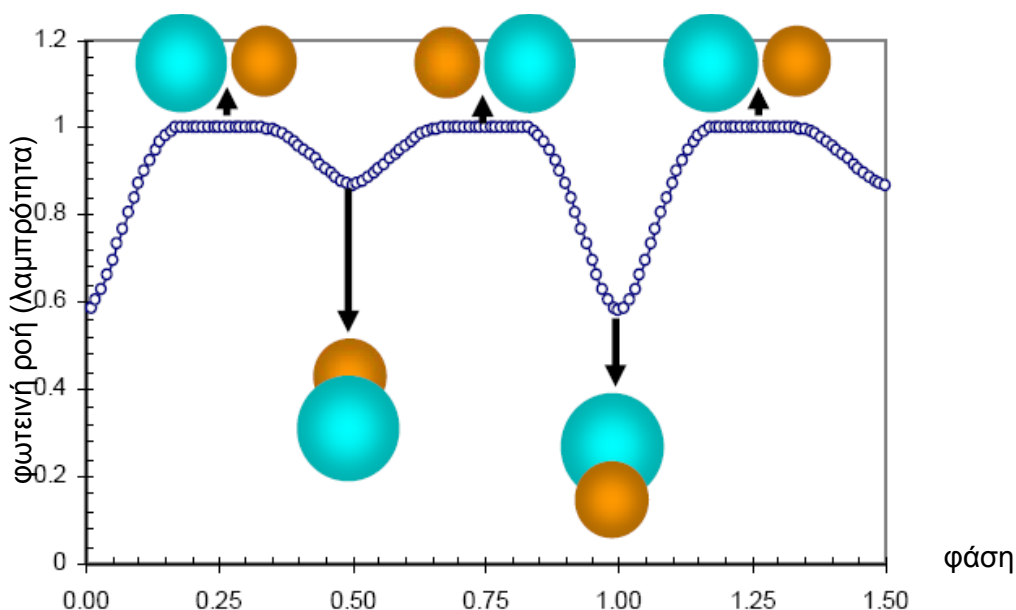
Εισαγωγικά

Περίπου το 50–60 % όλων των αστέρων είναι μέλη διπλών ή πολλαπλών συστημάτων, δηλαδή συστημάτων που αποτελούνται από δύο ή περισσότερους αστέρες που περιφέρονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους (βλ. Σχήμα 2.1). Σε μερικά από αυτά τα συστήματα το επίπεδο τροχιάς εμπεριέχει ή σχηματίζει μικρή γωνία (i) με την ευθεία παρατήρησης. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε διαδοχικές εκλείψεις του ενός μέλους του ζεύγους από το άλλο. Σε κάθε

τροχιακή περίοδο συμβαίνουν δύο εκλείψεις. Το ποσό του φωτός που αποκόπτεται σε κάθε έκλειψη εξαρτάται από τη θερμοκρασία των δύο αστέρων. Έτσι στην καμπύλη φωτός του συστήματος (φαινόμενο μέγεθος, λαμπρότητα ή φωτεινή ροή συναρτήσει του χρόνου) έχουμε δύο ελάχιστα. Το βαθύτερο ελάχιστο λέγεται **κύριο ελάχιστο** (primary minimum) και το άλλο (το ρηχότερο) λέγεται **δευτερεύον ελάχιστο** (secondary minimum). Το κύριο ελάχιστο συμβαίνει όταν ο θερμότερος αστέρας αποκρύπτεται (ολικώς ή μερικώς) από τον ψυχρότερο και το δευτερεύον όταν ο ψυχρότερος αστέρας αποκρύπτεται από τον θερμότερο (Σχήμα 2.2). Τέτοια διπλά συστήματα που παρουσιάζουν καμπύλες φωτός του παραπάνω τύπου λέγονται *εκλειπτικά διπλά συστήματα ή μεταβλητοί δι'εκλείψεων αστέρες*.



Σχ. 2.1. Η κίνηση των μελών ενός διπλού συστήματος αστέρων.



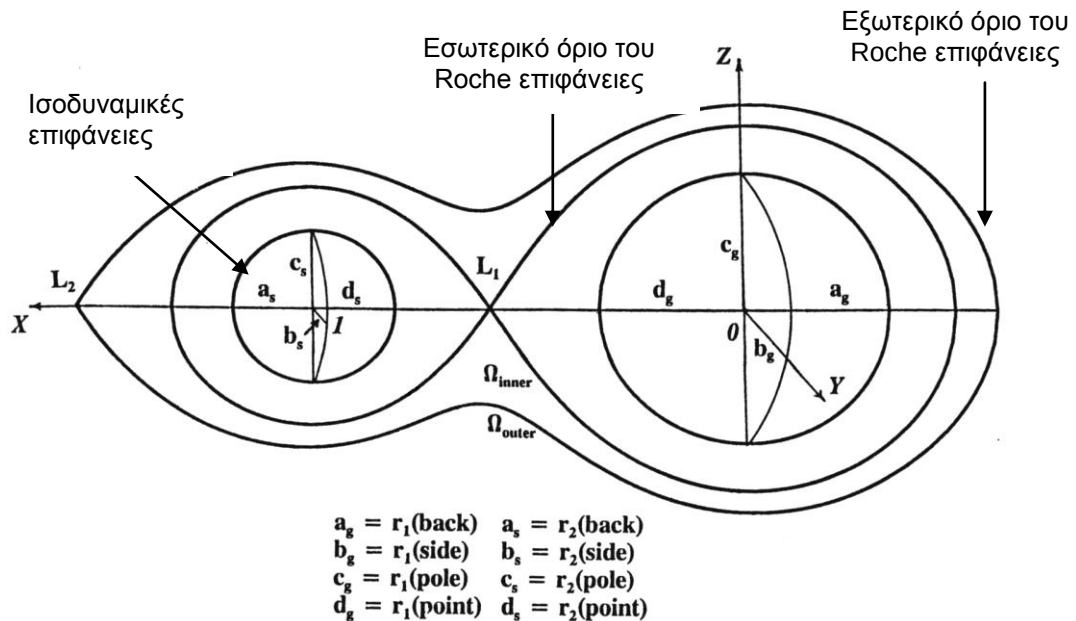
Σχ. 2.2. Η καμπύλη φωτός ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος και η τρισδιάστατη απεικόνιση των μελών του σε χαρακτηριστικές τιμές της τροχιακής φάσης.

Οι καμπύλες φωτός των συστημάτων αυτών περιέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις διαστάσεις τους και άλλα φωτομετρικά φαινόμενα, όπως είναι το **φαινόμενο αμαύρωσης του χείλους**, το **φαινόμενο ανάκλασης του φωτός** που εκπέμπεται από τα δύο μέλη του συστήματος, το **φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας** κ.α. Με κατάλληλη ανάλυση της καμπύλης φωτός μπορούμε να υπολογίσουμε τα γεωμετρικά και φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος, καθώς επίσης να υπολογίσουμε και την περίοδο της τροχιακής κίνησης του συστήματος.

Το μοντέλο Roche

Το μοντέλο Roche περιγράφει δυναμικά τα στενά διπλά συστήματα αστέρων (close binary systems) στα οποία οι αστέρες δεν εξελίσσονται ανεξάρτητα ως μεμονωμένοι αστέρες, αλλά η εξελικτική τους πορεία εξαρτάται από την παρουσία του άλλου μέλους του συστήματος. Αυτοί οι αστέρες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και λαμβάνουν χώρα φαινόμενα όπως η ανταλλαγή μάζας μεταξύ τους, η σύγχρονη περιστροφή, ή ακόμα και μεταφορά θερμότητας από τον θερμό αστέρα στον ψυχρότερο. Το μοντέλο περιγράφεται περιληπτικά ως εξής:

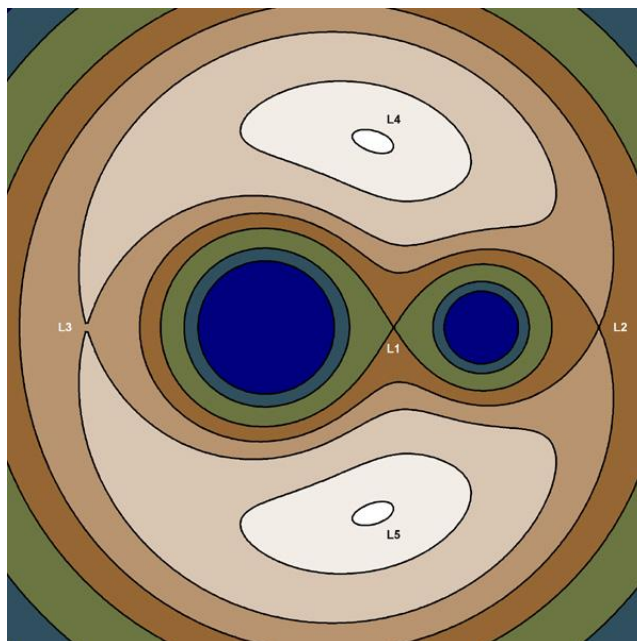
Θεωρούμε ένα σύστημα δύο αστέρων με κυκλικές τροχιές και το παρατηρούμε με σύστημα αναφοράς το κέντρο μάζας του πρωτεύοντα (με μεγαλύτερη μάζα) αστέρα του συστήματος (Σχήμα 2.3). Με την παραπάνω παραδοχή μπορούμε να ορίσουμε ισοδυναμικές επιφάνειες έτσι ώστε η ανηγμένη βαρύτητα του συστήματος να είναι κάθετη σ' αυτές. Η ανηγμένη βαρύτητα ορίζεται ως η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε ένα στοιχείο μάζας από τους δύο αστέρες του συστήματος, λόγω βαρυτικής έλξης και λόγω περιστροφής του συστήματος αναφοράς.



Σχήμα 2.3. Η γεωμετρία του Roche για στενά διπλά συστήματα αστέρων. Οι δείκτες s και g αναφέρονται στο μικρότερης μάζας και στο μεγαλύτερης μάζας μέλος του συστήματος, αντίστοιχα.

Κοντά στο κέντρο του κάθε αστέρα οι δυνάμεις που ασκούνται λόγω της παρουσίας του συνοδού καθώς και της περιστροφής του συστήματος αναφοράς θεωρούνται αμελητέες. Επομένως οι ισοδυναμικές επιφάνειες κοντά στους δύο αστέρες του συστήματος είναι σφαίρες. Αντίθετα μακριά από τους αστέρες, η ανηγμένη βαρύτητα του συστήματος κυριαρχείται από την φυγόκεντρο δύναμη. Γι' αυτό το λόγο οι ισοδυναμικές επιφάνειες πρέπει να τέμνουν το ισημερινό επίπεδο σε κατά προσέγγιση ομόκεντρους κύκλους που περικλείουν τα δύο σώματα. Φυσικά σε ενδιάμεσες θέσεις το στοιχείο μάζας επηρεάζεται τόσο από τη βαρύτητα των δύο σωμάτων όσο και από τη φυγόκεντρο δύναμη.

Τα δύο κλειστά μέρη της εσωτερικής επιφάνειας (εσωτερικό όριο του Roche, Ω_{in}) που αντιστοιχούν στους δύο αστέρες ονομάζονται **λοβοί Roche** και ενώνονται σε ένα και μοναδικό σημείο, στο Λανγκρατζιανό σημείο ισορροπίας (Lagrangian point) L_1 . Τα σημεία ισορροπίας L_2 , L_3 βρίσκονται πάνω στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα των αστέρων και έξω από τους λοβούς Roche, ενώ τα σημεία L_4 , L_5 βρίσκονται εκατέρωθεν της προαναφερθείσας ευθείας και επί του ισημερινού επιπέδου, και η απόστασή τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζονται ισόπλευρα τρίγωνα, με κορυφές τα κέντρα των αστέρων και αυτά τα σημεία (Σχήμα 2.4). Το σχήμα των ισοδυναμικών επιφανειών και οι ακτίνες των λοβών Roche εξαρτώνται από το λόγο μαζών m_2/m_1 του συστήματος.



Σχ. 2.4. Τα 5 σημεία ισορροπίας του Lagrange στο ισημερινό επίπεδο.
(<http://members.wolfram.com/jeffb/visualization/lagrange.shtml>)

Ταξινόμηση των μεταβλητών δι' εκλείψεων αστέρων

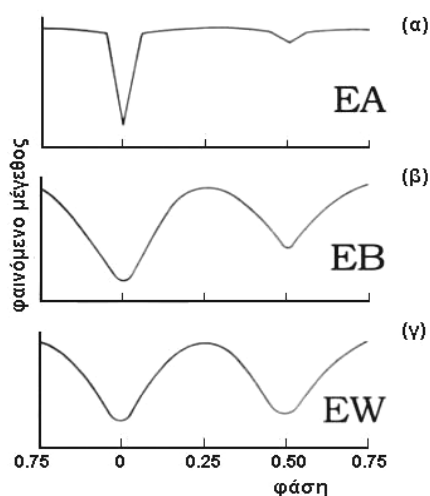
Οι μεταβλητοί δι' εκλείψεων αστέρες ταξινομούνται σε **τρεις κύριες κατηγορίες** ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης φωτός τους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα συστήματα των κατηγοριών αυτών έχουν τις ίδιες φυσικές παραμέτρους και την ίδια εξελικτική κατάσταση.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα τύπου **Algol** ή **β Persei**. Η καμπύλη φωτός τους μοιάζει με την καμπύλη φωτός του αστέρα β Persei ή Algol (Σχήμα 2.5α). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από έναν αστέρα φασματικού τύπου από B μέχρι A, που είναι ο λαμπρότερος και αυτός με τη μεγαλύτερη μάζα, αλλά μικρότερος σε διαστάσεις από τον συνοδό του ο οποίος είναι συνήθως φασματικού τύπου από G μέχρι K. Η τροχιακή περίοδος των συστημάτων τύπου Algol κυμαίνεται από 1 ημέρα μέχρι και 1 μήνα. Τα δύο μέλη του συστήματος είναι αποχωρισμένα και βρίσκονται μέσα στους αντίστοιχους λοβούς του **Roche** (Σχήμα 2.6α). Η καμπύλη φωτός των συστημάτων τύπου Algol μας δίνει τη δυνατότητα να βρούμε το χρόνο (ή τη φάση) όπου αρχίζει και τελειώνει η έκλειψη. Τα σχεδόν επίπεδα τμήματα της καμπύλης αντιστοιχούν στις φάσεις όπου και οι δύο αστέρες φαίνονται από τον παρατηρητή, ενώ τα ελάχιστα αντιστοιχούν στις φάσεις όπου συμβαίνουν εκλείψεις.

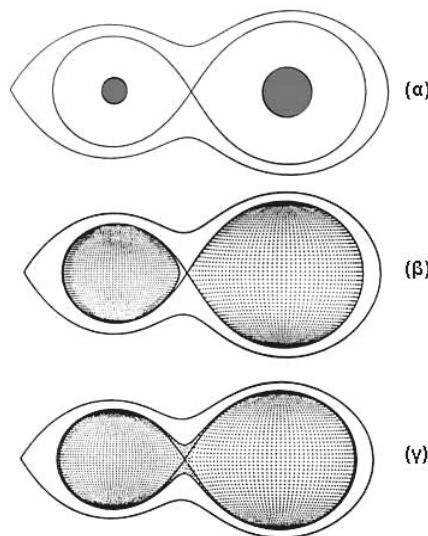
Η δεύτερη καμπύλη του σχήματος 2.5 αντιστοιχεί στην δεύτερη κατηγορία των εκλειπτικών συστημάτων που είναι γνωστά ως συστήματα τύπου **β Lyrae**. Στα συστήματα αυτά η μεταβολή του φωτός είναι συνεχής, γιατί και τα δύο μέλη του συστήματος είναι παραμορφωμένα λόγω της αμοιβαίας βαρυτικής έλξης. Οι φωτόσφαιρες των δύο μελών του ζεύγους βρίσκονται σχεδόν σε επαφή. Τα δύο ελάχιστα σχηματίζονται κατά τον ίδιο τρόπο, όπως στην περίπτωση των συστημάτων τύπου Algol. Τα δύο μέλη του συστήματος είναι συνήθως προγενεστέρων φασματικών τύπων με πολύπλοκα χαρακτηριστικά, που δείχνουν ότι υπάρχουν ρεύματα αερίου και κελύφη γύρω από το σύστημα. Οι τροχιακές περίοδοι είναι συνήθως μεγαλύτερες από 1 ημέρα. Στα συστήματα αυτά τα δύο μέλη σχεδόν γεμίζουν τους αντίστοιχους λοβούς του Roche (Σχήμα 2.6β).

Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα εκλειπτικά συστήματα τύπου **W Ursae Majoris** (Σχήμα 2.5γ). Τα μέλη των συστημάτων αυτών είναι πολύ παραμορφωμένα λόγω των παλιρροιογόνων δυνάμεων και έχουν σχεδόν ίσες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται μάλλον στην ύπαρξη κοινής ατμόσφαιρας που περιβάλλει το σύστημα. Στην πραγματικότητα οι αστέρες βρίσκονται σε επαφή. Οι φασματικοί τύποι των συστημάτων αυτών είναι από F μέχρι K. Οι τροχιακές τους

περίοδοι είναι μικρότερες από 1 ημέρα και τα δύο μέλη του συστήματος γεμίζουν ή και υπερβαίνουν τους αντίστοιχους λοβούς του Roche (Σχήμα 2.6γ).



Σχ. 2.5. Καμπύλες φωτός μεταβλητών δ'εκλείψεων αστερών των τριών βασικών κατηγοριών.



Σχ. 2.6. Γραφική απεικόνιση των διατομών των λοβών του Roche και των αντίστοιχων επιφανειών εκλειπτικών συστημάτων των τριών βασικών κατηγοριών.

Υπολογισμός του χρόνου των ελαχίστων

Το πρώτο βήμα στην ανάλυση της καμπύλης φωτός ενός εκλειπτικού συστήματος είναι ο προσδιορισμός του χρόνου των ελαχίστων της καμπύλης, που προέκυψε από τις παρατηρήσεις. Οι χρόνοι αυτοί χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό της περιόδου του συστήματος, αν και σε πολλά εκλειπτικά συστήματα οι περίοδοι δεν παραμένουν σταθερές με κύρια αιτία τη μεταφορά μάζας ανάμεσα στα μέλη του συστήματος ή την απώλεια μάζας από το σύστημα. Με τον προσδιορισμό του χρόνου των ελαχίστων μπορούμε να ελέγξουμε εάν οι εκλείψεις συμβαίνουν "στον προβλεπόμενο χρόνο". Εάν οι εκλείψεις συμβαίνουν νωρίτερα ή αργότερα από τον προβλεπόμενο χρόνο, αυτό δείχνει μεταβολή της περιόδου. Εάν γνωρίζουμε το χρόνο που συνέβη ένα ελάχιστο (T_0) και την περίοδο του συστήματος (P), τότε ο χρόνος που αναμένεται να συμβεί ένα επόμενο (ίδιου τύπου) ελάχιστο δίνεται από τη σχέση:

$$T_{cal} = T_0 + P \times E \quad (2.1)$$

όπου E ακέραιος (αριθμός τροχιακών κύκλων).

Συνήθως, ορίζουμε ως «αστρονομική εφημερίδα» του συστήματος τη σχέση:

$$\text{Min I} = T_0 + P \times E \quad (2.2)$$

όπου τώρα το T_0 είναι ο χρόνος ενός πρωτεύοντος ελαχίστου και Min I ο χρόνος ενός επόμενου (ομώνυμου) ελαχίστου.

Εάν t_0 είναι ο χρόνος (epoch) ενός πρωτεύοντος ελαχίστου της καμπύλης, τότε ορίζεται ως **φάση** της καμπύλης, στον οποιοδήποτε χρόνο t , το δεκαδικό μέρος του πηλίκου

$$\text{φάση} = \text{δεκαδικό μέρος του πηλίκου } (t - t_0) / P \quad (2.3)$$

$$\text{και γωνία φάσης } \theta = \text{φάση} \times 360^\circ.$$

Προφανώς για καμπύλη που αντιστοιχεί σε μία τροχιακή περίοδο οι τιμές της φάσης θα παίρνουν τιμές από 0 μέχρι 1.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού του χρόνου των ελαχίστων, γραφικές και θεωρητικές.

Η ηλιοκεντρική διόρθωση του χρόνου

Για να αποδοθεί γραφικά η μεταβολή της φωτεινότητας ενός αστέρα δεν έχουμε παρά να κάνουμε ένα διάγραμμα της μεταβολής του μεγέθους ως προς τον χρόνο. Ο χρόνος μπορεί να είναι εκφρασμένος σε ώρες, αλλά για παρατηρήσεις πολλών ημερών η μεταβλητή του χρόνου περιέχει τόσο αριθμούς όσο και γράμματα και ο υπολογιστής δεν μπορεί να τοποθετήσει τα δεδομένα με αύξουσα χρονική σειρά. Για το σκοπό αυτό, η μετατροπή του χρόνου σε Ιουλιανή Ημερομηνία (Julian Date - JD) είναι κάτι που βοηθά τον υπολογιστή να έχει το χρόνο εκφρασμένο με ένα νούμερο και έτσι πιο εύκολο να κάνει πράξεις και ταξινόμηση. Για αναφορά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο ότι το μεσημέρι της 1^{ης} Ιανουαρίου 2000 ήταν JD=2451545.0.

Η ακρίβεια στην καταγραφή του χρόνου είναι κάτι το εξαιρετικά κρίσιμο στην αστρονομική παρατήρηση. Ιδιαίτερα ακριβής (καλύτερη από δευτερόλεπτο) θα πρέπει να είναι όταν η μελέτη αποσκοπεί στην ανεύρεση περιοδικοτήτων μικρής διάρκειας, καθώς και αναπάσεις των αστέρων.

Η ίδια η κίνηση της Γης επηρεάζει τον αληθινό χρόνο παρατήρησης, λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός (Σχ. 2.7). Αυτός ήταν άλλωστε και ο τρόπος με τον οποίο ο αστρονόμος Roemer μέτρησε την ταχύτητα του φωτός, βασισμένος στους χρόνους εκλείψεων των δορυφόρων του Δία και την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο.

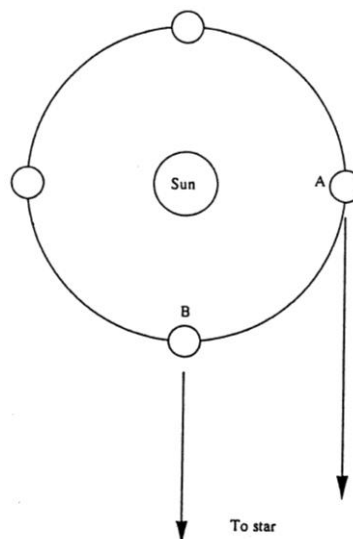
Για να αποφύγουμε αποκλίσεις λόγω αυτού του φαινομένου, θα πρέπει να μετατρέψουμε το χρόνο σε Ηλιοκεντρικό, δηλαδή σαν να έχουμε έναν υποθετικό παρατηρητή στο κέντρο του Ήλιου, ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις στην καταγραφή του χρόνου ύψους μέχρι και 8.316 λεπτών (8m 19s = 499s). Η νέα **Ηλιοκεντρική Ιουλιανή ημερομηνία (HJD)** υπολογίζεται εύκολα, αρκεί να γνωρίζουμε τις σχετικές θέσεις Γης-Ήλιου, πράγμα το οποίο καθορίζεται από την ημερομηνία και ώρα της παρατήρησης και τη θέση του αστέρα που παρατηρούμε.

Η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο δεν είναι απόλυτα κυκλική αλλά ελλειπτική. Η διόρθωση του χρόνου λόγω αυτού του γεγονότος, δεν υπερβαίνει τα 0.008 δευτερόλεπτα και έτσι η διόρθωση αυτή είναι πρακτικά περιττή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι αστέρες που παρατηρούμε δε βρίσκονται πάνω στο επίπεδο της εκλειπτικής και έτσι η ηλιοκεντρική διόρθωση δεν φτάνει τα 8.316 λεπτά. Η γενική εξίσωση που εφαρμόζεται για τη διόρθωση αυτή είναι:

$$\text{Ηλιοκεντρικός χρόνος} = \text{Γεωκεντρικός χρόνος} - \Delta t \quad (2.4)$$

ή $\text{HJD} = \text{JD} - \Delta t$, όπου Δt η κατάλληλη ηλιοκεντρική διόρθωση.



Σχήμα 2.7. Η ανάγκη διόρθωσης του χρόνου από Γεωκεντρικό σε Ηλιοκεντρικό έγινε ώστε να εξαλειφθεί η διαφορά του χρόνου που προέκυπτε, λόγω της περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Δεδομένα της άσκησης

Στην άσκηση θα χρησιμοποιηθούν φωτομετρικές παρατηρήσεις ενός μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα που έχουν ληφθεί με το τηλεσκόπιο του Πανεπιστημιακού Αστεροσκοπείου Αθηνών.² Συγκεκριμένα, δίνονται:

Πίνακας 2.1. Φωτομετρικές παρατηρήσεις (t , Δm) του διπλού εκλειπτικού συστήματος EG Cep (RA: $20^h 15^m 57^s$, Dec: $+76^\circ 48' 36''$).

Πίνακας 2.2. Χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων των τελευταίων 5 ετών (HJD).

Πίνακας 2.3. Τιμές ορισμένων φυσικών παραμέτρων (φασματοσκοπικός λόγος μαζών $q=m_2/m_1$, κλίση του επιπέδου της τροχιάς i , σχετικές ακτίνες r_1 , r_2 , θερμοκρασίες T_1 , T_2 , ακτινικές ταχύτητες K_1 , K_2).

Βήματα της άσκησης

1. Με δεδομένο ότι η Ηλιοκεντρική διόρθωση την εποχή της παρατήρησης του διπλού συστήματος ήταν 115 δευτερόλεπτα με αυξητική τάση, να μετατραπεί ο χρόνος t του Πίνακα 1 από JD σε HJD, με τη χρήση της εξίσωσης 2.4. Τι συμπέρασμα εξαγάγουμε για τη σχετική θέση Ηλίου-Γης-Αστέρα με βάση την ηλιοκεντρική διόρθωση;
2. Χρησιμοποιώντας σαν αρχική αστρονομική εφημερίδα την εξίσωση: $\text{MinI} = 2454264.5537 + 0.5446 \times E$ να υπολογίσετε τις εποχές (E) των παρατηρημένων χρόνων ελαχίστων του Πίνακα 2. Εάν ο αριθμός που προκύπτει για το E δεν είναι ακέραιος, να γίνει στρογγυλοποίηση στο πλησιέστερο ακέραιο ή ημιακέραιο αριθμό, ανάλογα εάν το ελάχιστο αναφέρεται σε πρωτεύον ή δευτερεύον.
3. Να υπολογιστεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η τροχιακή περίοδος του συστήματος, χρησιμοποιώντας τους χρόνους ελαχίστων που δίνονται στον Πίνακα 2 καθώς και η νέα αστρονομική εφημερίδα του συστήματος (να δοθούν τα σφάλματα υπολογισμού των σταθερών). Με τι ακρίβεια υπολογίσατε την τροχιακή περίοδο περιστροφής με αυτήν τη μέθοδο;
4. Να υπολογιστούν οι φάσεις (με τη βοήθεια των σχέσεων 2.2 και 2.3) και να γίνουν οι γραφικές παραστάσεις (Δm , φάση) στο διάστημα φάσεων 0.00 – 1.00 (Προσοχή: τα μεγέθη Δm να αυξάνουν προς τα κάτω).
5. Να βρεθεί η μέγιστη διαφορά λαμπρότητας ($\Delta m_{\max}$) στο διάγραμμα Δm -φάση και να γίνει η γραφική παράσταση (flux, φάση), μετατρέποντας τα μεγέθη Δm σε ροή ακτινοβολίας (flux), χρησιμοποιώντας την εξίσωση Pogson: $\text{flux} = 10^{-0.4(\Delta m - \Delta m_{\max})}$.
6. Να υπολογισθούν τα απόλυτα στοιχεία (μάζα M , ακτίνα R , φωτεινότητα L και μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς), χρησιμοποιώντας τις σχέσεις στο Παράρτημα. Σημειώστε ότι το μόνο μέγεθος που έχει σφάλμα είναι αυτό της τροχιακής περιόδου, όπως υπολογίστηκε στο 3^ο ερώτημα. Τα υπόλοιπα μεγέθη θα θεωρηθούν ότι δεν έχουν σφάλμα.
7. Διατυπώστε περιληπτικά τα αποτελέσματα και τα κύρια συμπεράσματά σας.

Παράρτημα: Υπολογισμός των Απόλυτων παραμέτρων ενός διπλού συστήματος

Οι υπολογισμοί των απόλυτων παραμέτρων και των σφαλμάτων τους βασίζονται στις παραμέτρους που υπολογίζονται από την ανάλυση της καμπύλης φωτός.

² Σημείωση: Οι παρατηρήσεις και τα φωτομετρικά δεδομένα της άσκησης έχουν παραχωρηθεί από τον Δρ. Αλέξιο Λιάκο, ενώ η άσκηση έχει δημιουργηθεί σε συνεργασία με τον Ομότ. Καθηγητή Αστρονομίας κ. Παναγιώτη Νιάρχο.

Παράμετρος	Επεξήγηση
T_1 [K] = 8500	Θερμοκρασία του πρωτεύοντος αστέρα
T_2 [K] = 5792	Θερμοκρασία του δευτερεύοντος αστέρα
i [deg] = 87.5	Κλίση του επιπέδου της τροχιάς του συστήματος ως προς το επίπεδο του ουρανού
$e = 0$	Εκκεντρότητα της τροχιάς του συστήματος
$q = m_2/m_1$	Λόγος μαζών των αστέρων του συστήματος
K_1 [Km/s] = 110.67	Μέγιστη ακτινική ταχύτητα του πρωτεύοντος αστέρα
K_2 [Km/s] = 238.72	Μέγιστη ακτινική ταχύτητα του δευτερεύοντος αστέρα
P [days] = 0.5446	Τροχιακή περίοδος του συστήματος
$r_{1,pole} = 0.4092$	Απόσταση του κέντρου μάζας του πρωτεύοντος αστέρα από τον πόλο του (ως ποσοστό της απόστασης των αστέρων)
$r_{1,side} = 0.4362$	Απόσταση του κέντρου μάζας του πρωτεύοντος αστέρα από την εφαπτόμενη στην επιφάνεια που είναι παράλληλη στην ευθεία που συνδέει τους δύο αστέρες
$r_{1,back} = 0.4553$	Απόσταση του κέντρου μάζας του πρωτεύοντος αστέρα από την αντιδιαμετρική επιφάνεια από αυτήν που βρίσκεται απέναντι στον συνοδό του
$r_{2,pole} = 0.2914$	Απόσταση του κέντρου μάζας του δευτερεύοντος αστέρα από τον πόλο του
$r_{2,side} = 0.3039$	Απόσταση του κέντρου μάζας του δευτερεύοντος αστέρα από την εφαπτόμενη στην επιφάνεια που είναι παράλληλη στην ευθεία που συνδέει τους δύο αστέρες
$r_{2,back} = 0.3365$	Απόσταση του κέντρου μάζας του δευτερεύοντος αστέρα από την αντιδιαμετρική επιφάνεια από αυτήν που βρίσκεται απέναντι στον συνοδό του

I.1 Υπολογισμός των μαζών των αστέρων του συστήματος

Η σχέση που δίνει τη μάζα του κάθε μέλους είναι:

$$M_{1,2} = (1.0361 \times 10^{-7}) (1 - e^2)^{3/2} (K_1 + K_2)^2 K_{2,1} P (\sin i)^{-3} \quad [M_{\odot}] \quad (\Pi.1)$$

Επομένως τα σφάλματα που διαδίδονται στον υπολογισμό των μαζών είναι τα ακόλουθα: δe , δK_1 , δK_2 , δP και δi

I.2 Υπολογισμός των ημιαξόνων των τροχιών των αστέρων του συστήματος

Η σχέση που δίνει την απόσταση του κέντρου μάζας του κάθε αστέρα από το κέντρο μάζας του συστήματος είναι η:

$$a_{1,2} = (1.9758 \times 10^{-2}) (1 - e^2)^{3/2} K_{1,2} P (\sin i)^{-1} \quad [R_{\odot}] \quad (\Pi.2)$$

Στην παραπάνω σχέση υπεισέρχονται τα εξής σφάλματα: δe , $\delta K_{1,2}$, δP , και δi .

I.3 Υπολογισμός των ακτίνων των αστέρων του συστήματος

Η σχέση που δίνει την ακτίνα του κάθε μέλους είναι:

$$R_{1,2} = a \cdot r_{1,2} \quad (\Pi.3)$$

$$\text{όπου } \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \text{ και } r_{1,2} = (r_{1,2,pole} \cdot r_{1,2,side} \cdot r_{1,2,back})^{1/3} \quad (\Pi.4)$$

Στην παραπάνω σχέση όλες οι ποσότητες έχουν σφάλματα, δηλαδή υπάρχουν τα:

$\Delta r_{1,2,pole}$, $\Delta r_{1,2,side}$ και $\Delta r_{1,2,back}$

Στη σχέση $\Pi.3$ πρέπει να συνυπολογιστούν τα εξής σφάλματα: $\delta r_{1,2}$ και $\delta \alpha$.

I.4 Υπολογισμός των φωτεινοτήτων των αστέρων του συστήματος

Η σχέση που δίνει τη φωτεινότητα του κάθε αστήρα είναι:

$$\frac{L_{1,2}}{L_{\square}} = \left(\frac{R_{1,2}}{R_{\square}} \right)^2 \left(\frac{T_{1,2}}{T_{\square}} \right)^4 \Rightarrow L_{1,2} = R_{1,2}^2 \left(\frac{T_{1,2}}{T_{\square}} \right)^4 \quad (\Pi.5)$$

Τα $L_{1,2}$ και $R_{1,2}$ είναι εκφρασμένα σε ηλιακές μονάδες, ενώ τα $T_{1,2}$ σε Κ. Υπάρχουν τα εξής σφάλματα: $\delta R_{1,2}$, και $\delta T_{1,2}$. Η ενεργός θερμοκρασία του Ήλιου είναι $T_{\odot} = 5780\text{K}$.

I.5 Υπολογισμός των απόλυτων βολομετρικών μεγεθών των αστέρων του συστήματος

Η σχέση που δίνει το απόλυτο βολομετρικό μέγεθος των αστέρων είναι η εξής:

$$M_{bol,1,2} = 4.82 - 5 \log_{10}(R_{1,2}) - 10 \log_{10} \left(\frac{T_{1,2}}{T_{\square}} \right) \quad (\Pi.6)$$

Το $R_{1,2}$ είναι εκφρασμένο σε ηλιακές μονάδες, ενώ η $T_{1,2}$ σε Κ.

Στην παραπάνω σχέση υπεισέρχονται τα σφάλματα $\delta T_{1,2}$ και $\delta R_{1,2}$.

Βιβλιογραφία

- Carroll, B.W. & Ostlie, D.A., 2007, An introduction to Modern Astrophysics, pub. Pearson-Addison Wesley
- Δανέζης, Ε. & Θεοδοσίου, Ε. 1999, Εισαγωγή στην Αστροφυσική, τομ. Α', εκδ. Δίαυλος
- Shu, F., Αστροφυσική (Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος) Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991

A3. Αστρική εξέλιξη, Μέτρηση ηλικιών. Διάγραμμα Hertzsprung-Russell, Αστρικά Σμήνη



Φωτογραφία του σφαιρωτού σμήνους M15 στον Γαλαξία μας σε απόσταση 40,000 ετών φωτός στον αστερισμό του Πήγασου. Η φωτογραφία έχει ληφθεί με το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble.

Σκοπός της άσκησης

Ο κύριος σκοπός της άσκησης είναι:

- η κατανόηση των βασικών αρχών αστρικής δομής και εξέλιξης,
- η χρήση μίας από τις βασικότερες αστρονομικές τεχνικές (αστρική φωτομετρία),
- η εκτίμηση της ηλικίας ενός από τα αρχαιότερα αστρικά σμήνη του Γαλαξία μας χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Hertzsprung-Russell και θεωρητικές ισόχρονες καμπύλες,
- η εξαγωγή ενός κατώτερου ορίου για την ηλικία του Σύμπαντος.

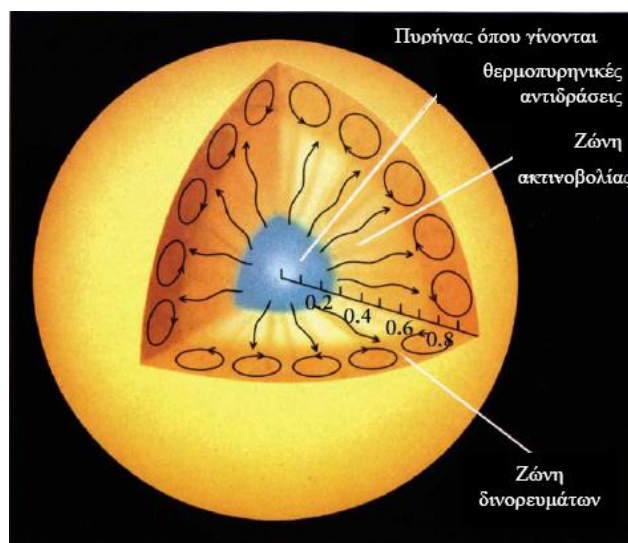
Βασικά στοιχεία θεωρίας

Αστρική δομή

Η εσωτερική δομή ενός αστέρα καθορίζεται από τις εξής βασικές αρχές (βλ. Shu 1991, Κεφ.5):

- *Υδροστατική ισορροπία:* Για να παραμείνει ένας αστέρας σε μηχανική ισορροπία, πρέπει η πίεση σε κάθε στιβάδα να ισούται με το βάρος στήλης υλικού, μοναδιαίας διατομής, που εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια.

- **Διάδοση ενέργειας:** Φωτόνια στο εσωτερικό του αστέρα μεταφέρουν με τυχαίο βηματισμό θερμότητα προς τα έξω, από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας. Στη φωτόσφαιρα του αστέρα, η κίνηση των φωτονίων μεταπίπτει από τον «βηματισμό» στην «πήδηση». Αν η ενέργεια που πρέπει να μεταφερθεί προς τα έξω υπερβαίνει κατά πολύ αυτήν που μπορεί να μεταφερθεί με σταθερή διάχυση ακτινοβολίας, δημιουργούνται δινορεύματα μεταφοράς.
- **Παραγωγή ενέργειας:** Για να βρίσκεται ένα άστρο σε θερμική ισορροπία, η ενέργεια που μεταφέρεται προς τα έξω με διάχυση ακτινοβολίας και με δινορεύματα διαμέσου οποιασδήποτε σφαιρικής επιφάνειας πρέπει να εξισορροπείται από ίση έκλυση πυρηνικής ενέργειας στο εσωτερικό της σφαίρας. Αν η πυρηνική πηγή δεν επαρκεί για αυτό, ακολουθεί βαρυτική συστολή. Το μέγεθος ενός ευσταθούς αστέρα έχει αυτορρυθμιστεί έτσι ώστε όση ενέργεια χάνεται από την επιφάνεια να αντισταθμίζεται ακριβώς από εκείνη που εκλύεται με πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό.



Σχ. 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της εσωτερικής δομής ενός αστέρα όπως ο Ήλιος.
(<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/f1803-SunInternal.jpg>)

Η αστρική δομή εξαρτάται από την **αρχική μάζα** και την **αρχική χημική σύνθεση** του αστέρα, αλλά και το στάδιο εξέλιξής του (την ηλικία του).

Οι μάζες των αστέρων μπορούν να μετρηθούν άμεσα από παρατηρήσεις των τροχιών διπλών αστρικών συστημάτων (βλ. άσκηση 2), ενώ η αρχική χημική σύνθεση μπορεί να βρεθεί με την ανάλυση των φασματικών γραμμών της ακτινοβολίας που προέρχεται από την φωτόσφαιρα του αστέρα (με την προϋπόθεση ότι τα πυρηνικά παράγωγα δεν έχουν φθάσει στην επιφάνεια, κάτι που δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις).

Σύμφωνα με σύγχρονες μελέτες, οι αστρικές μάζες κυμαίνονται από $0.08M_{\odot}$ μέχρι $100-150M_{\odot}$ (το άνω όριο είναι ακόμα υπό διερεύνηση, και μπορεί να είναι μεγαλύτερο σε ακραία περιβάλλοντα ή για πολύ χαμηλές μεταλλικότητες)³. Οι αστέρες μεγάλης μάζας έχουν αρκετά διαφορετική εξέλιξη από τους αστέρες μικρής και μεσαίας μάζας. Έχουν ιδιαίτερη σημασία μια και σε αυτούς δημιουργούνται τα βαρέα στοιχεία της ομάδας του σιδήρου, κατά το τέλος της ζωής τους (έκρηξη supernova).

Όσον αφορά στην **αρχική χημική σύνθεση των αστέρων**, αυτοί αποτελούνται σε ποσοστό ~73% κατά βάρος από υδρογόνο, ~25% από ήλιο και το υπόλοιπο από βαρύτερα στοιχεία (το ποσοστό των βαρύτερων στοιχείων φθάνει μέχρι 2-3% σε αστέρες όπως ο Ήλιος, αλλά είναι

³ Ο μεγαλύτερης μάζας αστέρας που έχει βρεθεί σε διπλό αστρικό σύστημα είναι $120-150M_{\odot}$ (ο R145 τύπου WN6ha, Schnurr et al. 2009 MNRAS, 397, 2049). Οι Crowther et al. (2010, 2010MNRAS.408..731C) υποστηρίζουν ότι το αστρικό σμήνος R136 στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου φιλοξενεί αρκετούς αστέρες με μάζες μεγαλύτερες από $150 M_{\odot}$, μέχρι $\sim 300M_{\odot}$.

πολύ χαμηλότερο σε αστέρες π.χ. σφαιρωτών σμηγνών, ενώ έχουν βρεθεί αστέρες (SDSS J102915+172927, MacDonald et al. 2013) με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε μέταλλα ($<7.4 \times 10^{-7}$).

Αστρική εξέλιξη - διάγραμμα Hertzsprung-Russell

Η εξέλιξη ενός αστέρα καθορίζεται από την κατανάλωση διαδοχικών «κύκλων» πυρηνικών καυσίμων, καθώς ο αστέρας προσπαθεί να αντισταθεί στην ιδιοβαρύτητά του και στην συνεχή ροή θερμότητας προς τα έξω.

Η εξέλιξη ενός αστέρα, όσον αφορά τον χρόνο ζωής του, τα στάδια από τα οποία περνά, τον τρόπο με τον οποίο τερματίζεται η «ζωή» του (αλλά και το είδος των στοιχείων που απελευθερώνει στο μεσοαστρικό περιβάλλον), καθορίζεται κυρίως από την αρχική του μάζα (αλλά και από την αρχική χημική του σύνθεση).

Πολλές ιδιότητες των αστέρων και της εξέλιξής τους μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση του **διαγράμματος Hertzsprung-Russell (HR)**. Το θεωρητικό διάγραμμα HR είναι η γραφική παράσταση της φωτεινότητας, L συναρτήσει της ενεργού θερμοκρασίας του, T_{eff} για ένα σύνολο από αστέρες. Το αντίστοιχο παρατηρησιακό διάγραμμα HR μπορεί να έχει ως μεταβλητές το απόλυτο μέγεθος και τον φασματικό τύπο ή τον δείκτη χρώματος των αστέρων (στην τελευταία περίπτωση ονομάζεται και διάγραμμα χρώματος-μεγέθους).

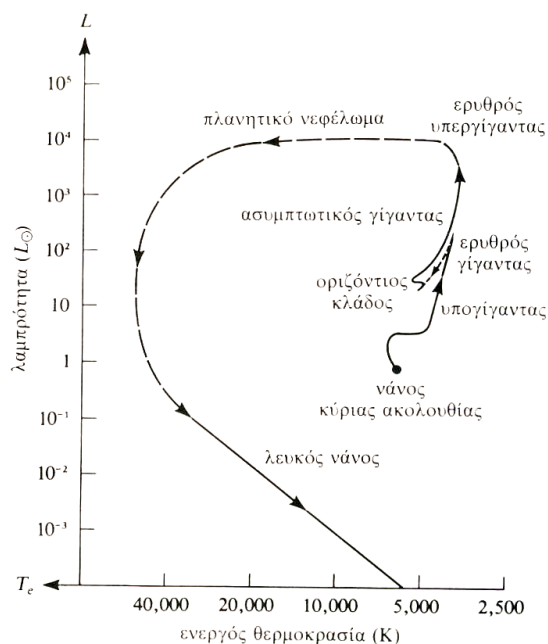
Οι περισσότεροι αστέρες όταν απεικονιστούν σε ένα τέτοιο διάγραμμα, καταλαμβάνουν μια διαγώνια ζώνη, που ονομάζεται **κύρια ακολουθία (KA)**. Οι αστέρες της κύριας ακολουθίας αντλούν την ενέργειά τους από την σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο στον πυρήνα τους. Κύριο χαρακτηριστικό της εσωτερικής τους δομής στη φάση αυτή είναι η χημική ομοιογένεια (πλην της κεντρικής περιοχής όπου γίνεται η πυρηνική σύντηξη). Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη θέση ενός αστέρα της KA στο διάγραμμα HR είναι η μάζα του, με τους μεγαλύτερης μάζας αστέρες να έχουν μεγαλύτερες λαμπρότητες και θερμοκρασίες. Η μάζα είναι εκείνη που καθορίζει και το χρονικό διάστημα για το οποίο ο αστέρας παραμένει στην KA (καθώς ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από τον αστέρα λόγω ακτινοβολίας συνεπάγεται φωτεινότητα $L \propto M^4$).

Μετά την KA ένας αστέρας μάζας παρόμοιας με του ήλιου θα ανέβει τον λεγόμενο **κλάδο των ερυθρών γιγάντων (ΕΓ)**. Η πηγή ενέργειας του αστέρα στην περίπτωση αυτή είναι η σύντηξη υδρογόνου σε φλοιό γύρω από τον πυρήνα. Η φάση αυτή τερματίζεται με την έναρξη της σύντηξης ηλίου στον πυρήνα (helium flash), στο άνω άκρο του κλάδου των ΕΓ. Μετά την **ανάφλεξη ηλίου**, ο αστέρας εισέρχεται στον λεγόμενο **οριζόντιο κλάδο (ΟΚ)**, όπου οι πηγές ενέργειας είναι δύο, η σύντηξη ηλίου σε άνθρακα στον πυρήνα και η σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο σε φλοιό γύρω από τον πυρήνα.

Μετά την εξάντληση του ηλίου στον πυρήνα, ο αστέρας ανεβαίνει και πάλι τον κλάδο των γιγάντων, τον λεγόμενο **ασυμπτωτικό κλάδο**, όπου ο ανενεργός πυρήνας C-O περιβάλλεται από δύο ενεργούς φλοιούς, στον εσωτερικό συνεχίζεται η σύντηξη ηλίου και στον εξωτερικό η σύντηξη υδρογόνου. Στη φάση αυτή ο αστέρας υπόκειται σε μια σειρά θερμικών ταλαντώσεων επαναφοράς, οδηγείται σε μεγάλη απώλεια μάζας (δημιουργία πλανητικού νεφελώματος), ενώ το αστρικό υπόλειμμα είναι ένας **λευκός νάνος (ΛΝ)** άνθρακα-οξυγόνου, όπου η ιδιοβαρύτητα εξισορροπείται από την πίεση λόγω εκφυλισμού των ηλεκτρονίων στο ΛΝ.

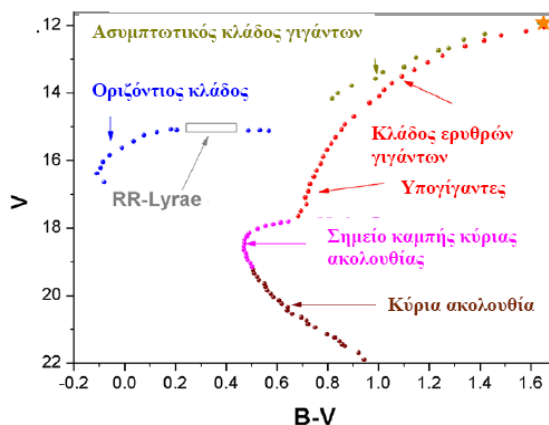
Το παρακάτω διάγραμμα δίνει μια σχηματική παράσταση αυτών των βασικών σταδίων εξέλιξης ενός αστέρα μικρής σχετικής μάζας.

Η εξέλιξη αστέρων μεγάλης μάζας ($>6-8 M_{\odot}$) είναι και ποιοτικά και ποσοτικά διαφορετική από την εξέλιξη μικρότερων αστέρων. Εξελίσσονται πολύ γρηγορότερα, είναι πολύ λαμπρότεροι, και παρά την σημαντική απώλεια μάζας στη διάρκεια της ζωής τους, η ιδιοβαρύτητά τους είναι αρκετή για να επιτευχθούν επαρκείς πιέσεις και θερμοκρασίες στον πυρήνα τους ώστε να προχωρήσει η πυρηνική σύντηξη μέχρι και την ομάδα των στοιχείων του σιδήρου, από όπου είναι αδύνατη η περαιτέρω εξαγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης. Η συνεχιζόμενη βαρυτική κατάρρευση οδηγεί τελικά σε έκρηξη supernova, που αφήνει πίσω της ένα αστρικό υπόλειμμα, είτε αστέρα νετρονίων, είτε μαύρη τρύπα.



Σχ. 3.2 Αστρική εξέλιξη ενός αστέρα μικρής σχετικά μάζας (σαν τον Ήλιο). Τα τόξα δείχνουν την ροή της εξέλιξης.

Πηγή: Shu, F., Αστροφυσική (Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος) Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991



Σχ. 3.3 Σχηματικό διάγραμμα HR ενός γηραιού σφαιρωτού σμήνους.

Αστρικά Σμήνη

Τα αστρικά σμήνη είναι συστήματα αστέρων με δυναμική συνοχή που καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο και συνδέονται με ισχυρές αμοιβαίες έλξεις, ώστε να διατηρούν την συνοχή τους για μακρά χρονικά διαστήματα, για τη συγκεκριμένη κατανομή ταχυτήτων που έχουν τα μέλη του σμήνους. Στον γαλαξία μας τα αστρικά σμήνη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

α. Ανοιχτά σμήνη και β. Σφαιρωτά σμήνη

Τα αστρικά σμήνη πιστεύουμε ότι δημιουργήθηκαν από γιγάντια μοριακά νέφη. Σε πρώτη προσέγγιση δεχόμαστε ότι οι αστέρες ενός αστρικού σμήνους δημιουργήθηκαν ταυτόχρονα, δηλαδή έχουν κοινή ηλικία και εφ' όσον δημιουργήθηκαν από την ίδια μεσοαστρική ύλη, έχουν και κοινή αρχική περιεκτικότητα σε στοιχεία όπως υδρογόνο (X), ήλιο (Y) και μέταλλα⁴ (Z). Σύγχρονες μελέτες πάντως έχουν δείξει ότι υπάρχουν διαφορετικές γενεές αστέρων μέσα στα σμήνη, με διαφορά τόσο στην ηλικία όσο και στην χημική σύνθεση (Gratton et al. 2012, 2012A&ARv..20...50G).

(α) Σφαιρωτά Σμήνη

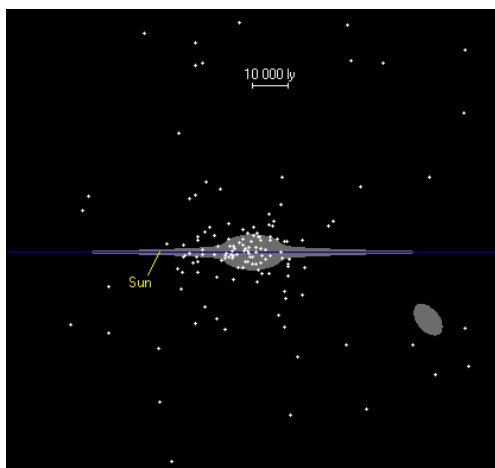
Τα σφαιρωτά σμήνη είναι εντυπωσιακά συστήματα χιλιάδων έως και εκατοντάδων χιλιάδων αστέρων που εμφανίζουν μεγάλη δυναμική συνοχή και καταλαμβάνουν σχετικά μικρό όγκο στον χώρο, με χαρακτηριστικές διαμέτρους από μερικές δεκάδες μέχρι περίπου 200 έτη φωτός. Οι τυπικές μάζες των σφαιρωτών σμηνών κυμαίνονται μεταξύ 10^4 - 10^6 $M_{\odot}$. Τα σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία μας είναι από τα αρχαιότερα αντικείμενα («απολιθώματα» της εποχής της δημιουργίας

⁴ Θυμίζουμε ότι σύμφωνα με την αστρονομική ορολογία *μέταλλα* ονομάζονται όλα τα στοιχεία που είναι βαρύτερα του χημικού στοιχείου ήλιο, δηλαδή όσα έχουν περισσότερα από δύο πρωτόνια στον πυρήνα τους, Li, B, Ba, δηλαδή σε αυτή την αστρονομική ορολογία μέταλλα ονομάζονται και όλα τα αμέταλλα πλην του υδρογόνου και του ηλίου. Το άθροισμα των περιεκτικότητων (ή αφθονιών) X, Y και Z είναι ίσο με τη μονάδα, $X+Y+Z=1$.

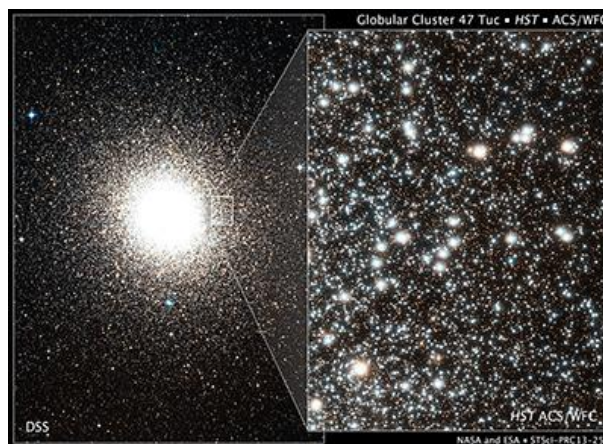
του Γαλαξία) στον Γαλαξία. Το συμπαγές σχήμα τους και οι μεγάλες μάζες τους τα καθιστούν παρατηρήσιμα και σε άλλους γαλαξίες.

Το πρώτο σφαιρωτό σμήνος ανακαλύφθηκε το 1665 από τον Γερμανό ερασιτέχνη αστρονόμο Abraham Ihle. Σήμερα είναι γνωστά 157 σφαιρωτά σμήνη στον Γαλαξία μας (κατάλογος Harris 2010). Μεγαλύτεροι γαλαξίες μπορεί να έχουν μεγαλύτερο αριθμό σφαιρωτών σμηνών. Π.χ. η Ανδρομέδα (M31), ο πλησιέστερος σπειροειδής γαλαξίας, έχει περίπου 340 επιβεβαιωμένα σφαιρωτά σμήνη (και άλλα 700 υποψήφια), ενώ κάποιοι γιγαντιαίοι ελλειπτικοί γαλαξίες μπορεί να περιέχουν αρκετές χιλιάδες σμήνη.

Τα σφαιρωτά σμήνη αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για την θεωρητική και παρατηρησιακή αστροφυσική, καλύπτοντας θέματα από το εσωτερικό των αστέρων μέχρι τη κοσμολογία. Αποτελούν την παρατηρησιακή θεμελίωση της αστροφυσικής των αστέρων και της αστρικής εξέλιξης. Επίσης, χρησιμοποιούνται για να οριοθετήσουν την ιστορία αστρικής δημιουργίας σε γαλαξίες αλλά και τις διαδικασίες πυρηνοσύνθεσης κατά την αστρική εξέλιξη. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την εκτίμηση της αρχικής συνάρτησης μαζών (initial mass function) που αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα της αστροφυσικής σήμερα. Βοηθούν στον καθορισμό της κλίμακας αποστάσεων στο Σύμπαν, ενώ η ηλικία των γηραιότερων από αυτά αποτελούν ένα σημαντικό κάτω όριο για την ηλικία του Σύμπαντος. Τέλος η κατανομή και οι ιδιότητές τους σχετίζονται με τη διαδικασία γαλαξιακής δημιουργίας και του ρόλου της σκοτεινής ύλης στην διαδικασία αυτή.



Σχ. 3.4 Η κατανομή των σφαιρωτών σμηνών στον γαλαξία μας. Σχηματικά παρουσιάζονται ο δίσκος και το κεντρικό εξόγκωμα του γαλαξία, αν τον παρατηρούσαμε από το πλάι «edge-on».



Σχ. 3.5. Το σφαιρωτό σμήνος του νοτίου ημισφαιρίου, 47 Tuc, όπως παρατηρήθηκε με το HST (Hubble Space Telescope)
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star%20clusters/globular/2013/25/image/a/format/web/>

(β) Ανοικτά σμήνη

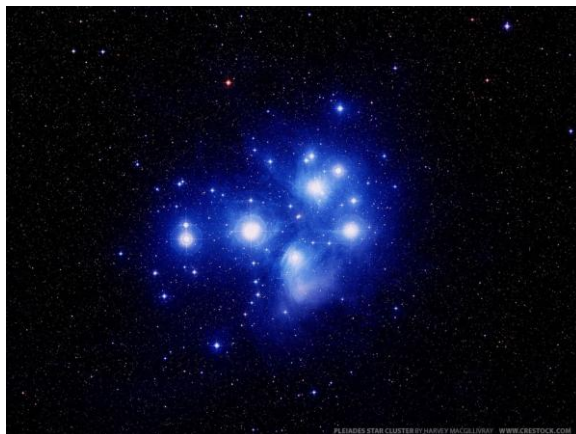
Ανοικτά σμήνη είναι ομάδες αστέρων που δημιουργήθηκαν από το ίδιο μοριακό νέφος και έχουν την ίδια ηλικία (σε πρώτη προσέγγιση).

Συνήθως τα ανοικτά σμήνη περιλαμβάνουν μερικές εκατοντάδες αστέρες, που παρουσιάζονται ως μια σαφής αλλά σχετικά χαλαρή (και συχνά ακανόνιστη) συγκέντρωση αστέρων σε μια περιοχή του ουρανού, διαμέτρου της τάξης των 10 ετών φωτός. Αν και εμφανίζουν δυναμική συνοχή, τα περισσότερα ανοικτά σμήνη διαλύονται σταδιακά ως αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων με άλλα σμήνη, μοριακά νέφη κλπ μέσα σε μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια.

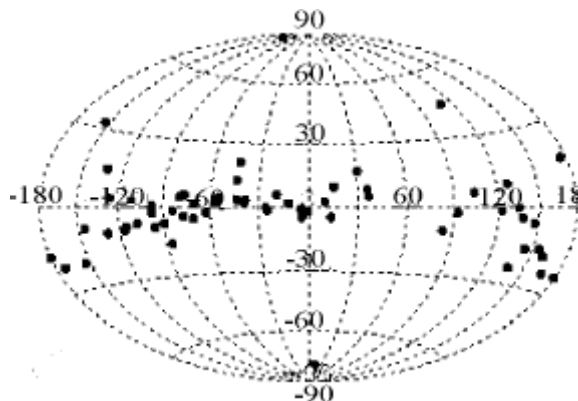
Λόγω της γενικά μικρής αριθμητικής πυκνότητας των ανοικτών σμηνών, και της προβολής μεγάλου αριθμού αστέρων πεδίου στην ίδια περιοχή του ουρανού, χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες (ακτινικές ταχύτητες και ίδιες κινήσεις) για να βρεθούν τα μέλη του σμήνους και να κατασκευαστεί το αντίστοιχο διάγραμμα HR.

Στον Γαλαξία μας έχουν καταγραφεί 1058 ανοικτά σμήνη (βλ. βάση δεδομένων WEBDA <http://www.univie.ac.at/webda/>). Τα σμήνη αυτά είναι συγκεντρωμένα κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο, γι' αυτό ονομάζονται και *γαλαξιακά σμήνη*. Τα νεώτερα ανοικτά σμήνη –που περιέχουν ως μέλη τους προγενέστερα αστέρια φασματικών τύπων O μέχρι B2– συγκεντρώνονται στις σπείρες του Γαλαξία μας και αποτελούν καλούς δείκτες για τον προσδιορισμό της θέσης των σπειρών. Τα παλαιότερα ανοικτά σμήνη έχουν τυχαία κατανομή στο γαλαξιακό επίπεδο.

Καθώς τα ανοικτά σμήνη έχουν ηλικίες πολύ μικρότερες των σφαιρωτών σμηνών, περιλαμβάνουν νεώτερους και επομένως μεγαλύτερης μάζας αστέρες. Τα νεώτερα ανοικτά σμήνη περιέχουν αστέρες στα πρώτα στάδια της εξέλιξής τους. Έτσι, τα ανοικτά σμήνη είναι ιδανικά συστήματα για τη μελέτη των αρχικών φάσεων στη ζωή των αστερων, αλλά και για την μελέτη της εξέλιξης αστερων μεσαίας και μεγάλης μάζας.



Σχ. 3.6 Οι Πλειάδες είναι ένα γνωστό ανοικτό σμήνος του Γαλαξία μας



Σχ. 3.7 Κατανομή ανοικτών σμηνών στον γαλαξία μας. Τα ανοικτά σμήνη βρίσκονται στον γαλαξιακό δίσκο.



Σχ. 3.8 Ο δίσκος του Γαλαξία εμπεριέχει μεγάλα ποσά σκόνης που κάνουν μεγάλες περιοχές του αδιαφανείς στα ορατά μήκη κύματος. Με το υπέρυθρο τηλεσκόπιο επισκόπησης VISTA ανακαλύφθηκαν πρόσφατα (2011) 30 ανοικτά σμήνη «θαμμένα» μέσα στη σκόνη (που είναι πιο διαφανής στο υπέρυθρο) <http://www.eso.org/public/news/eso1128/>

Μέτρηση ηλικίας αστρικού σμήνους

Η εκτίμηση της ηλικίας ενός σμήνους από το διάγραμμα HR βασίζεται στο γεγονός ότι ο χρόνος που παραμένει ένας αστέρας στην ΚΑ εξαρτάται από την μάζα του.

Στο διπλανό σχήμα παρουσιάζεται μια σειρά από διαγράμματα HR σμηνών διαφορετικών ηλικιών. Η συνεχής γραμμή παριστά την κύρια ακολουθία μηδενικής ηλικίας (zero-age main sequence – ZAMS). Κατά μήκος της κατανέμονται όλοι οι αστέρες του σμήνους (έχουμε υποθέσει ότι όλοι οι αστέρες του σμήνους φθάνουν ταυτόχρονα στην ΚΑ, δηλ. αρχίζουν ταυτόχρονα τη καύση Η στον πυρήνα τους).

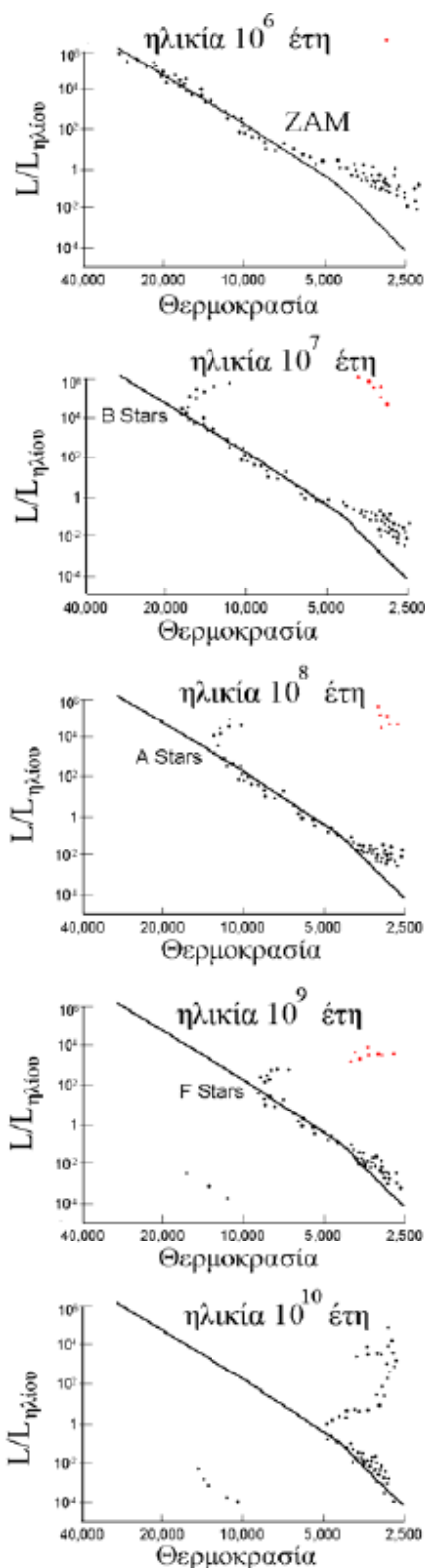
Το πρώτο διάγραμμα δείχνει ένα πολύ νέο σμήνος, του οποίου οι περισσότεροι αστέρες είναι ακόμα στην ΚΑ. Στο δεύτερο διάγραμμα, το σμήνος έχει 10-πλάσια ηλικία, οπότε οι αστέρες μεγάλης μάζας έχουν εξελιχθεί πέρα από το στάδιο καύσης Η στον πυρήνα τους και έχουν εγκαταλείψει την ΚΑ. Έτσι δημιουργείται η λεγόμενη «εκτροπή» από την ΚΑ (main sequence turnoff). Καθώς αυξάνεται η ηλικία του σμήνους, όλο και μικρότερης μάζας αστέρες αφήνουν την ΚΑ, οπότε η «εκτροπή» από την ΚΑ συμβαίνει σε αμυδρότερα μεγέθη και χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Έτσι, από το σημείο εκτροπής του διαγράμματος HR των σμηνών μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την ηλικία των σμηνών με βάση τις θεωρίες της αστρικής εξέλιξης. Η ακριβής θέση του σημείου εκτροπής της ΚΑ εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από την περιεκτικότητα σε μέταλλα των αστέρων του σμήνους.

Πρακτικά, για να μετρήσουμε την ηλικία ενός σμήνους (είτε ανοικτού είτε σφαιρωτού), χρειαζόμαστε:

- Ένα διάγραμμα δείκτη χρώματος – φαινομένου μεγέθους, που να φθάνει σε αρκετά αμυδρά μεγέθη ώστε να επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό του σημείου εκτροπής από την ΚΑ. Για το σκοπό αυτό χρειάζονται εικόνες του σμήνους μέσα από δύο διαφορετικά φίλτρα, π.χ. Β και V.
- Την απόσταση του σμήνους από τη Γη, ώστε να μπορέσουμε να μετατρέψουμε τα φαινόμενα μεγέθη σε απόλυτα.
- Την μεσοαστρική ερύθρωση που χρειάζεται για να διορθώσουμε τις τιμές του δείκτη χρώματος, ώστε να αντιστοιχούν στα πραγματικά χρώματα των αστέρων.

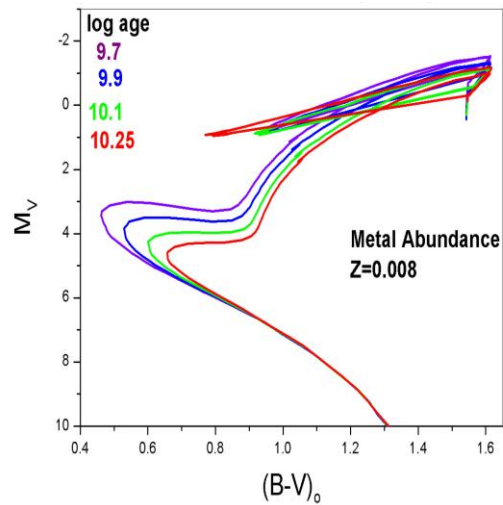
Την περιοεκτικότητα σε μέταλλα των αστέρων του σμήνους, καθώς αυτή επηρεάζει την αστρική εξέλιξη.



Σχ. 3.9 διαγράμματα HR σμηνών διαφόρων ηλικιών

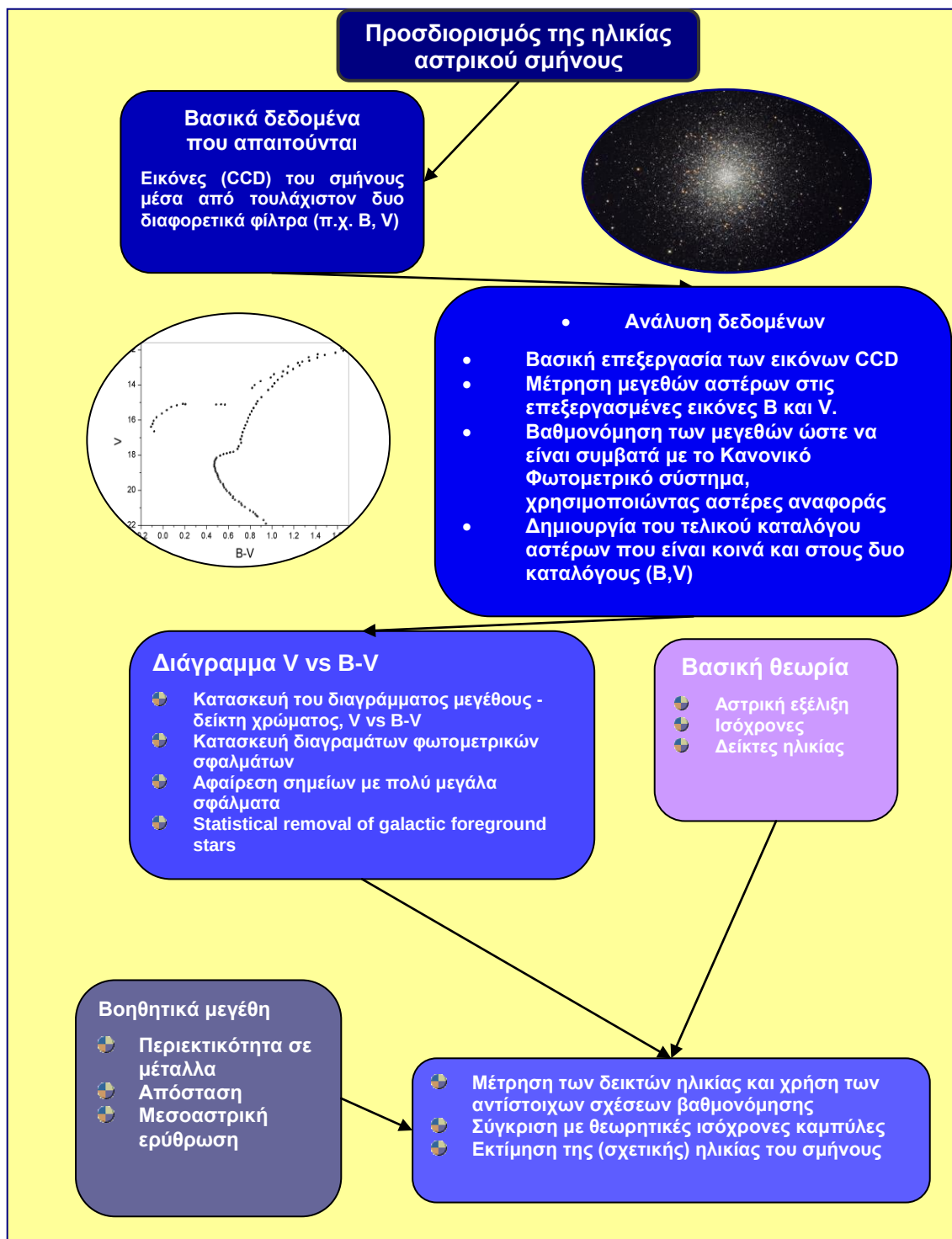
Αφού μετατρέψουμε το παρατηρησιακό διάγραμμα από π.χ. (V, B-V) σε (M_V , (B-V)₀), χρησιμοποιούμε τις λεγόμενες θεωρητικές ισόχρονες (κατάλληλης μεταλλικότητας) για να εκτιμήσουμε την ηλικία του σμήνους (βλ. σχ. 3.10).

Οι λεγόμενες **θεωρητικές ισόχρονες** (για μία συγκεκριμένη μεταλλικότητα) προκύπτουν από τις **τροχιές εξέλιξης** (evolutionary tracks) αστερών διαφορετικής μάζας. Η τροχιά εξέλιξης ενός αστερά είναι η καμπύλη που ακολουθεί ο αστέρας αυτός πάνω σε ένα θεωρητικό διάγραμμα H-R καθώς περνά από τα διαφορετικά εξελικτικά στάδια που συζητήσαμε προηγουμένως. Οι τροχιές εξέλιξης, με τη σειρά τους, κατασκευάζονται με βάση έναν κώδικα αστρικής εξέλιξης, που υπολογίζει την χρονική εξέλιξη ενός αστρικού μοντέλου για μια δεδομένη μάζα και μεταλλικότητα.



Σχ. 3.10 Θεωρητικές ισόχρονες (βασισμένες στον εξελικτικό κώδικα της Padova)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να εκτιμήσουμε την ηλικία ενός σμήνους, με βάση τις ισόχρονες, όπως π.χ. η μέθοδος **δV**, που χρησιμοποιεί την διαφορά μεταξύ του μέσου μεγέθους των αστερών του οριζοντίου κλάδου και του σημείου καμπής της ΚΑ. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε την απόσταση και την μεσοαστρική ερύθρωση του σμήνους. Βέβαια, η βαθμονόμηση του δείκτη γίνεται με βάση τις θεωρητικές ισόχρονες. Εδώ, θα συγκρίνουμε απευθείας τα παρατηρησιακά διαγράμματα H-R, με τις θεωρητικές ισόχρονες. Πρέπει τέλος να σημειώσουμε ότι υπάρχουν διαφορετικοί κώδικες αστρικής εξέλιξης με κάπως διαφορετικές υποθέσεις, που οδηγούν σε διαφορετικές ηλικίες. Συνεπώς, πάντα αναφέρουμε σε ποιες ισόχρονες βασιζόμαστε όταν εκτιμούμε την ηλικία ενός πληθυσμού. Στην ουσία, η χρήση των ισόχρονων οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα για την **σχετική, και όχι την απόλυτη ηλικία** διαφορετικών σμηνών.



Δεδομένα της άσκησης

Θα μελετήσουμε ένα σφαιρωτό και ένα ανοικτό σμήνος του Γαλαξία μας.

Θα χρησιμοποιήσουμε φωτομετρικά δεδομένα για τα δύο σμήνη που δίνονται σε δύο αντίστοιχα αρχεία EXCEL.

(α) Το σφαιρωτό σμήνος NGC 6934

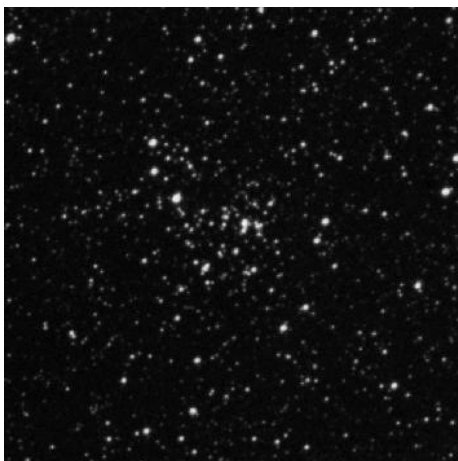


Ορθή αναφορά RA 20 34 11.49 (J2000)
Απόκλιση Dec +07 24 14.9 (J2000)
Απόσταση από τον Ήλιο 15.6 kpc
Απόσταση από το γαλαξιακό κέντρο 12.8 kpc
Μεσοαστρική ερύθρωση $E(B-V)=0.10$
Μεταλλικότητα $[Fe/H]=-1.47 \text{ dex}^5$
(dex=decades)

Σχ. 3.11 Φωτογραφία του σμήνους με το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble

Ο πίνακας που σας δίνεται (αρχείο excel) περιέχει 6 στήλες. Οι δυο πρώτες αφορούν τις καρτεσιανές συντεταγμένες κάθε αστέρα στην εικόνα CCD, με αυθαίρετη αρχή το (0,0) στο κάτω αριστερό άκρο. Οι επόμενες δύο στήλες είναι βαθμονομημένα μεγέθη V και B . Σημειώνεται ότι οι παρατηρήσεις έγιναν με το Διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (Piotto et al. 2002A&A...391..945) μέσα από δύο φίλτρα διαφορετικών χαρακτηριστικών από τα standard φίλτρα B και V . Οι σχετικές διορθώσεις έχουν ήδη γίνει. Οι επόμενες δύο στήλες δίνουν τα σφάλματα της φωτομετρίας (στα μη βαθμονομημένα μεγέθη). Οι μετρήσεις είναι αρχειοθετημένες (με ελεύθερη πρόσβαση) στον κατάλογο **J/A+A/391/945/table2** στον ιστότοπο <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-4>.

(β) Το ανοικτό σμήνος Pismis 18



Ορθή αναφορά RA 13 36 55 (J2000)
Απόκλιση Dec -62 05 36 (J2000)
Απόσταση από τον Ήλιο $2.24 \pm 0.41 \text{ kpc}$
Απόσταση από το γαλαξιακό κέντρο 7.53 kpc
Μεσοαστρική ερύθρωση $E(B-V)=0.50 \pm 0.05$
Μεταλλικότητα $[Fe/H] \sim 0.0$ (δηλ. είναι ίδια περίπου με την μεταλλικότητα του ήλιου)

Σχ. 3.12 Φωτογραφία του σμήνους από τη βάση δεδομένων για ανοικτά σμήνη WEBDA

Τα δεδομένα για το Pismis 18 (αντίστοιχος πίνακας σε αρχείο excel) προέρχονται από την εργασία των Piatti et al. 1998 (Astron. J. 116, 801) και είναι αρχειοθετημένα στη βάση δεδομένων WEBDA (με ελεύθερη πρόσβαση). Το αρχείο που σας δίνεται περιέχει ουρανογραφικές συντεταγμένες καθώς και τα B και V μεγέθη για το σμήνος αυτό.

⁵ $[Fe/H] = \log Z - \log Z_{\odot}$

Βήματα της Άσκησης

Για κάθε ένα από τα δύο σμήνη:

1. Υπολογίστε τον δείκτη χρώματος $B-V$ για κάθε αστέρα (στο αρχείο excel).
2. Κατασκευάστε το παρατηρησιακό διάγραμμα HR, δείκτη χρώματος- μεγέθους (V vs $B-V$). Φροντίστε οι θερμοκρασίες να μειώνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά (στον οριζόντιο άξονα), ενώ τα μεγέθη (στον κατακόρυφο άξονα) να ξεκινούν από τους αμυδρότερους αστέρες (κάτω) προς τους λαμπρότερους (πάνω).
3. Κατασκευάστε τα διαγράμματα σφαλμάτων $errV$ vs V και $errB$ vs B , για το σμήνος NGC6934. Τι παρατηρείτε;
4. Μετατρέψτε το φαινόμενο μέγεθος σε απόλυτο και διορθώστε τους δείκτες χρώματος ώστε να μην περιλαμβάνουν την μεσοαστρική ερυθρόωση.
5. Κατασκευάστε το νέο διορθωμένο διάγραμμα HR, M_V vs $(B-V)_0$.
6. Χρησιμοποιήστε το αρχείο με τις ισόχρονες που σας δίνεται. Επιλέξτε την κατάλληλη ομάδα ισόχρονων με βάση την μεταλλικότητα του σμήνους, και επιλέξτε τις ισόχρονες που καλύτερα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις σας. Προσθέστε τις ισόχρονες στο διάγραμμα HR που έχετε κατασκευάσει (με συνεχείς γραμμές διαφορετικού χρώματος).
7. Εκτιμήστε από αυτή τη διαδικασία την ηλικία του σμήνους και το σχετικό σφάλμα.
8. Αναγνωρίστε τις χαρακτηριστικές φάσεις αστρικής εξέλιξης πάνω στα διαγράμματα HR που κατασκευάσατε (κύρια ακολουθία, κλάδος γιγάντων, ασυμπτωτικός κλάδος, οριζόντιος κλάδος).
9. Ποιοτική σύγκριση των διαγραμμάτων για τα δύο σμήνη – πώς διαφοροποιεί η ηλικία τη μορφή των διαγραμμάτων.
10. Μελετήστε την επίδραση της περιεκτικότητας σε μέταλλα στον υπολογισμό της ηλικίας ενός σμήνους, χρησιμοποιώντας τις ισόχρονες.
11. Διατυπώστε περιληπτικά τα αποτελέσματα και τα κύρια συμπεράσματά σας.

Βιβλιογραφία

- Allen's Astrophysical Quantities, 4th edition, A. Cox editor, 2000.
- Carroll, B.W. & Ostlie, D.A., 2007, An introduction to Modern Astrophysics, pub. Pearson-Addison Wesley
- Shu, F., Αστροφυσική (Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος) Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991
- MacDonald, J., Lawlor, T. M., Anilmis, N., Rufo, N. F., 2013, MNRAS, 431,1425
- Harris, W.E., globular cluster catalog <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>, last update 2010
- Piatti, et al. 1998, AJ, 116, 801
- Piotto, et al. 2002, A&A, 391, 945
- WEBDA <http://www.univie.ac.at/webda/>

A4. Η διαστολή του Σύμπαντος. Μέτρηση της σταθεράς του Hubble



Ο σπειροειδής γαλαξίας M51
<http://hubblesite.org/gallery/>

Σκοπός της άσκησης

Ο κύριος σκοπός της άσκησης είναι:

- Γαλαξίες – μορφολογική ταξινόμηση Hubble
- Προσεγγιστική μέθοδος εκτίμησης των αποστάσεων σπειροειδών γαλαξιών. Η κατανόηση της σημασίας της μέτρησης των αποστάσεων στο Σύμπαν και των εγγενών δυσκολιών. Η έννοια της κλίμακας αποστάσεων (distance ladder)
- Η έννοια της ερυθρομετατόπισης των γαλαξιών και ο προσδιορισμός της,
- Σσε συνδυασμό με μετρήσεις ερυθρομετατόπισης για τους ίδιους γαλαξίες, η κατασκευή του διαγράμματος Hubble, η διαπίστωση της διαστολής του Σύμπαντος και η εκτίμηση της σταθεράς του Hubble.

Βασικά στοιχεία θεωρίας

Γαλαξίες

Οι γαλαξίες είναι δυναμικά συνεκτικά συστήματα αστέρων, αερίου, σκόνης και «σκοτεινής» ύλης, με μάζες που κυμαίνονται από $\sim 10^7 M_\odot$ (νάνοι γαλαξίες) μέχρι $\sim 10^{14} M_\odot$ (γιγαντιαίοι ελλειπτικοί στα κέντρα σμηνών γαλαξιών) και χαρακτηριστικά μεγέθη (D25) από 10^{-1} μέχρι 10^3 kpc.

Υπάρχουν δισεκατομμύρια γαλαξίες στο Σύμπαν. Οι γαλαξίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη μορφολογία τους, κατάλληλους δείκτες χρώματος, φασματοσκοπικά χαρακτηριστικά (γραμμές εκπομπής/απορρόφησης), ή την φασματική τους κατανομή σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (έτσι π.χ. ξεχωρίζουν οι ραδιογαλαξίες). Η πιο γνωστή μέθοδος ταξινόμησης γαλαξιών είναι η μορφολογική **ταξινόμηση Hubble** (βασισμένη σε οπτικές παρατηρήσεις γαλαξιών). Ο Hubble χώρισε τους γαλαξίες σε τύπους που κυμαίνονται από ομαλούς ελλειπτικούς, E, στο ένα άκρο, μέχρι τους ανώμαλους, Irr, γαλαξίες στο άλλο άκρο. βλ. Σχ. 4.1β.

Σπειροειδείς τύπου S (spirals)

Οι γαλαξίες αυτοί είναι οι πιο εντυπωσιακοί. Αποτελούνται συνήθως από ένα λαμπρό πυρήνα, το κεντρικό «εξόγκωμα», το δίσκο που περιλαμβάνει τις λεγόμενες σπείρες, και την άλω. Ανάλογα με τη διάμετρο τη φωτεινότητα του πυρήνα και τη μορφή των περιελίξεων των σπειρών τους, υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες: Sa (με λαμπρούς πυρήνες και κλειστές σπείρες, Sb (με κάπως αμυδρότερους πυρήνες και πιο ανοικτές σπείρες) και Sc (με αμυδρούς και μικρούς πυρήνες και πολύ ανοικτές σπείρες).

Σπειροειδείς τύπου SB – Ραβδωτοί σπειροειδείς (barred spirals)

Στους γαλαξίες αυτούς, οι σπείρες δεν ξεκινούν εφάπτομενικά από τον πυρήνα, αλλά από τα άκρα μιας «ράβδου». Οι γαλαξίες SB χωρίζονται επίσης σε υποκατηγορίες a,b,c, όπως και οι τύπου S. (Σχ. 4.1α)

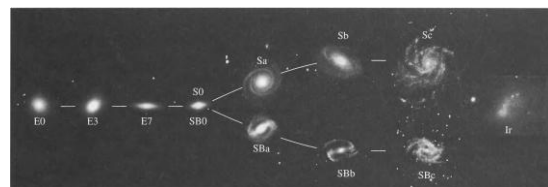
Ελλειπτικοί γαλαξίες

Οι ελλειπτικοί γαλαξίες έχουν τριαξονικό ελλειψοειδές σχήμα, δεν έχουν δίσκο ή σπείρες, και χωρίζονται σε οκτώ τύπους ανάλογα με την ελλειπτικότητά τους, $\varepsilon = 1 - b/a$ (όπου a και b είναι ο μεγάλος και μικρός ημιάξονας της φαινομένης έλλειψης) από τον τύπο E0, που είναι ο πιο σφαιρικός έως τον E7 τον πιο πεπλατυσμένο.

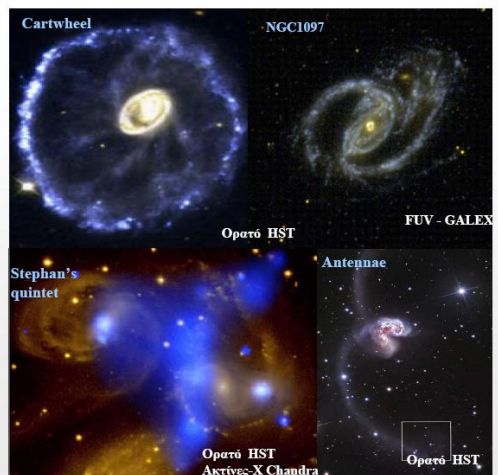
Μία ενδιάμεση κατηγορία μεταξύ των ελλειπτικών και των σπειροειδών γαλαξιών είναι οι λεγόμενοι **φακοειδείς (lenticular) γαλαξίες**, τύπου S0, ή, SB0. Οι γαλαξίες αυτοί έχουν δίσκο αλλά χωρίς σπείρες, και με πολύ λίγο αέριο και σκόνη. (Σχ. 4.1β)



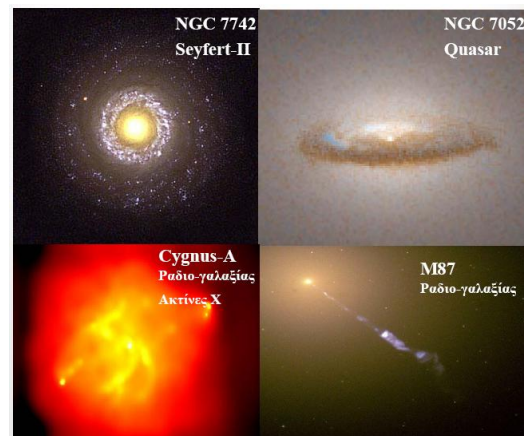
Σχ. 4.1α Βασικά είδη γαλαξιών



Σχ.4.1β Ταξινόμηση Γαλαξιών κατά Hubble (σχ. από Carroll & Ostlie)



Σχ. 4.1γ Αλληλεπιδρώντες γαλαξίες



Σχ. 4.1δ Γαλαξίες με ενεργούς πυρήνες

Ανώμαλοι ή ακανόνιστοι γαλαξίες (τύπου Irr – irregulars)

Ένα μικρό ποσοστό γαλαξιών δεν παρουσιάζουν εμφανή συμμετρία. Η κατανομή της ύλης τους είναι ακανόνιστη. (Σχ. 4.1γ)

Οι αλληλεπιδρώντες γαλαξίες εμφανίζουν συχνά εντυπωσιακές παραμορφώσεις και αποκλίσεις από τους κλασικούς μορφολογικούς τύπους (βλ. Σχ. 4.1α)

Η φασματική κατανομή των περισσότερων γαλαξιών («**κανονικών**» **γαλαξιών**) μπορεί να περιγραφεί από το άθροισμα πολλών αστρικών φασμάτων. Υπάρχουν όμως γαλαξίες των οποίων η φασματική κατανομή παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις. Παραδείγματα τέτοιων γαλαξιών είναι **οι γαλαξίες με ενεργούς πυρήνες** (όπου το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινότητας του γαλαξία προέρχεται από την προσρόφηση μάζας στη κεντρική υπερ-μαζική μελανή οπή (active galactic nuclei)). Ένα άλλο παράδειγμα είναι **οι γαλαξίες με εκρηκτική αστρική δημιουργία** (starburst galaxies).

Η μέτρηση των αποστάσεων στο Σύμπαν

Η μέτρηση αποστάσεων στο Σύμπαν αποτελεί ένα θεμελιώδες πρόβλημα, που πρέπει να λύσουμε για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε το Σύμπαν στο οποίο ζούμε.

Η μέτρηση των αποστάσεων βασίζεται σε διαδοχικά επικαλυπτόμενους δείκτες απόστασης, που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα υποσύνολο από κοινά αντικείμενα, σπρώχνοντας διαδοχικά τις μετρούμενες αποστάσεις σε όλο και μεγαλύτερες τιμές.

Μερικά από τα κυριότερα σκαλοπάτια στην κατασκευή της κλίμακας αποστάσεων είναι:

- Τριγωνομετρική παράλλαξη, η μόνη μέθοδος που είναι ανεξάρτητη από υποθέσεις και μοντέλα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κοντινά αντικείμενα. **Αποτελεί την βάση της κλίμακας αποστάσεων.**
- Η μέθοδος Baade-Wesselink για παλλόμενους αστέρες
- Η μέθοδος του κινούμενου σμήνους
- Άλλες γεωμετρικές μέθοδοι, π.χ. ο δακτύλιος «φωτός» της SN1987a στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου
- Η σχέση περιόδου-φωτεινότητας των Κηφείδων
- Η σχέση περιόδου- φωτεινότητας των μεταβλητών RR-Lyrae
- Κυανοί και ερυθροί υπεργίγαντες
- Καινοφανείς (Novae)

- Κατανομή ολοκληρωμένης φωτεινότητας σφαιρωτών σμηνών
- Σπειροειδείς γαλαξίες – σχέση Tully-Fisher
- Ελλειπτικοί γαλαξίες - σχέση «βασικού επιπέδου»
- Υπερκαινοφανείς τύπου SNIa
- Χρονοκαθυστερήσεις σε βαρυτικούς φακούς
- Αποστάσεις μακρινών σμηνών γαλαξιών με το φαινόμενο Sunyaev Zel'dovich Effect

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα στην κατασκευή της κλίμακας αποστάσεων είναι ο έλεγχος των συστηματικών σφαλμάτων. Για αυτό είναι σημαντικό να χρησιμοποιούμε δείκτες που βασίζονται σε διαφορετικές φυσικές διεργασίες, ώστε να έχουμε μια ανεξάρτητη εκτίμηση των συστηματικών σφαλμάτων.

Ερυθρομετατόπιση (redshift)

Η ταχύτητα απομάκρυνσης, u , ενός γαλαξία μετράται με τη χρήση του φαινομένου Doppler:

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \text{ όπου } z \text{ η ερυθρομετατόπιση, } \Delta\lambda \text{ η διαφορά του παρατηρούμενου μήκους}$$

κύματος, λ , από το μήκος κύματος λ_0 της ίδιας ακτινοβολίας στο εργαστήριο και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Για σχετικιστικές ταχύτητες, η ερυθρομετατόπιση σχετίζεται με την ταχύτητα μέσω του τύπου

$$z = \sqrt{\frac{1+u/c}{1-u/c}} - 1.$$

Η διαστολή του Σύμπαντος και το διάγραμμα Hubble

Σύμφωνα με τον νόμο του Hubble, η ταχύτητα απομάκρυνσης, u , ενός γαλαξία είναι ανάλογη προς την απόστασή του, d , από εμάς: $u = H_0 d$ (για μη σχετικιστικές ταχύτητες).

Αν η ταχύτητα δίνεται σε km/s και η απόσταση σε Mpc, η σταθερά του Hubble, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις είναι $H_0 = (73.8 \pm 2.4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Riess et al. 2011, The Astrophysical Journal, vol. 730, p.119)

Προσοχή: Υπάρχει θεμελιώδης διαφορά μεταξύ της ταχύτητας με την οποία κινείται ένας γαλαξίας στο χώρο (και που ονομάζεται **ιδία ταχύτητα του γαλαξία –peculiar velocity**) και της ταχύτητας απομάκρυνσης (**recessional velocity**) που οφείλεται στη διαστολή του Σύμπαντος!

Δεδομένα της άσκησης

Χρησιμοποιούμε ένα δείγμα από 26 σπειροειδείς γαλαξίες για τους οποίους διαθέτουμε φάσματα στην περιοχή 43650-7100Å από το φασματοφωτομετρικό άτλαντα του Robert C. Kennicutt Jr. του Πανεπιστημίου της Αριζόνα, που δημοσιεύτηκε στο «The Astrophysical Journal Supplement Series», τόμος 79, σελ. 255-284, 1992. Για τους ίδιους γαλαξίες διαθέτουμε εικόνες που έχουν ληφθεί μέσα από V φίλτρο και προέρχονται από το Palomar Observatory Sky Survey. Ο πίνακας 4.1 δίνει τα ονόματα και τους τύπους των γαλαξιών του δείγματος.

Πίνακας 4.1 Το δείγμα των γαλαξιών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα άσκηση.

Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος
NGC1357	Sa	NGC3147	Sb	NGC3516	S0	NGC4775	Sc
NGC1832	SBb	NGC3227	Sb	NGC3623	Sa	NGC5248	Sbc

Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος	Όνομα	Τύπος
NGC2276	Sc	NGC3245	S0	NGC3627	Sb	NGC5866	S0
NGC2775	Sa	NGC3310	Sbc pec	NGC3941	SB0/a	NGC6181	Sc
NGC2903	Sc	NGC3368	Sab	NGC4472	S0	NGC6217	SBbc
(NGC3034)	(I0)	NGC3471	Sb	NGC4631	Sc	NGC6643	Sc
				NGC6764	SBb	NGC7469	Sa

Βήματα της άσκησης

Μέρος 1: Μέτρηση των αποστάσεων των γαλαξιών του δείγματος

Η μέτρηση της απόστασης ενός γαλαξία από εμάς πρέπει να στηριχθεί σε κάποιους από τους καλά βαθμονομημένους δείκτες απόστασης που συζητήσαμε στην εισαγωγή.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα υποθέσουμε ότι όλοι οι γαλαξίες του ίδιου μορφολογικού τύπου έχουν κατά προσέγγιση το ίδιο φυσικό μέγεθος, όπου κι αν βρίσκονται. Αυτή είναι μία υπόθεση που εμπεριέχει δύο σκέλη: (i) υποθέτουμε ότι όλοι οι όμοιοι μορφολογικά γαλαξίες έχουν το ίδιο φυσικό μέγεθος περίπου. Αυτό μπορούμε να το επιβεβαιώσουμε σε ένα δείγμα κοντινών γαλαξιών, των οποίων έχουμε μετρήσει την απόσταση με καλά βαθμονομημένους δείκτες, π.χ. με κυανούς υπεργίγαντες. Ειδικά για κοντινούς σπειροειδείς γαλαξίες, η υπόθεση είναι ορθή μέσα σε πλαίσια σφάλματος $\pm 30\%$. (ii) Αν πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο για πολύ μακρινούς γαλαξίες, δεχόμενοι ότι έχουν το ίδιο μέγεθος, παραδεχόμαστε ότι το μέγεθος αυτό δεν μεταβάλλεται καθώς ο γαλαξίας εξελίσσεται. Αυτό δεν είναι κάτι που μπορούμε να το διαπιστώσουμε εύκολα, και θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε συστηματικά σφάλματα.

Εδώ, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο για σχετικά κοντινούς γαλαξίες, οπότε δεν μας απασχολεί το δεύτερο πρόβλημα.

Για το δείγμα των σπειροειδών γαλαξιών του πειράματός μας, λοιπόν, υποθέτουμε ότι το πραγματικό τους μέγεθος είναι $s \sim 22 \text{ kpc}$.

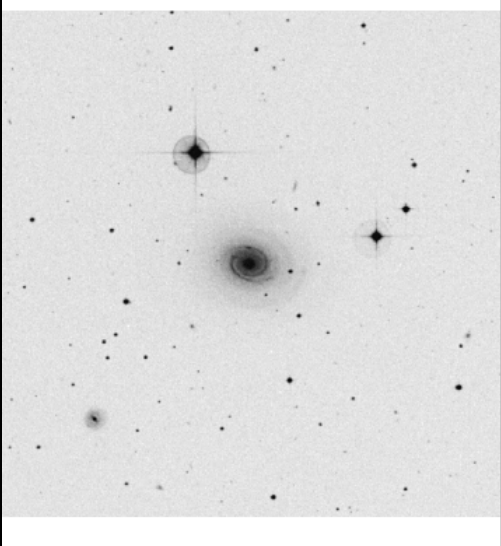
Σκεφθείτε ότι ο δίσκος ενός σπειροειδούς γαλαξία στον οποίο βρίσκονται οι σπείρες, είναι κυκλικός. Ωστόσο, όπως θα διαπιστώσετε, οι περισσότερες εικόνες γαλαξιών προσομοιάζουν με έλλειψη, λόγω της κλίσης του δίσκου ως προς τη γραμμή παρατήρησης. Ο μεγάλος άξονας της έλλειψης προφανώς ταυτίζεται με την διάμετρο του δίσκου.

Το φαινόμενο γωνιακό μέγεθος ενός γαλαξία ίδιου τύπου, α , συγκρινόμενο με το φυσικό του μέγεθος, s ($=22 \text{ kpc}$) μας δίνει κατά προσέγγιση την απόσταση του γαλαξία από εμάς, d . Συνεπώς, $\epsilon\phi\alpha \sim \alpha(\text{rad}) \sim s/d$, όπου τα s και d μετρώνται σε kpc .

Βήματα 1^{ου} μέρους άσκησης:

1. Ανοίξτε αρχείο excel στο οποίο θα καταγράψετε τις μετρήσεις σας για κάθε γαλαξία.
2. Ανοίξτε το αρχείο galaxies.html
3. Επιλέξτε την «εικόνα» του πρώτου γαλαξία. Θα εμφανιστεί το παράθυρο του επομένου σχήματος.
4. Ακολουθήστε τις οδηγίες στο δεξί πλαίσιο για να μετρήσετε το γωνιακό μέγεθος, α , του γαλαξία. Προσοχή: Η μέτρηση πρέπει να γίνει κατά μήκος της μέγιστης διαμέτρου. Επίσης πρέπει να μετρήσετε έως και το αμυδρότερο ορατό άκρο της κάθε σπείρας.
5. Καταγράψτε την μέτρησή σας (του α) στο κατάλληλο κελί στο αρχείο excel.
6. Συνεχίστε για όλους τους υπόλοιπους γαλαξίες.

7. Υπολογίστε στο αρχείο excel την απόσταση των γαλαξιών από εμάς με τον τύπο $\epsilon\phi\alpha \sim \alpha(\text{rad}) \sim s/d$
8. Ως επιπλέον εργασία, μπορείτε να επαναλάβετε 3 φορές την διαδικασία για κάθε γαλαξία, και να εκτιμήσετε την αβεβαιότητα των μετρήσεών σας. Χρησιμοποιήστε νέο φύλλο εργασίας για αυτό.
9. Προφανώς όταν χρησιμοποιείτε αμυδρούς γαλαξίες, πιθανόν να μην φθάνετε στο ίδιο ακρότατο σημείο της σπείρας όπως σε έναν κοντινότερο γαλαξία. Σχολιάστε τι είδους σφάλμα μπορεί να προκαλέσει αυτό.



Η εικόνα του γαλαξία NGC 1357

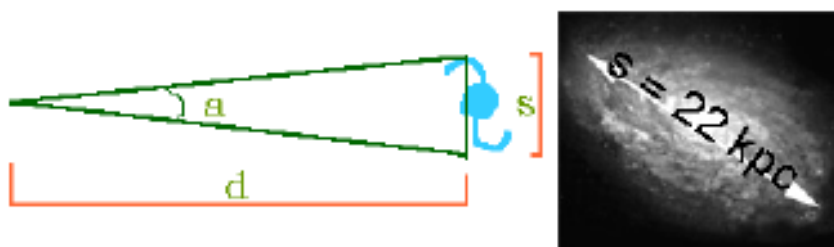
1. Μετρήστε το μήκος του μεγάλου άξονα του γαλαξία, όπως αυτός προβάλλεται στον νυκτερινό ουρανό (Ο γαλαξίας βρίσκεται στο κέντρο της εικόνας).
2. Τοποθετήστε τον κέρσορα στο ένα άκρο του μεγάλου άξονα και πιάστε με το αριστερό κουμπί του "ποντικιού". Στο παράθυρο φαίνονται οι συντεταγμένες (x,y) του εικονοστοιχείου (pixel) που έχετε επιλέξει.
3. Επαναλάβετε την διαδικασία για το άλλο άκρο του μεγάλου άξονα (κατά την διαγώνιο). Στο παράθυρο φαίνονται οι συντεταγμένες (x,y) του δεύτερου εικονοστοιχείου που έχετε επιλέξει.
4. Καταγράψτε το γραμμικό μέγεθος του γαλαξία, όπως δίνεται στο παράθυρο.
5. Αν έχετε κάνει κάποιο λάθος, ή επιθυμείτε να επαναλάβετε την μέτρησή σας, πιάστε το εικονίδιο "Επανάληψη".
6. Χρησιμοποιήστε το εικονίδιο του αστερά για να επιστρέψετε στη σελίδα επιλογής γαλαξιών.

Συντεταγμένες των εικονοστοιχείων (pixels)

Επιλέξτε ένα σημείο

[Επανάληψη](#)

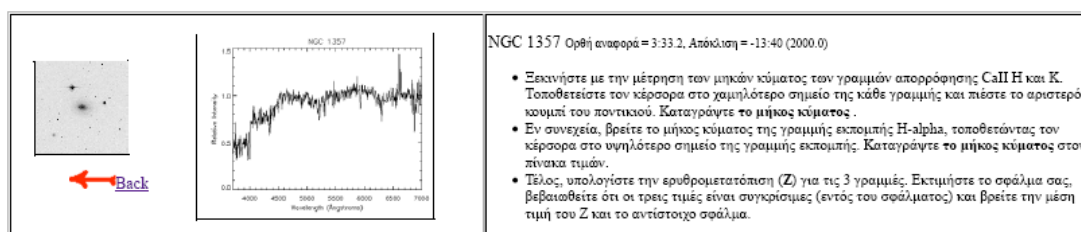




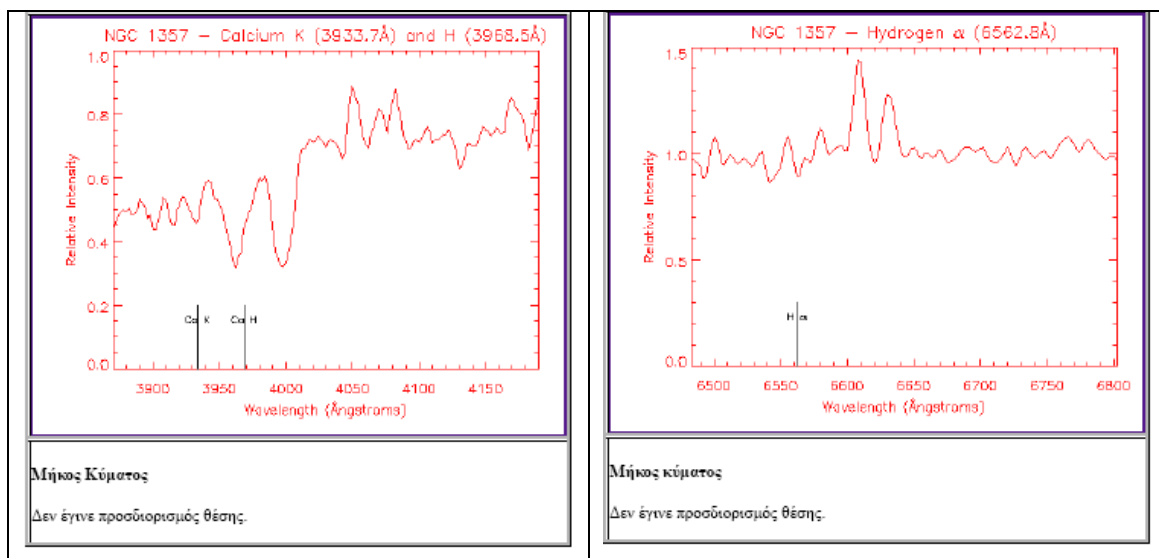
Βήματα 2^{ου} μέρους άσκησης: Μέτρηση των ερυθρομετατοπίσεων των γαλαξιών του δείγματος

10. Επανέρχστε στη κεντρική σελίδα του αρχείου galaxies.html και επιλέγετε το αρχείο με τα φάσματα για τον πρώτο γαλαξία π.χ. NGC 1357 Φάσματα

Θα εμφανιστεί το ακόλουθο παράθυρο:



11. Ακολουθήστε τις οδηγίες στο πάνω δεξί πλαίσιο για να βρείτε τα μήκη κύματος των γραμμών CaH, CaK, και H_α, λ_H, λ_K, λ_{Hα}.



12. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές $\lambda_{H,\alpha}$, $\lambda_{K,\alpha}$, $\lambda_{H,\alpha,0}$ (που αναγράφονται στον τίτλο του κάθε φάσματος και υποδεικνύονται με κάθετες μαύρες γραμμές πάνω στα φάσματα), υπολογίστε την ερυθρομετατόπιση z , και για τις τρεις γραμμές. Υπολογίστε τη μέση τιμή και το αντίστοιχο μέσο σφάλμα μέσης τιμής. Καταγράψτε σε κατάλληλα κελιά την τιμή του z και του αντίστοιχου σφάλματος στο αρχείο excel του 1^{ου} μέρους.

13. Βρείτε τις αντίστοιχες ταχύτητες απομάκρυνσης των γαλαξιών (οι ταχύτητες είναι μη σχετικιστικές, όπως θα διαπιστώσετε). Υπολογίστε το αντίστοιχο σφάλμα (με διάδοση σφαλμάτων). Προσθέστε τις τιμές αυτές στο αρχείο excel του 1^{ου} μέρους.

14. Επαναλάβετε την διαδικασία για όλους τους γαλαξίες του δείγματος.

Κατασκευή διαγράμματος Hubble. Βήματα:

15. Κατασκευάστε το διάγραμμα ταχυτήτων απομάκρυνσης συναρτήσει των αποστάσεων των γαλαξιών. Αυτό είναι το διάγραμμα Hubble.

16. Τι σημαίνει ο συσχετισμός που βρήκατε;

17. Προσαρμόστε μια ευθεία στα πειραματικά σας σημεία. Η κλίση (με το αντίστοιχο σφάλμα) της ευθείας μας δίνει μια εκτίμηση της σταθεράς του Hubble. Συγκρίνετε το αποτέλεσμά σας με αυτό της σύγχρονης βιβλιογραφίας.

18. Η σχέση που βρήκατε έχει αρκετά μεγάλη διασπορά. Που μπορεί να οφείλεται αυτή;

19. Δώστε μία εκτίμηση της ηλικίας του σύμπαντος από τη τιμή της σταθεράς του Hubble που βρήκατε. Συγκρίνετε την ηλικία αυτή με την ηλικία του σφαιρωτού σμήνους της άσκησης 3. Σχολιάστε.

Βιβλιογραφία

- Προσαρμογή από το διαδίκτυο [http://www.columbia.edu/~vjd1/Hubble Lab Ex.html](http://www.columbia.edu/~vjd1/Hubble%20Lab%20Ex.html)
- Carroll, B.W. & Ostlie, D.A., 2007, An introduction to Modern Astrophysics, pub. Pearson-Addison Wesley
- R.C. Kennicutt, 1992, The Astrophysical Journal Supplement Series, vol.79, p.255
- Riess et al. 2011, The Astrophysical Journal, vol. 730, p.119
- Shu, F., Αστροφυσική (Δομή και εξέλιξη του Σύμπαντος) Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991

Η1. Εισαγωγικές έννοιες - Απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα και ηλεκτρικές μετρήσεις

Σκοπός της άσκησης

Στην άσκηση αυτή θα γίνει η εξοικείωση με τις κύριες έννοιες που χρησιμοποιούνται και τα βασικά όργανα που υλοποιούν τις διατάξεις της Ηλεκτρονικής Φυσικής, καθώς και η χρησιμότητα τους για την κατανόηση, σχεδιασμό και ανάλυση βασικών ηλεκτρονικών συνδεσμολογιών.

Εξοπλισμός άσκησης

- Επιφάνεια εργασίας - κονσόλα
- **Breadboard**: έτσι ονομάζεται η πλακέτα γενικής, πειραματικής, χρήσεως πάνω στην οποία υλοποιούνται τα κυκλώματα
- **Αντιστάσεις**: με τιμές, $1k\Omega$, $3.3k\Omega$, $10k\Omega$, 100Ω , $4.7k\Omega$
- **Παλμογράφος**: είναι μια από τις σημαντικότερες συσκευές μέτρησης αλλά και παρατήρησης του σήματος.
- **Πολύμετρο**: αποτελεί όργανο πολλαπλών ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών μετρήσεων
- **Γεννήτρια παλμών**: δημιουργεί τη μορφή του σήματος που χρειαζόμαστε για το κάθε κύκλωμα που υλοποιούμε.

Στοιχεία από την θεωρία

Βασικές Έννοιες Ηλεκτρονικής Φυσικής

Για τη μελέτη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος πρέπει να γνωρίζουμε τις τάσεις στα άκρα των στοιχείων καθώς και τα ρεύματα που τα διαρρέουν. Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση αυτή, θα πρέπει να γνωρίζουμε τους ακόλουθους βασικούς νόμους και κανόνες που το διέπουν τη λειτουργία ενός κυκλώματος στην Ηλεκτρονική Φυσική:

Νόμος του Ohm: Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα μιας αντίστασης ισούται με το ρεύμα που την διαρρέει επί την τιμή της αντίστασης.

1ος Κανόνας του Kirchhoff (των κόμβων): Σε ένα κόμβο ενός κυκλώματος, το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτόν ισούται με το μηδέν.

2ος Κανόνας του Kirchhoff (των βρόχων): Σε ένα βρόχο ενός κυκλώματος το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων που αναπτύσσεται σε κάθε ένα από τα στοιχεία του ισούται με μηδέν.

Σημαντική Σημείωση: κατά τη διάρκεια των υπολογισμών για την εύρεση των χαρακτηριστικών των κυκλωμάτων με τη χρήση των παραπάνω νόμων/κανόνων θα πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα οι πολικότητες των τάσεων και οι φορές των ρευμάτων ώστε να τους προσδίδονται τα σωστά πρόσημα στις αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις.

Στο εργαστήριο, οι γεννήτριες σήματος που θα χρησιμοποιήσουμε είναι πηγές τάσης, ενώ, υπάρχουν και οι πηγές ρεύματος (βλ. βιβλίο μαθήματος "Ηλεκτρονική Ι"). Η τάση και το ρεύμα είναι μεγέθη που μπορούν να έχουν τις παρακάτω δύο μορφές.

α) *Συνεχές σήμα (Direct Current - DC)*: Στην περίπτωση αυτή, το πρόσημο τις τιμές του σήματος παραμένει σταθερό στο πεδίο του χρόνου. Τέτοιο σήμα είναι αυτό που μπορούμε να λάβουμε από μπαταρίες, κλπ. Επίσης ένα σήμα χαρακτηρίζεται ως μεταβαλλόμενο στην περίπτωση που μεταβάλλει την τιμή του αλλά δεν αλλάζει πολικότητα.

β) *Εναλλασσόμενο σήμα (Alternating Current - AC)*: Στην περίπτωση αυτή το σήμα αλλάζει πολικότητα. Η μορφή AC σήματος που χρησιμοποιούμε συνήθως στο εργαστήριο είναι ημιτονοειδής και περιγράφεται από την εξίσωση $U = U_0 \sin(\omega t)$. Προφανώς, για να περιγραφεί πλήρως το σήμα αυτό θα πρέπει να μας είναι γνωστά τα μεγέθη του πλάτους και της συχνότητάς του.

Το πλάτος ενός AC σήματος μπορούμε να το εκφράσουμε με 3 τρόπους:

α) Πλάτος από κορυφή-σε-κορυφή (peak-to-peak, p-p): Υπολογίζεται η διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του πλάτους του σήματος.

β) Πλάτος κορυφής (peak, p): Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του πλάτους του σήματος από τον οριζόντιο άξονα (τον άξονα του χρόνου).

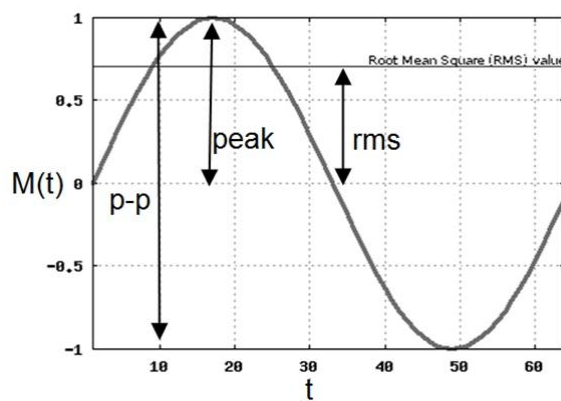
γ) Μέση τετραγωνική τιμή του πλάτους (Root Mean Square, RMS): Μέσω της τιμής αυτής, υπολογίζεται η μέση ισχύς, $P_{av} = V_{RMS} I_{RMS}$, που καταναλώνεται σε ένα κύκλωμα. Η τιμή RMS ενός περιοδικού σήματος, $M(t)$, υπολογίζεται σύμφωνα με το ακόλουθο ολοκλήρωμα:

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [M(t)]^2 dt} \quad (1)$$

όπου $T_2 - T_1 = T$ είναι η περίοδος του σήματος. Για την περίπτωση του ημιτόνου η τιμή rms, προκύπτει, από το παραπάνω ολοκλήρωμα, ότι δίνεται από τη σχέση:

$$M_{RMS} = \frac{M_p}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

όπου M_p η τιμή κορυφής (peak) του σήματος. Στο ακόλουθο σχήμα έχουν σχεδιαστεί οι τρεις παραπάνω εκφράσεις:



Έτσι, στην περίπτωση του ημιτονικού σήματος, οι τιμές M_{pp} , M_p και M_{rms} συνδέονται ως εξής:

$$M_{RMS} = \frac{M_p}{\sqrt{2}} = \frac{M_{pp}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

Σε κυκλώματα όπου έχουμε μόνο αντιστάσεις, αυτές επηρεάζουν μόνο την τιμή του πλάτους του σήματος. Αν όμως υπάρχουν πυκνωτές ή/και πηνία στο κύκλωμα, θα πρέπει να γνωρίζουμε την συχνότητα του σήματος γιατί η σύνθετη αντίσταση των πυκνωτών και των πηνίων (εμπέδηση) εξαρτάται από την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθετη αντίσταση ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$R_c = \frac{1}{i\omega C} \quad (4)$$

ενώ αυτή ενός πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$R_L = i\omega L \quad (5)$$

όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή, L η αυτεπαγωγή του πηνίου και ω η κυκλική συχνότητα του σήματος.

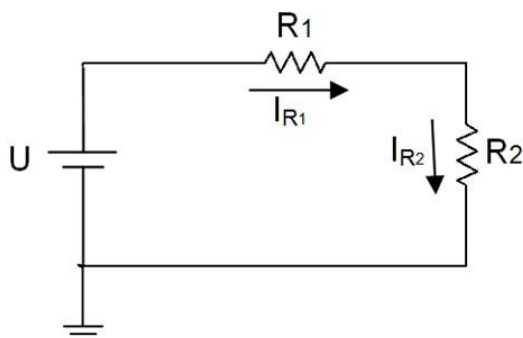
Προφανώς, για DC τάσεις ($\omega=0$) ο πυκνωτής αποτελεί ανοιχτό κύκλωμα, $R \rightarrow \infty$, (διακόπτει τη ροή του ρεύματος) ενώ το πηνίο βραχυκύκλωμα, $R=0\Omega$.

Βασικά Στοιχεία και Όργανα Μέτρησης Ηλεκτρονικής Φυσικής

Στο "Παράρτημα Ηλεκτρονικής Φυσικής" που βρίσκεται στο τέλος του εργαστηριακού αυτού φυλλαδίου, εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας των κύριων συστημάτων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην Ηλεκτρονική Φυσική, καθώς και τα βασικά στοιχεία για τη σχεδίαση και υλοποίηση των κυκλωμάτων. Η κατανόηση τους αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι του παρόντος Εργαστηρίου, δεδομένου ότι, ο εξοπλισμός δεν αφορά μόνο την Ηλεκτρονική Φυσική, αλλά χρησιμοποιείται ευρύτατα και στις περισσότερες από τις άλλες κατευθύνσεις της Φυσικής. Επομένως, η χρήση του, δεν αφορά μόνο τη συγκεκριμένη επιστημονική περιοχή, αλλά ένα πολύ μεγάλο μέρος, του φάσματος της επιστήμης της Φυσικής. Συνεπώς οι φοιτητές που θα πραγματοποιήσουν τη συγκεκριμένη άσκηση, θα πρέπει να έχουν διαβάσει πολύ προσεκτικά και να γνωρίζουν τη λειτουργία των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο καθώς και τη χρήση των βασικών στοιχείων, όπως παρατίθενται στο Παράρτημα του παρόντος εργαστηριακού φυλλαδίου.

Διαιρέτης Τάσης

Το κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω περιλαμβάνει μία πηγή τάσης (U) και δύο αντιστάσεις (R_1 και R_2). Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε την τάση στα άκρα κάθε μίας από τις αντιστάσεις με βάση τις χαρακτηριστικές τιμές των στοιχείων που το απαρτίζουν.



Άρα, οι τιμές των τάσεων θα υπολογιστούν ως συνάρτηση της τιμής U της πηγής τάσης καθώς και των τιμών των αντιστάσεων που θεωρούνται γνωστές.

Από τον 1ο κανόνα του Kirchhoff (κανόνα των βρόχων) προκύπτει ότι:

$$U - V_{R_1} - V_{R_2} = 0 \quad (6)$$

Αντίστοιχα, από το 2ο κανόνα του Kirchhoff (κανόνα των κόμβων) έχουμε:

$$I_{R_1} = I_{R_2} \quad (7)$$

Όσον αφορά τις τάσεις στα άκρα των αντιστάσεων προκύπτουν από το νόμο του Ohm και δίδονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} V_{R_1} &= I_{R_1} R_1 \\ V_{R_2} &= I_{R_2} R_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Έτσι, από τις εξισώσεις (7) και (8) προκύπτει η εξίσωση:

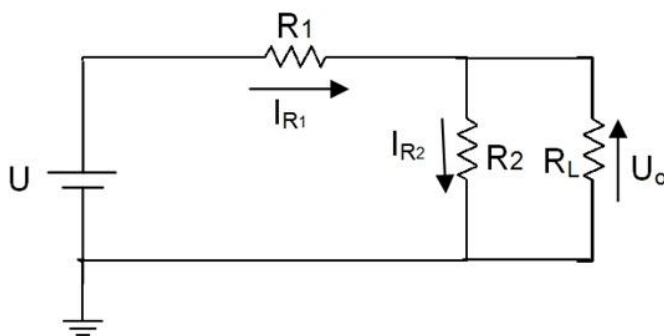
$$\frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{V_{R_2}}{R_2} \quad (9)$$

από τις εξισώσεις (6) και (9) και λύνοντας ως προς V_{R_2} προκύπτει ότι:

$$V_{R_2} = U \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (10)$$

και με αντίστοιχο τρόπο προσδιορίζονται και τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος. Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή και ως "εξίσωση διαιρέτη τάσης" και χρησιμοποιείται πολύ συχνά στα κυκλώματα που μας ενδιαφέρει να λαμβάνουμε συγκεκριμένες, διαφορετικές, τιμές τάσεων σε κάποια σημεία τους, από μια τροφοδοσία.

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης με δύο αντιστάσεις R_1 και R_2 στο οποίο συνδέεται μια πρόσθετη αντίσταση φορτίου R_L . Το κύκλωμα, σε αυτή την περίπτωση θα έχει την ακόλουθη μορφή:



Ανάλογα με την τιμή του φορτίου ο διαιρέτης μπορεί να είναι είτε ισχυρός είτε ασθενής. Έτσι, με την αντίστοιχη διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω [Εξισώσεις (6)-(10)] καταλήγουμε ότι αν ο διαιρέτης είναι "Ισχυρός", θα ισχύει:

$$U_o \cong U \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (11)$$

ενώ στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε "Ασθενή" διαιρέτη τάσης, προκύπτει η εξίσωση:

$$U_o = U \left[\frac{R_2 R_L / (R_2 + R_L)}{R_1 + R_2 R_L / (R_2 + R_L)} \right] \quad (12)$$

Εξηγήστε αναλυτικά στην εργασία που θα παραδώσετε τον τρόπο με τον οποίο προκύπτουν οι εξισώσεις (11) και (12). Στη συνέχεια εξηγήστε ποια είναι η διαφορά μεταξύ "Ασθενή" και "Ισχυρού" διαιρέτη τάσης στην πράξη. Ποιο από τα παραπάνω μεγέθη μπορούμε να μεταβάλλουμε στην πράξη; Τι εννοούμε, στην πράξη, όταν αναφερόμαστε στο "φορτίο" σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα;

Πειραματική Διαδικασία

Πείραμα 1. Εξοικείωση με τα Στοιχεία και τα Όργανα Μέτρησης της Ηλεκτρονικής Φυσικής

Για να προχωρήσετε στην πειραματική διαδικασία **θα πρέπει να έχετε μελετήσει πολύ προσεχτικά και να έχετε κατανοήσει πλήρως, το σύνολο του "Παραρτήματος Ηλεκτρονικής Φυσικής"**.

Από την κονσόλα δημιουργήστε ένα DC σήμα τάσης 5V το οποίο θα το μετρήσετε με την βοήθεια του πολυμέτρου και του παλμογράφου. Παρατηρώντας την τάση στον παλμογράφο αυξομειώστε την τιμή της τάσης (ποιό από τα δύο όργανα μέτρησης έχει αμεσότερη και ακριβέστερη απόκριση;).

Από την γεννήτρια παλμών δημιουργήστε τρία AC σήματα τάσης, με πλάτος 2V (**peak, peak-peak και rms**) και συχνότητα 1kHz και μετρήστε το με την βοήθεια του παλμογράφου. Σχεδιάστε τις κυματομορφές που προκύπτουν στον παλμογράφο για κάθε σήμα. Τι παρατηρείτε σχετικά με το πλάτος, τη συχνότητα και τη φάση των κυματομορφών στην κάθε περίπτωση;

(Οι κυματομορφές αυτές θα πρέπει να σχεδιαστούν και τα αποτελέσματά τους να εξηγηθούν αναλυτικά και στις εργασίες που θα παραδώσετε).





Με την βοήθεια του παλμογράφου μετρήστε την τάση που έχει στην έξοδο του ο μετασχηματιστής της κονσόλας και σημειώστε την μέτρηση αυτή.

5

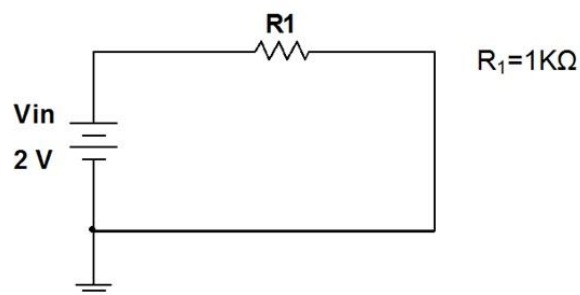
Πλάτος τάσης μετασχηματιστή	
-----------------------------	--

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

Πείραμα 2. Βασικά Ηλεκτρονικά Στοιχεία και Κυκλώματα

1. Αναγνωρίστε τις τιμές των αντιστάσεων που σας δίνονται με βάση το χρωματικό κώδικα και επιβεβαιώστε με την βοήθεια του πολυμέτρου. Στην συνέχεια δημιουργήστε ένα DC σήμα τάσης 2V. Κατόπιν κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα στο breadboard της κονσόλας.



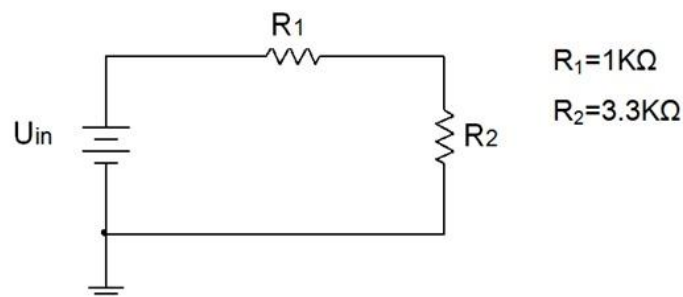
2. Υπολογίστε θεωρητικά την τιμή της τάσης V_{R_1} στα άκρα της αντίστασης R_1 καθώς και το ρεύμα I_{R_1} που τη διαρρέει. Στην συνέχεια με τη βοήθεια του πολυμέτρου μετρήστε τις τιμές αυτές. Γράψτε τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα και δικαιολογήστε-αξιολογήστε τις όποιες αποκλίσεις. **(Σχολιάστε αναλυτικά το αποτέλεσμα στην εργασία που θα παραδώσετε)**

	Θεωρητικά αποτελέσματα	Πειραματικά αποτελέσματα
V_{R_1}		
I_{R_1}		

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

3. Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα διαιρέτη τάσης με τάση εισόδου, DC, $U_{in}=1.5V$.



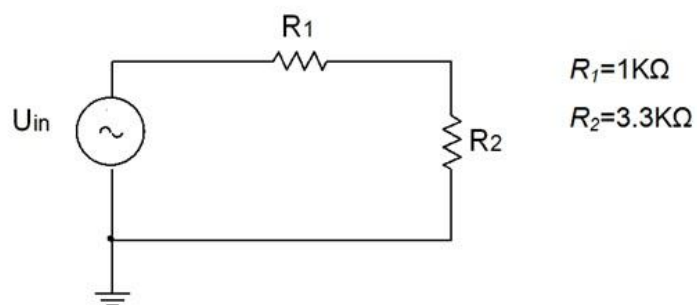
4. Υπολογίστε θεωρητικά την τιμή των τάσεων V_{R_1} , V_{R_2} , στα άκρα των αντιστάσεων R_1 , R_2 καθώς και τα ρεύματα I_{R_1} , I_{R_2} , που τις διαρρέουν. Στην συνέχεια με την βοήθεια του πολυμέτρου μετρήστε τις τιμές αυτές. Γράψτε τα αποτελέσματα στον πίνακα που ακολουθεί:

	Θεωρητικά αποτελέσματα	Πειραματικά αποτελέσματα
V_{R_1}		
V_{R_2}		
I_{R_1}		
I_{R_2}		

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στην παραδοτέα εργασία, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια σας.

5. Στη συνέχεια, αντικαταστήστε την DC πηγή τάσης με AC πηγή η οποία θα δίνει ημιτονοειδές σήμα τάσης, πλάτους $U_{in,0}=2V$ (peak) και συχνότητας 1KHz.

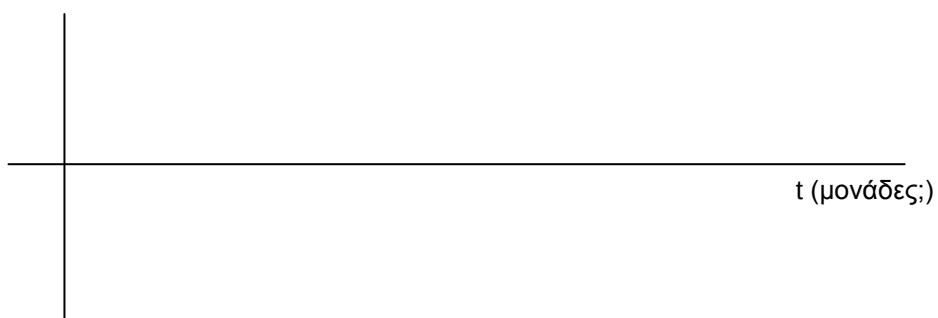


Με την βοήθεια του παλμογράφου παρατηρείστε τις κυματομορφές των τάσεων V_{R_1} και V_{R_2} , και σχεδιάστε τη μορφή τους. Δικαιολογήστε τα αποτελέσματα που πήρατε από το πείραμα.

Κυματομορφή τάσης R_1



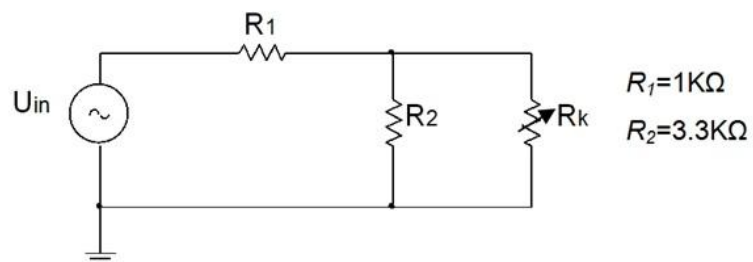
Κυματομορφή τάσης R_2



Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

6. Συνδέστε παράλληλα στην αντίσταση R_1 την μεταβλητή αντίσταση R_k (στην περίπτωση αυτή, με το κιβώτιο αντιστάσεων), ώστε να προκύψει το κύκλωμα που ακολουθεί:



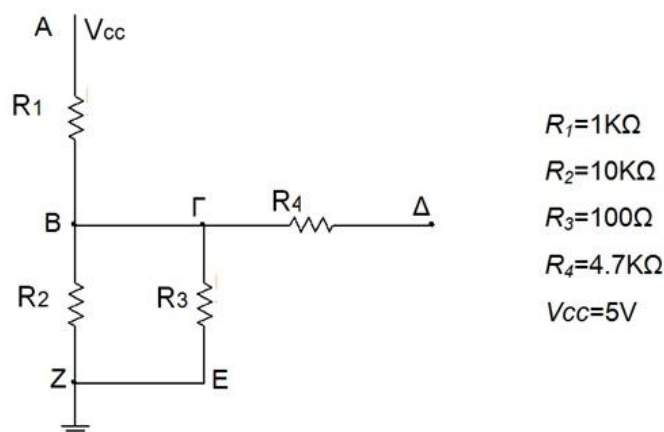
Αρχικά ρυθμίστε την τιμή της R_k στην μέγιστη τιμή της και συνδέστε παράλληλα σε αυτήν τον παλμογράφο. Αρχίστε σιγά-σιγά να μειώνετε την τιμή της μεταβλητής αντίστασης. Τι παρατηρείτε;

Συμφωνούν οι παρατηρήσεις σας με τους 2 τύπους διαιρέτη τάσης που αναφέρθηκαν παραπάνω; Πότε χρησιμοποιείται με ακρίβεια η σχέση (11) και πότε η (12); Γιατί; Εξηγήστε αναλυτικά την απάντησή σας και στο εργαστήριο και στην εργασία σας.

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

7. Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα στην πλακέτα του εργαστηρίου. Για τροφοδοσία (V_{CC}) χρησιμοποιήστε την πηγή τάσης από την κονσόλα που δίνει σταθερή τιμή DC σήματος τάσης 5V.



Πριν τροφοδοτήσετε το κύκλωμα υπολογίστε τη φορά του ρεύματος σε κάθε αντίσταση. Στη συνέχεια, τροφοδοτήστε το κύκλωμα και με την βοήθεια του πολυμέτρου μετρήστε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A, B, Γ, Δ, E, Z και της γείωσης. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στον παρακάτω πίνακα.

Σημεία	Δυναμικό (V)
A	
B	
Γ	
Δ	
Ε	
Ζ	

Με βάση τις τιμές δυναμικού που μετρήσατε, υπολογίστε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε αντίστασης καθώς και το ρεύμα που τις διαρρέει και συμπληρώστε τον ακόλουθο πίνακα:

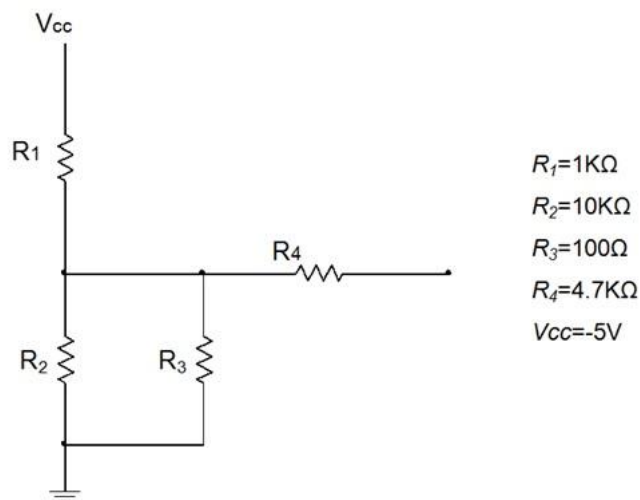
	Τάση V (V)	Ρεύμα I (A)
R ₁		
R ₂		
R ₃		
R ₄		

Σημειώστε στο παραπάνω κύκλωμα, καθώς και στην εργασία που θα παραδώσετε, τη φορά του ρεύματος σε κάθε αντίσταση. Εξηγήστε αναλυτικά την απάντησή σας στην εργασία που θα παραδώσετε.

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

8. Αλλάζουμε την τροφοδοσία V_{CC} και την αντικαθιστούμε με DC, -5V ως εξής:



Με την βοήθεια του πολυμέτρου μετρήστε κατευθείαν τις τάσεις στα άκρα των αντιστάσεων και σχεδιάστε πάνω στο σχήμα και μεταφέρετε και στην εργασία σας, τη φορά του ρεύματος σε κάθε αντίσταση. Εξηγήστε την απάντησή σας στην εργασία που θα παραδώσετε.

ΠΡΟΣΟΧΗ στα πρόσημα των τάσεων κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και στην τοποθέτηση των ακροδεκτών του πολυμέτρου. Τι θα συμβεί αν τοποθετηθούν ανάποδα οι ακροδέκτες μέτρησης του πολύμετρου;

	Τάση V (Volts)	Ρεύμα I (A)
R_1		
R_2		
R_3		
R_4		

Παρατηρήσεις-Σχόλια:

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα αναλυτικά σχόλια σας.

Βιβλιογραφία

- Γ.Σ. Τόμπρας, “Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική”, *Εκδόσεις Δίαυλος*, 2006
- Γ.Σ. Τόμπρας, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής Φυσικής”, *Έκδοση του Πανεπιστημίου Αθηνών*, 2005
- Θ.Λ. Δεληγιάννης, “Ηλεκτρονικά Στοιχεία – Κυκλώματα”, Τόμος Α, 1981
- R.C. Dorf, “The Electrical Engineering Handbook”, *CRC Press*, 1993
- P.E. Gray and G.L. Searle, “Electronic Principles: Physics, Models, and Cicruits”, *Publisher J. Wiley & Sons*, 1969
- Κ. Καρούμπαλος και Γ. Φιλοκύπρου, “Μαθήματα Ηλεκτρονικής”, 1978
- S.D. Senturia and B.D. Wedlock, “Electronic Circuits and Applications”, *Publisher J. Wiley & Sons*, 1975
- Γ. Θεοδωρίδης, Κ. Κοσματοπούλου, Θ. Λαόπουλος, Σ. Νικολαΐδης, Κ. Παπαθανασίου, και Σ. Σίσκος, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής”, Εκδ. Συγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, 2009
- C.K. Alexander and M.N.O. Sadiku, “Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα”, 4^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2013
- A. Malvino and D.J. Bates, “Ηλεκτρονική αρχές και εφαρμογές”, 7^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2013
- R.L. Boylestad and L. Nashelsky, “Ηλεκτρονικές διατάξεις και θεωρία κυκλωμάτων”, 10^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2012

Η2. Μελέτη Τελεστικών Ενισχυτών

Σκοπός της άσκησης

Στην άσκηση αυτή θα μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή ενώ θα πραγματοποιηθεί και ανάλυση απλών συνδεσμολογιών με βάση το συγκεκριμένο αυτό στοιχείο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

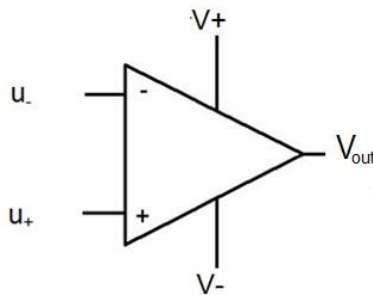
Εξοπλισμός άσκησης

- Παλμογράφος
- Πολύμετρο
- Γεννήτρια AC σήματος
- Αντιστάσεις: 1KΩ, 10KΩ, μεταβλητή αντίσταση
- Τελεστικός ενισχυτής: LM741

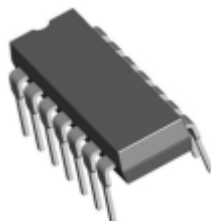
Στοιχεία από τη θεωρία

Βασικές έννοιες τελεστικών ενισχυτών

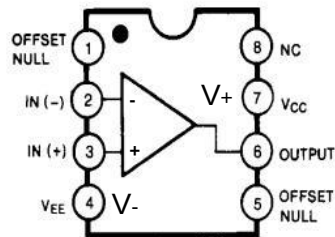
Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα ημιαγωγικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit) το οποίο συμβολίζεται με το παρακάτω σύμβολο:



Με τον όρο ολοκληρωμένο κύκλωμα εννοούμε το στοιχείο εκείνο το οποίο είναι αυτόνομο αλλά εσωτερικά αποτελείται από μια σειρά στοιχείων (τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές, κ.α.) τα οποία συνθέτουν ένα κύκλωμα το οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει μια συγκεκριμένη λειτουργία. Τα στοιχεία αυτά έχουν συνήθως αρκετούς ακροδέκτες. Ένα τέτοιο στοιχείο έχει, στην πράξη, την ακόλουθη μορφή:



Ο τελεστικός ενισχυτής που θα χρησιμοποιήσουμε στην άσκηση αυτή, έχει 8 ακροδέκτες. Παρακάτω βλέπουμε την μορφή του και σε τι αντιστοιχεί ο κάθε ένας από αυτούς.

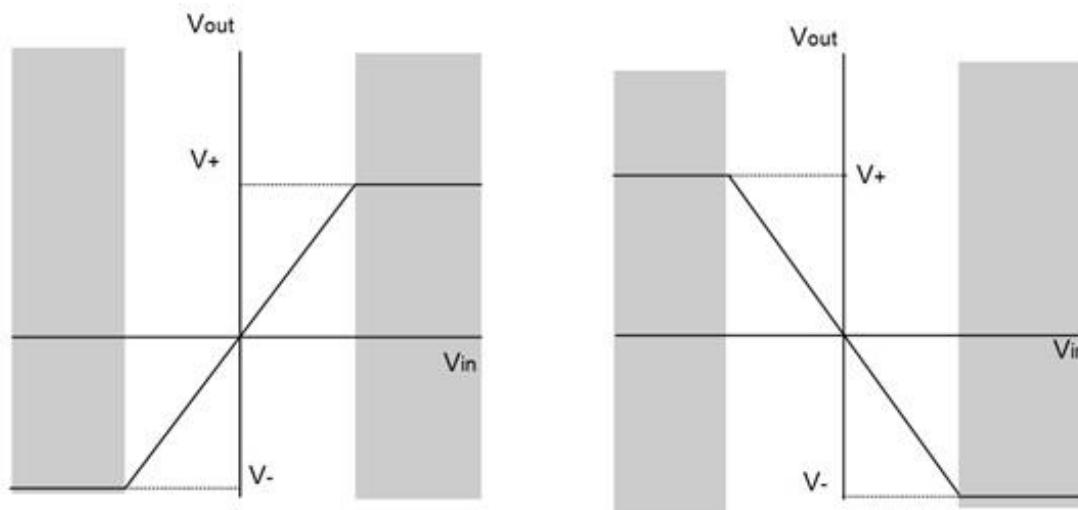


Η λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή είναι η ενίσχυση μικρών σημάτων τάσης. Συγκεκριμένα εφαρμόζουμε δύο δυναμικά στους 2 ακροδέκτες εισόδου (IN+ και IN-), που αντιστοιχούν στα u_+ και u_- αντίστοιχα και μία μεγαλύτερη, από τη διαφορά τους, τάση μετράται στην έξοδο (τάση μεταξύ ακροδέκτη εξόδου και γείωσης). Η ενίσχυση αυτή προφανώς και δεν γίνεται τυχαία αλλά υπάρχει ένας συντελεστής ενίσχυσης του τελεστικού ενισχυτή, A , και ισχύει $V_{out} = AV_{in} = A(u_+ - u_-)$. Ο συντελεστής αυτός, είναι τεράστιος και στην πράξη λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές, της τάξης του 10^5 - 10^6 . Η ενέργεια που χρειάζεται για να γίνει η ενίσχυση αυτή προέρχεται από την τάση τροφοδοσίας (η οποία μπορεί να είναι είτε συμμετρική, δηλ. $+V$, $-V$, είτε μόνο θετική, δηλ. 0, $+V$, είτε μόνο αρνητική, δηλ. 0, $-V$, βλέπε το αντίστοιχο κεφάλαιο στο βιβλίο της θεωρίας) και προφανώς, οι τιμές αυτές είναι οι μέγιστες που μπορούν να ληφθούν στην έξοδο του. Επίσης, στην περίπτωση που στην έξοδο έχουμε συνδέσει μία αντίσταση, η ισχύς ($P=VI$) στην αντίσταση αυτή έχει μια μέγιστη τιμή που καθορίζεται από τις δυνατότητες του τελεστικού ενισχυτή.

Για την μελέτη του τελεστικού ενισχυτή εξετάζουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- α) Αν λειτουργεί στην γραμμική περιοχή. Δηλαδή αν η τάση εξόδου ακολουθεί γραμμικά τις μεταβολές της τάσης εισόδου ($V_{out} = kV_{in}$), όπου k σταθερά η οποία εξαρτάται από το κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή). Η μη γραμμικότητα του τελεστικού ενισχυτή εμφανίζεται συνήθως όταν η τάση της τροφοδοσίας δεν αρκεί για να δώσει την τάση που απαιτείται στην έξοδο.
- β) Αν η τάση στην έξοδο παρουσιάζει αναστροφή ως προς την είσοδο δηλαδή ($V_{out} = -\mu V_{in}$ όπου μ θετική σταθερά). Γι' αυτό και διακρίνουμε τις συνδεσμολογίες του τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογίες με και χωρίς αναστροφή.

Οι περιπτώσεις που αφορούν κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών με και χωρίς αναστροφή, παρουσιάζουν χαρακτηριστικές, δηλαδή γραφικές παραστάσεις $V_{out}(V_{in})$ που παριστάνονται γραφικά ως εξής:



Στην πρώτη περίπτωση βλέπουμε την χαρακτηριστική τελεστικού χωρίς αναστροφή. Δηλαδή είσοδος και έξοδος έχουν το ίδιο πρόσημο. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση βλέπουμε την χαρακτηριστική τελεστικού με αναστροφή. Οι γκριζες περιοχές είναι αυτές όπου παρουσιάζεται η μη γραμμικότητα ενώ στην λευκή περιοχή υπάρχει γραμμική εξάρτηση τάσης εισόδου και εξόδου.

Επειδή η τιμή του συντελεστή ενίσχυσης είναι πολύ μεγάλη, για να βρισκόμαστε στην γραμμική περιοχή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πολύ μικρές διαφορές τάσεων στην είσοδο (της τάξης των nV). Σε περίπτωση μεγαλύτερης τάσης εισόδου θα χρειαζόμασταν για τροφοδοσία του τελεστικού μερικές χιλιάδες Volt όμως ένας τελεστικός δεν μπορεί πρακτικά να αντέξει σε τάσεις μεγαλύτερες από 15-20Volts.

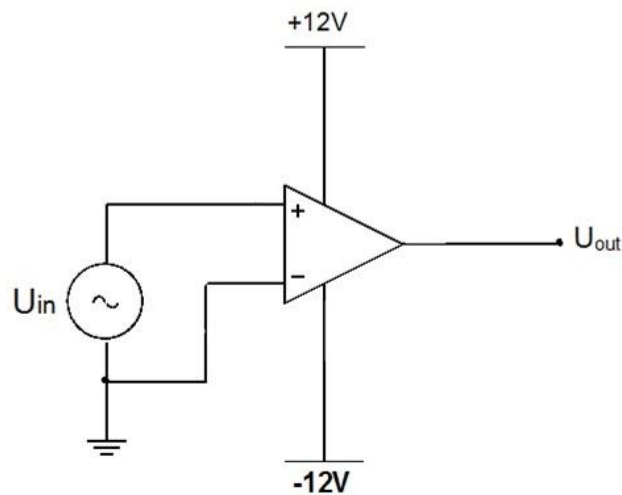
Με συγκεκριμένες κυκλωματικές συνδεσμολογίες έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε τον συντελεστή ενίσχυσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του κυκλώματος. **Προσοχή, δεν αλλάζει ο συντελεστής ενίσχυσης του τελεστικού ενισχυτή αφού, ο συντελεστής αυτός αποτελεί κατασκευαστική του σταθερά. Όμως, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε τέτοια κυκλώματα στα οποία να μπορούμε να μεταβάλουμε τον συντελεστή ενίσχυσης τάσης τους ανάλογα με το τι δυνατότητες επιθυμούμε να έχουν.**

Στα κυκλώματα που θα μελετήσουμε στα πλαίσια της παρούσας εργαστηριακής άσκησης στη συνέχεια, θα πρέπει πρώτα να υπολογίζετε την έξοδο τους θεωρητικά και η ανάλυση αυτή να φαίνεται στην εργασία που θα παραδώσετε, και στη συνέχεια να υλοποιείτε το κύκλωμα και να παρατηρείτε και την είσοδο και την έξοδο του, στον παλμογράφο.

Πειραματική Διαδικασία

Πείραμα 1: Μη γραμμικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές

Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα με AC σήμα εισόδου πλάτους $U_{in,0}=1\text{Volt}$ και συχνότητα 1kHz.



Το σήμα εισόδου να μην έχει DC συνιστώσα (δηλαδή να είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του χρόνου όταν θα εμφανίζεται στον παλμογράφο).

(α) Μελετήστε θεωρητικά το κύκλωμα και αναφέρατε-εξηγήστε το αποτέλεσμα το οποίο αναμένουμε στην έξοδο (τη μελέτη αυτή θα την παραθέσετε αναλυτικά και στην εργασία σας)

(β) Συνδέστε το ένα κανάλι του παλμογράφου στην είσοδο και το άλλο στην έξοδο. Σχεδιάστε τις δύο αυτές κυματομορφές παρακάτω.

Κυματομορφή εισόδου



Κυματομορφή εξόδου



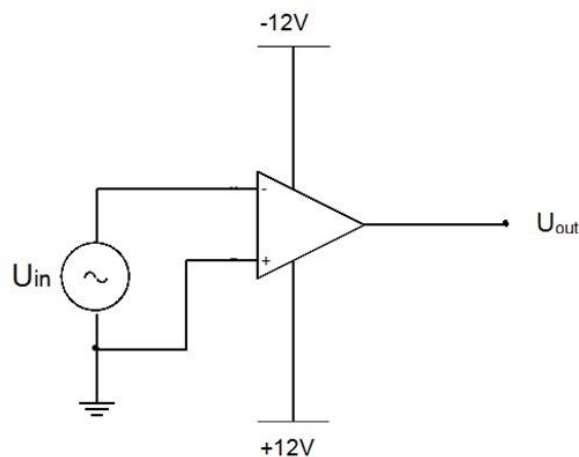
(γ) Η συνδεσμολογία λειτουργεί στη γραμμική ή στη μη γραμμική περιοχή; Γιατί;

(δ) Παρατηρείται αναστροφή τάσης σήματος με τη συνδεσμολογία αυτή; Γιατί;

Παρατηρήσεις-Σχόλια

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις, καθώς και τις απαντήσεις σας στις θεωρητικές ερωτήσεις που περιέχονται στο φυλλάδιο αυτό, θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα με AC σήμα εισόδου πλάτους $U_{in,0} = 1V$ και συχνότητα 1kHz.



Το σήμα εισόδου να μην έχει DC συνιστώσα (δηλαδή να είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του χρόνου όταν θα εμφανίζεται στον παλμογράφο).

(α) Μελετήστε θεωρητικά το κύκλωμα και αναφέρατε το αποτέλεσμα το οποίο αναμένουμε στην έξοδο του (U_{out}).

(β) Με τη βοήθεια του παλμογράφου παρατηρήστε τις κυματομορφές εισόδου και εξόδου και σχεδιάστε τη μορφή τους παρακάτω.

Κυματομορφή εισόδου



Κυματομορφή εξόδου



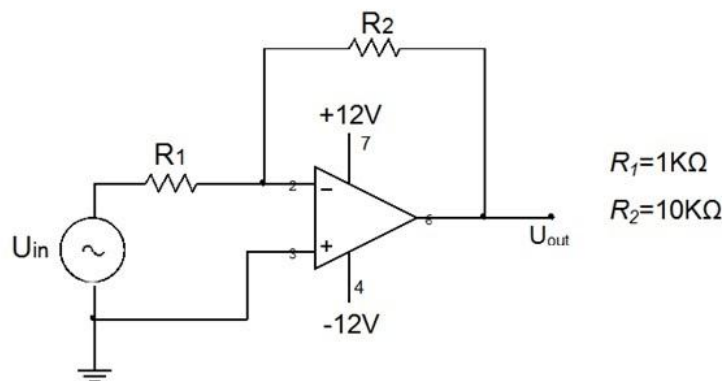
(γ) Στην περίπτωση αυτή έχουμε γραμμική ή μη γραμμική λειτουργία; Υπάρχει αναστροφή τάσης στην έξοδο; Εξηγήστε αναλυτικά στην εργασία σας.

Παρατηρήσεις-Σχόλια

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις, καθώς και τις απαντήσεις σας στις θεωρητικές ερωτήσεις που περιέχονται στο φυλλάδιο αυτό, θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

Πείραμα 2: Γραμμικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές

Κατασκευάστε το κύκλωμα με AC σήμα εισόδου πλάτους $U_{in,0} = 1V$ και συχνότητα 1kHz.



(α) Υπολογίστε αναλυτικά το συντελεστή ενίσχυσης του συνολικού κυκλώματος (όχι του τελεστικού ενισχυτή). Τι συμβαίνει όταν προσθέτουμε DC συνιστώσα στο σήμα εισόδου;

(β) Συνδέστε το ένα κανάλι του παλμογράφου στην είσοδο και το άλλο στην έξοδο. Παρατηρήστε τις κυματομορφές και σχεδιάστε αυτές παρακάτω.

Κυματομορφή εισόδου

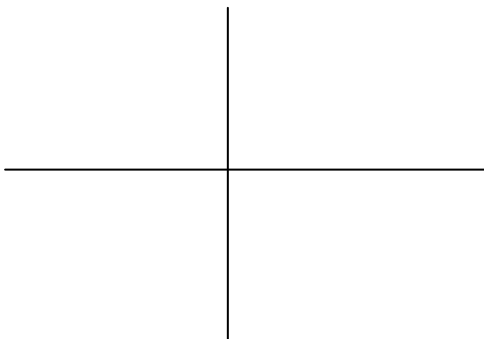


Κυματομορφή εξόδου



(γ) Με την λειτουργία X-Y του παλμογράφου παρατηρήστε την χαρακτηριστική τάσης εισόδου-εξόδου και σχεδιάστε την παρακάτω.

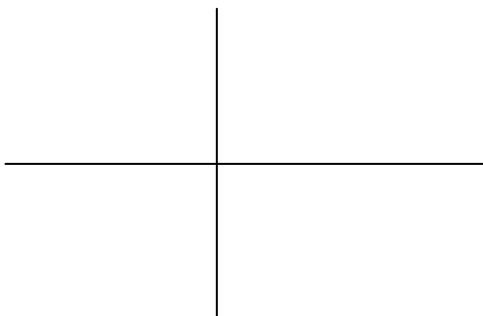
Χαρακτηριστική τάσης εισόδου-εξόδου



Να ορίσετε τους άξονες και να αναφέρετε τις μονάδες των μεγεθών που σχεδιάζετε. Ποια είναι η οριακή μέγιστη τιμή της τάσης του σήματος εισόδου μέχρι την οποία συνεχίζουμε να έχουμε γραμμική λειτουργία του κυκλώματος;

(δ) Στην λειτουργία X-Y του παλμογράφου, αυξήστε το πλάτος του σήματος εισόδου μέχρι την τιμή που υπολογίσατε στο ακριβώς προηγούμενο ερώτημα, ώστε να παρατηρήσετε τη μη γραμμική περιοχή. Σχεδιάστε την κυματομορφή παρακάτω.

Χαρακτηριστική τάσης εισόδου - εξόδου

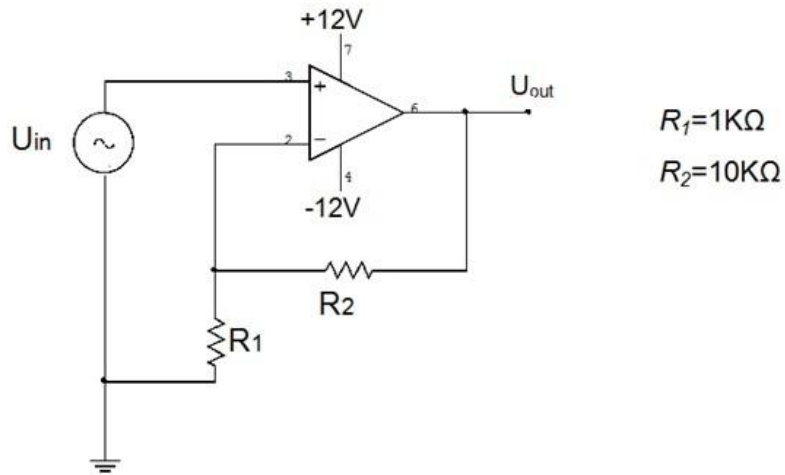


Να ορίσετε τους άξονες και να αναφέρετε τις μονάδες των μεγεθών που σχεδιάζετε.

Παρατηρήσεις-Σχόλια

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις, καθώς και τις απαντήσεις σας στις θεωρητικές ερωτήσεις που περιέχονται στο φυλλάδιο αυτό, θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα με AC σήμα εισόδου πλάτους $U_{in,0} = 1V$ και συχνότητα 1kHz.



(α) Υπολογίστε αναλυτικά τον συντελεστή ενίσχυσης του κυκλώματος. Τι συμβαίνει όταν προσθέτουμε μια DC συνιστώσα στο σήμα εισόδου;

(β) Συνδέστε το ένα κανάλι του παλμογράφου στην είσοδο και το άλλο στην έξοδο. Παρατηρείστε τις κυματομορφές και σχεδιάστε τις παρακάτω.

Κυματομορφή εισόδου

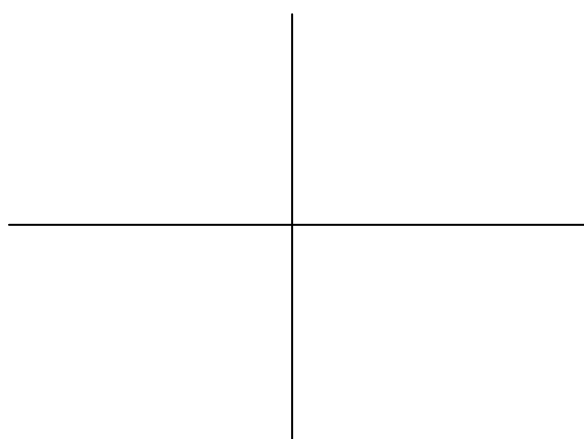


Κυματομορφή εξόδου



(γ) Από την λειτουργία X-Y παρατηρείστε την χαρακτηριστική και σχεδιάστε την αναγράφοντας και τις κλίμακες των τάσεων επάνω στον παλμογράφο.

Χαρακτηριστική τάσης



Να ορίσετε τους άξονες και να αναφέρετε τις μονάδες των μεγεθών που σχεδιάζετε. Ποια είναι η οριακή μέγιστη τιμή της τάσης του σήματος εισόδου μέχρι την οποία συνεχίζουμε να έχουμε γραμμική λειτουργία του κυκλώματος;

(δ) Μειώνουμε το πλάτος του σήματος μέχρι η συνδεσμολογία να λειτουργεί στην γραμμική περιοχή μόνο. Στην συνέχεια συνδέουμε το κιβώτιο αντιστάσεων στην έξοδο **με το κιβώτιο αρχικά να δίνει τη μέγιστη τιμή αντίστασης του**. Στη συνέχεια, μειώνουμε σιγά-σιγά την τιμή της. Τι παρατηρούμε στον παλμογράφο; Για ποιά τιμή αντίστασης συμβαίνει αυτό; Τι συμπεράσματα βγάξετε;

Παρατηρήσεις-Σχόλια

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις, καθώς και τις απαντήσεις σας στις θεωρητικές ερωτήσεις που περιέχονται στο φυλλάδιο αυτό, θα πρέπει να τις συμπεριλάβετε και στις εργασίες που θα παραδώσετε, μαζί με τα απαραίτητα αναλυτικά σχόλια.

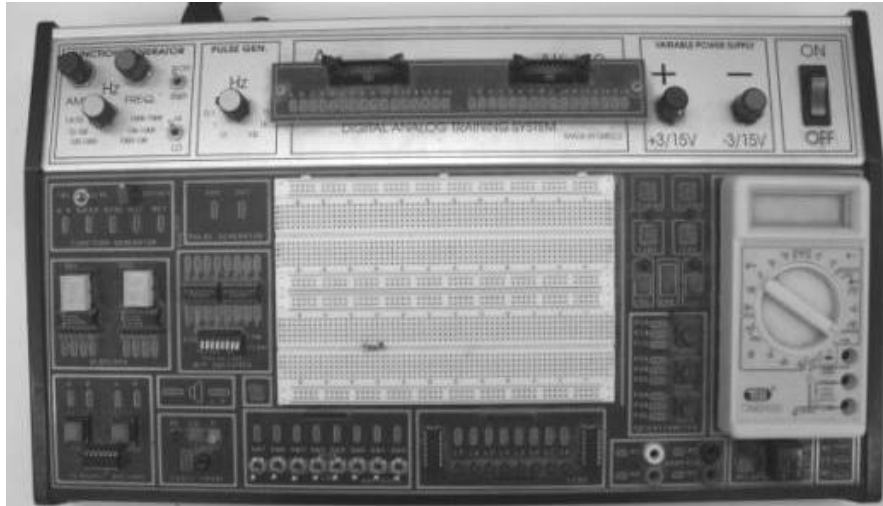
Βιβλιογραφία

- Γ.Σ. Τόμπρας, “Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική”, *Εκδόσεις Δίαυλος*, 2006
- Γ.Σ. Τόμπρας, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής Φυσικής”, *Έκδοση Πανεπιστημίου Αθηνών*, 2005
- Θ.Λ. Δεληγιάννης, “Ηλεκτρονικά Στοιχεία – Κυκλώματα”, Τόμος Α, 1981
- R.C. Dorf, “ The Electrical Engineering Handbook”, *CRC Press*, 1993
- P.E. Gray and G.L. Searle, “Electronic Principles: Physics, Models, and Cicruits”, *Publisher J.Wiley & Sons*, 1969
- Κ. Καρούμπalos και Γ. Φιλοκύπρου, “Μαθήματα Ηλεκτρονικής”, 1978
- S.D. Senturia and B.D. Wedlock, “Electronic Circuits and Applications”, *Publisher J. Wiley & Sons*, 1975
- Γ. Θεοδωρίδης, Κ. Κοσματόπουλος, Θ. Λαόπουλος, Σ. Νικολαΐδης, Κ. Παπαθανασίου, και Σ. Σίσκος, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής”, Εκδ. Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, 2009.
- C.K. Alexander and M.N.O. Sadiku, “Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα”, 4^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2013
- A. Malvino and D.J. Bates, “Ηλεκτρονική αρχές και εφαρμογές”, 7^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2013.
- R.L. Boylestad and L. Nashelsky, “Ηλεκτρονικές διατάξεις και θεωρία κυκλωμάτων”, 10^η Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2012.

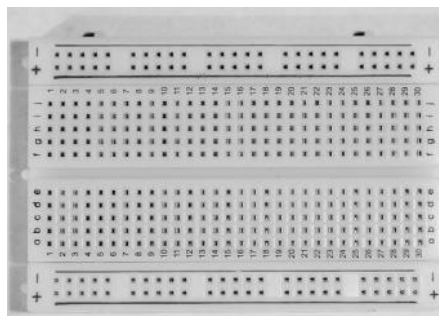
Παραρτήματα

Παράρτημα Ηλεκτρονικής Φυσικής

Επιφάνεια εργασίας – κονσόλα βασικών εργαλείων

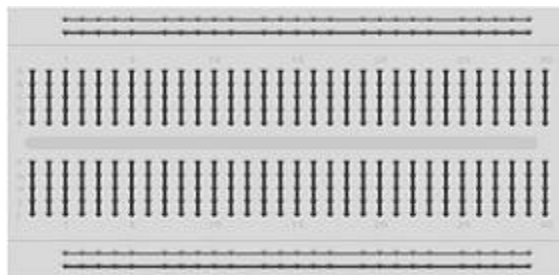


Όπως παρατηρούμε στην παρακάτω εικόνα, η κονσόλα διαθέτει μια ποικιλία λειτουργιών τις οποίες και θα αναλύσουμε στην συνέχεια.



α) Η πλακέτα για υλοποίηση κυκλωμάτων (breadboard):

Το breadboard είναι η περιοχή στην οποία υπάρχουν υποδοχές για να τοποθετούμε τα στοιχεία για την κατασκευή του κυκλώματος. Προκειμένου τα στοιχεία να επικοινωνούν μεταξύ τους, το breadboard εσωτερικά αποτελείται από χάλκινους “διαδρόμους” που βραχυκυκλώνουν τις υποδοχές όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



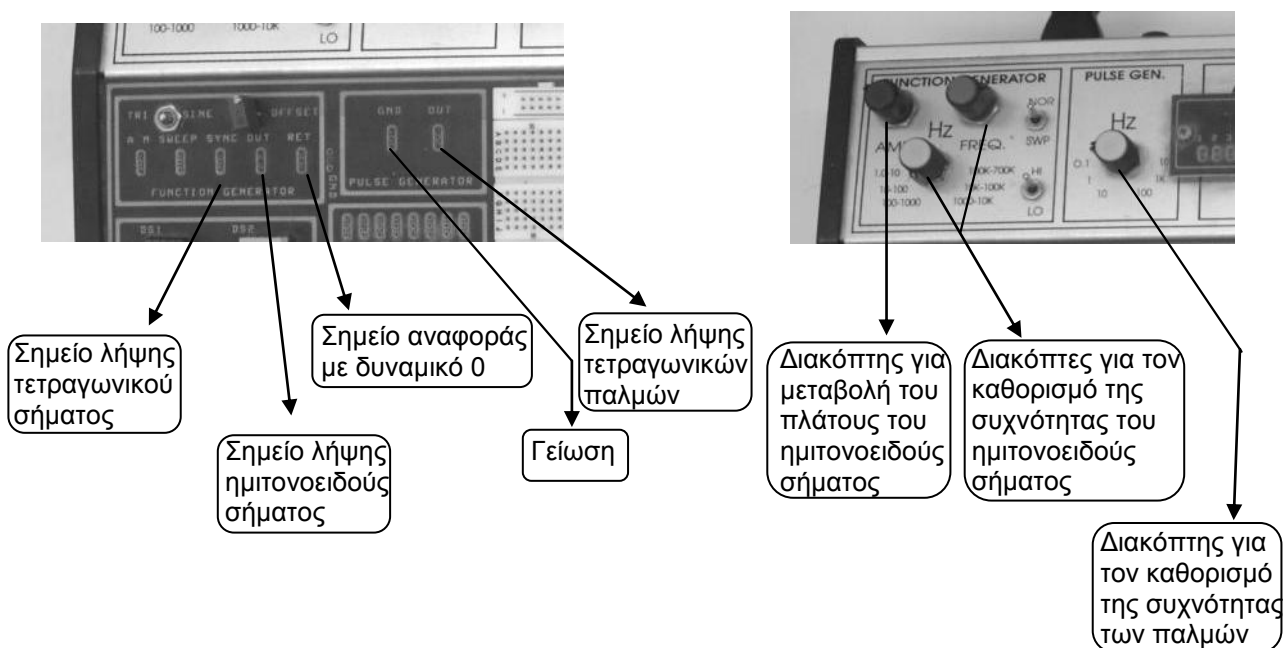
Για την υλοποίηση ενός κυκλώματος σε breadboard πολλές φορές δεν αρκούν οι χάλκινοι διάδρομοι για να γίνουν όλες οι συνδέσεις. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε τα χάλκινα

μονόκλινα καλώδια. Τα καλώδια αυτά βρίσκονται στη διάθεση των ασκούμενων φοιτητών στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής Φυσικής.

Στην κατασκευή ενός κυκλώματος θα πρέπει να γίνεται προσπάθεια να είναι με τον απλούστερο δυνατό τρόπο χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερα καλώδια ενώ ταυτόχρονα τα στοιχεία να μην συνωστίζονται. Με αυτόν το τρόπο το αποφεύγονται ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα καθώς επίσης το κύκλωμα μπορεί να ελεγχθεί πιο εύκολα σε περίπτωση που δεν λειτουργεί σωστά.

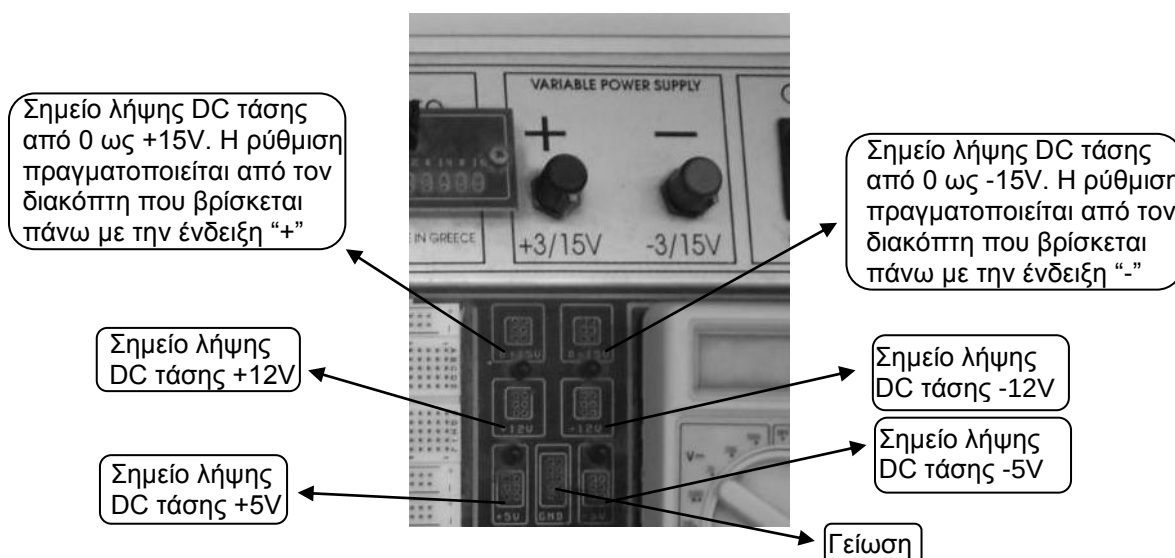
β) Πηγή AC σημάτων τάσης και παλμών

Από την κονσόλα μπορούμε να λάβουμε ημιτονοειδή σήματα και παλμούς με δυνατότητα ρύθμισης του πλάτους και της συχνότητας. Τα σήματα αυτά και οι ρυθμίσεις βρίσκονται στο σημείο που φαίνεται παρακάτω



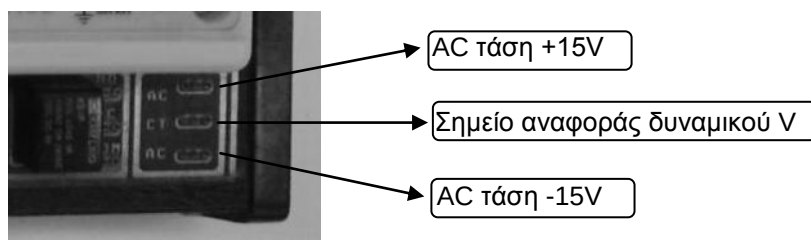
γ) Πηγές DC τάσης

Από την κονσόλα μπορούμε να λάβουμε DC τάση με δυνατότητα ρύθμισης του πλάτους της όπως φαίνεται παρακάτω:



δ) Μετασχηματιστής

Η κονσόλα διαθέτει μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα πηνία ο οποίος συνδέεται ως εξής:

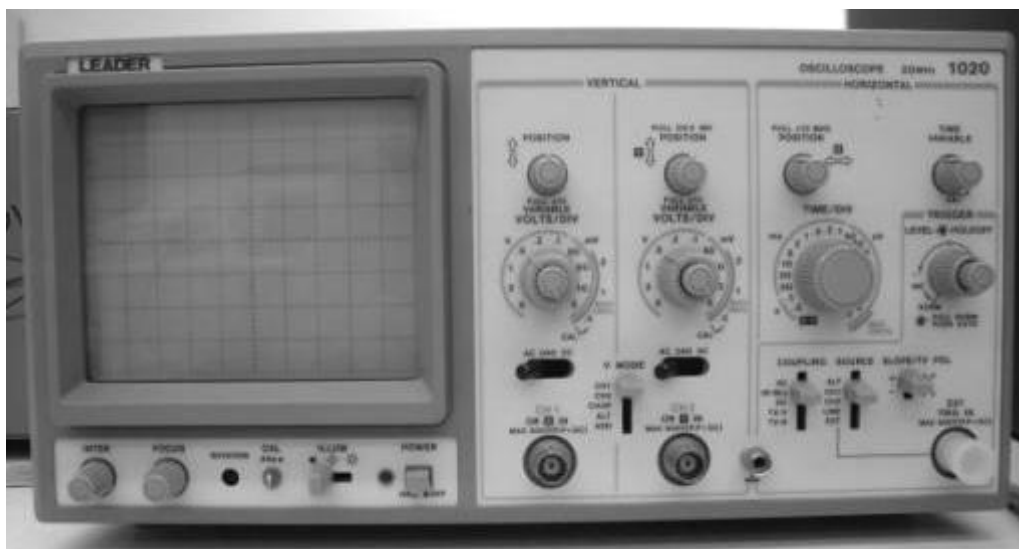


- Για να λειτουργήσουν όλες οι πηγές σήματος θα πρέπει να θέσουμε σε λειτουργία την κονσόλα από τον διακόπτη λειτουργίας.
- Η επιφάνεια εργασίας διαθέτει αρκετές ακόμα λειτουργίες οι οποίες όμως δε θα αναλυθούν και χρησιμοποιηθούν στο εργαστήριο αυτό.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Κατά την διάρκεια κατασκευής ενός κυκλώματος η κονσόλα θα πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας για την αποφυγή ατυχήματος. Πριν την θέσουμε σε λειτουργία το κύκλωμα θα πρέπει να έχει ελεγχθεί.

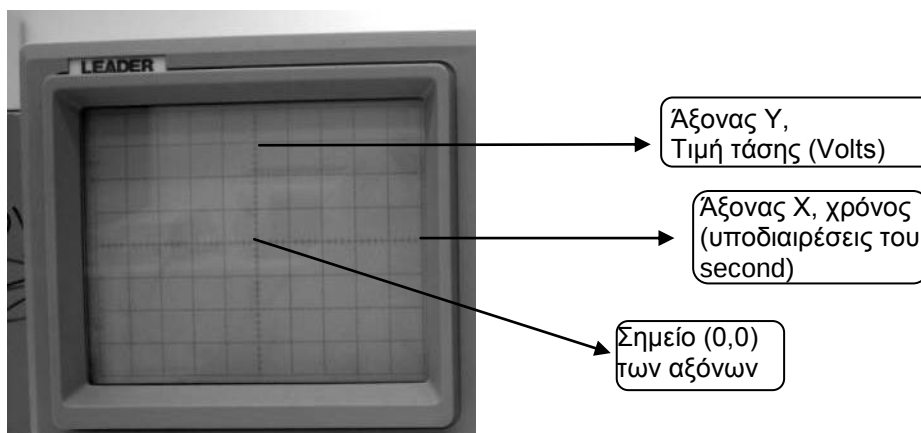
Παλμογράφος

Ο παλμογράφος είναι ένα όργανο απεικόνισης κυματομορφών σημάτων τάσης. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των βασικών λειτουργιών του.



Ο παλμογράφος που υπάρχει στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικής για την άσκηση των φοιτητών, διαθέτει 2 κανάλια. Δηλαδή 2 ζεύγη καλωδίων τα οποία μπορούν να μετρήσουν δύο διαφορετικά σήματα τάσης και να τις απεικονίσουν ταυτόχρονα στην οθόνη.

Η οθόνη διαθέτει ένα πλέγμα το οποίο μας βοηθά να μετρήσουμε το πλάτος και την περίοδο (άρα και τη συχνότητα) ενός σήματος.



Το πλέγμα διαθέτει δύο κεντρικούς άξονες, τον (οριζόντιο) άξονα του χρόνου και (τον κατακόρυφο) του πλάτους της απεικονιζόμενης τάσης. Το υπόλοιπο πλέγμα διαιρεί τους άξονες σε ίσα τμήματα. Κάθε τμήμα ισούται με μία τιμή η οποία καθορίζεται από τους διακόπτες:



Ο δείκτης του διακόπτη “VOLTS/DIV” μας δείχνει σε πόσα Volts αντιστοιχεί κάθε τμήμα (τετράγωνο) στον άξονα των τάσεων. Παρατηρούμε τον δείκτη του εξωτερικού διακόπτη, πχ. στην εικόνα αυτή κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί σε 0.5mV.

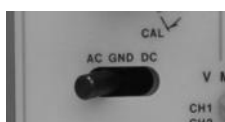


Ο δείκτης του διακόπτη “TIME/DIV” μας δείχνει σε πόσα seconds αντιστοιχεί κάθε τμήμα (τετράγωνο) στον άξονα του χρόνου.

Πρέπει να προσέξουμε ότι **γυρνώντας τον διακόπτη και αλλάζοντας τα Volts και τα δευτερόλεπτα που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα αλλάζουμε την κλίμακα που παρατηρούμε το σήμα και ΟΧΙ τα χαρακτηριστικά του σήματος. Ουσιαστικά είναι σαν να κάνουμε μεγέθυνση ή σμίκρυνση του σήματος για να μπορούμε να το μελετήσουμε καλύτερα.**



Επίσης υπάρχουν οι διακόπτες “Position”. Γυρνώντας τους διακόπτες αυτούς απλά μετατοπίζουμε την απεικόνιση του σήματος στους άξονες. Κάθε κανάλι διαθέτει αυτόνομους διακόπτες VOLTS/DIV όμως ο διακόπτης TIME/DIV είναι, προφανώς, κοινός και για τα δύο κανάλια.



Κάθε κανάλι διαθέτει τον διακόπτη στα αριστερά με τον οποίο επιλέγουμε ποιά συνιστώσα του σήματος θα παρατηρήσουμε (AC ή DC). Η επιλογή GND μηδενίζει το σήμα (ευθεία γραμμή που πρέπει να συμπίπτει με το μηδέν της τάσης). Συνήθως χρησιμοποιούμε την επιλογή αυτή για να τοποθετήσουμε σωστά το κανάλι ως προς τον άξονα x (βαθμονόμηση). Δηλαδή τοποθετούμε την γραμμή μηδενικής τάσης πάνω στον άξονα x και στην συνέχεια



παρατηρούμε την AC ή/και την DC συνιστώσα.

Με τον διακόπτη αυτό επιλέγουμε ποιιά σήματα θα δούμε στην οθόνη. Στην θέση CH1 παρατηρούμε μόνο την κυματομορφή του καναλιού 1. Στην θέση CH2 την κυματομορφή τάσης του καναλιού 2 και στην επιλογή CHOP παρατηρούμε και τις δυο κυματομορφές ταυτόχρονα.

Στον διακόπτη TIME/DIV που περιγράψαμε πριν, υπάρχει και μια πρόσθετη λειτουργία, αυτή της λήψης χαρακτηριστικής X-Y. Στρέφουμε τον διακόπτη στην ένδειξη X-Y και τότε παρατηρούμε στον παλμογράφο, στον άξονα X την τάση του καναλιού 1 και στον άξονα Y την τάση του καναλιού 2.

Πολύμετρο

Ένα από τα πιο σημαντικά όργανα μέτρησης ενός εργαστηρίου ηλεκτρονικής φυσικής είναι το πολύμετρο. Μας βοηθάει να μετρήσουμε μεγέθη όπως η τάση, το ρεύμα η αντίσταση. Διαθέτει όμως και άλλες λειτουργίες τις οποίες θα αναλύσουμε. Στη συνέχεια βλέπουμε την φωτογραφία ενός τυπικού πολυμέτρου.

Το πολύμετρο διαθέτει δύο ακροδέκτες, έναν κόκκινο και έναν μαύρο. Στο κάτω μέρος του πολυμέτρου βρίσκονται οι υποδοχές για τους ακροδέκτες



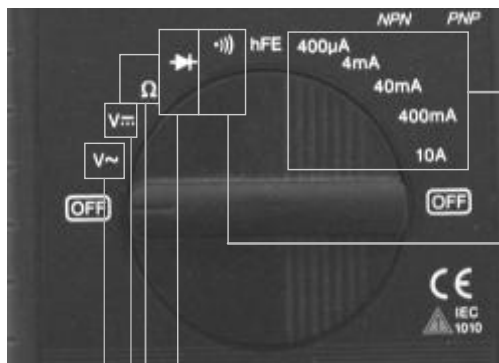


Η υποδοχή αυτή αποτελεί το σημείο αναφοράς δυναμικού 0 (common). Στην υποδοχή αυτή συνδέουμε πάντα τον μαύρο ακροδέκτη.

Στην υποδοχή αυτή συνδέουμε το κόκκινο καλώδιο για να κάνουμε μετρήσεις τάσεις, αντίστασης και για κάθε άλλη λειτουργία εκτός της μέτρησης ρεύματος.

Στις υποδοχές αυτές A-mA, συνδέουμε τον κόκκινο ακροδέκτη εάν θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις ρεύματος και μόνο. Η κάθε υποδοχή αναφέρει τη μέγιστη ένταση του ρεύματος που αντέχει το πολύμετρο.

Στο κέντρο του πολυμέτρου υπάρχει ο διακόπτης με τον οποίο επιλέγουμε την λειτουργία μέτρησης για την οποία θέλουμε να το χρησιμοποιήσουμε.



Στρέφουμε τον διακόπτη στις επιλογές αυτές όταν θέλουμε να μετρήσουμε ρεύμα επιλέγοντας την τάξη μεγέθους του.

Χρησιμοποιούμε την λειτουργία αυτή αν θέλουμε να ελέγξουμε την παρουσία βραχυκυκλώματος μεταξύ δυο σημείων. Τοποθετούμε τους ακροδέκτες στα σημεία αυτά και στην περίπτωση που υπάρχει τότε ακούγεται ένας χαρακτηριστικός ήχος (BEEP).

Χρησιμοποιούμε την λειτουργία αυτή για να μετρήσουμε την τάση στην οποία άγει μια διόδος. Για να δούμε την ένδειξη αυτή πρέπει να τοποθετήσουμε τον μαυρο ακροδέκτη στην κάθοδο και τον κόκκινο στην άνοδο.

Στη λειτουργία αυτή μετράμε την αντίσταση μεταξύ δύο σημείων

Στρέφουμε τον διακόπτη στην ένδειξη αυτή για να μετρήσουμε DC τάση.

Στην λειτουργία αυτή, μπορούμε να μετρήσουμε AC τάση (τιμή rms)



Τέλος υπάρχει και η λειτουργία “hFE”. Στην λειτουργία αυτή μπορούμε να μετρήσουμε το συντελεστή ενίσχυσης β (h_{FE}) ενός τρανζίστορ. Για να πραγματοποιήσουμε την μέτρηση αυτή στρέφουμε το διακόπτη στην θέση h_{FE} και τοποθετούμε το τρανζίστορ στην υποδοχή,

Θα πρέπει να προσέξουμε αν το τρανζίστορ είναι NPN ή PNP καθώς και να τοποθετήσουμε σωστά τους ακροδέκτες του τρανζίστορ στις υποδοχές (Ε-εκπομπός, Β-βάση, C-συλλέκτης).

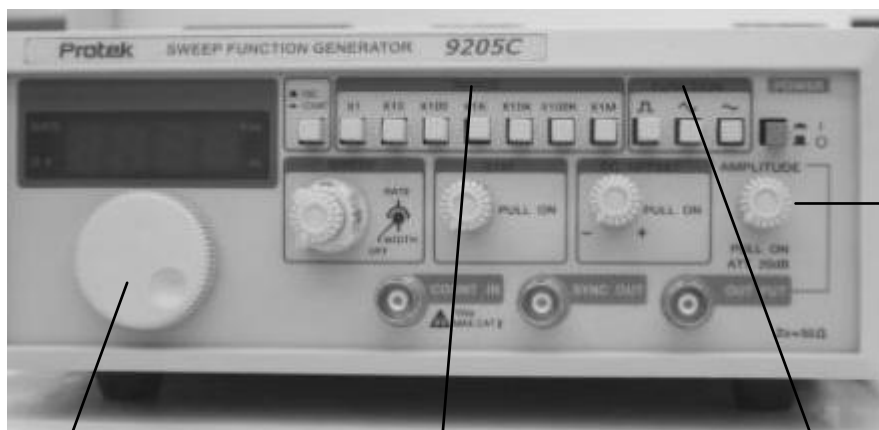
Κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων με το πολύμετρο, μερικές φορές μπορεί να παρατηρήσουμε την ένδειξη OL στην οθόνη. Η ένδειξη αυτή σημαίνει Over Limit δηλαδή το πολύμετρο δεν μπορεί να δώσει την ένδειξη αυτή συνήθως επειδή είναι πολύ μεγάλη η τιμή αυτή. Πχ για πολύ μεγάλη τιμή αντίστασης (ανοιχτό κύκλωμα).

Τεχνική μέτρησης δυναμικού σε σημεία ενός κυκλώματος.

Πολλές φορές δεν αρκεί η μέτρηση της τάσης στα μεταξύ δύο σημείων αλλά χρειάζεται να ξέρουμε και το δυναμικό σε κάθε σημείο. Αυτή η μέτρηση μπορεί να γίνει τοποθετώντας τον μαύρο ακροδέκτη στο κοινό σημείο του κυκλώματος (σημείο αναφοράς δυναμικού 0) και τον κόκκινο ακροδέκτη στο σημείο που θέλουμε να μετρήσουμε το δυναμικό.

Γεννήτρια συχνοτήτων

Η γεννήτρια συχνοτήτων είναι η συσκευή από την οποία μπορούμε να δημιουργήσουμε AC σήματα (ημιτονοειδή, τριγωνικά κ.α) με το πλάτος και την συχνότητα που χρειαζόμαστε.



Διακόπτης για την ακριβή ρύθμιση της συχνότητας.

Επιλογής της τάξης μεγέθους της συχνότητας που θέλουμε να έχει το σήμα

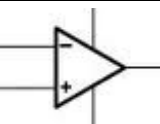
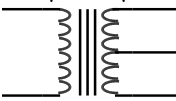
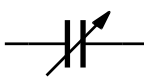
Επιλογής του είδους του σήματος που θέλουμε να δημιουργήσουμε: παλμό ή τριγωνικό ή ημιτονοειδές

Διακόπτης ρύθμισης του πλάτους του σήματος

Στην οθόνη της γεννήτριας βλέπουμε την συχνότητα του σήματος που έχουμε δημιουργήσει.

Ηλεκτρικά στοιχεία

Πίνακας συμβόλων των βασικών ηλεκτρικών στοιχείων:

Αντίσταση		Πηγή DC τάσης	
Πυκνωτής		Πηγή AC τάσης	
Πηνίο		Γείωση	
Δίοδος		Κοινό (σημείο αναφοράς)	
Τελεστικός Ενισχυτής		Μετασχηματιστής	
Τρανζίστορ		Μεταβλητή αντίσταση	
Μεταβλητός Πυκνωτής			

α) Αντιστάσεις

Οι συνηθισμένες αντιστάσεις έχουν την παρακάτω μορφή

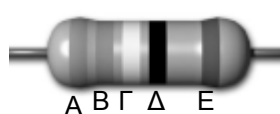
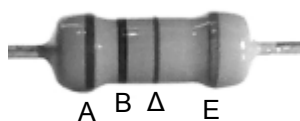


Την τιμή των αντιστάσεων την υπολογίζουμε με βάση το χρωματικό κώδικα. Όπως παρατηρούμε και στις παραπάνω εικόνες, οι αντιστάσεις φέρουν 3 ή 4 χρωματιστές λωρίδες καθώς και μία λωρίδα ακόμα που είναι πιο απομακρυσμένη. Την τιμή την υπολογίζουμε με βάση τον επόμενο πίνακα.

Χρώμα	A	B	Γ	Δ	Ε
Μαύρο	0	0	0	$\times 10^0$	
Καφέ	1	1	1	$\times 10^1$	$\pm 1 \%$
Κόκκινο	2	2	2	$\times 10^2$	$\pm 2 \%$
Πορτοκαλί	3	3	3	$\times 10^3$	
Κίτρινο	4	4	4	$\times 10^4$	
Πράσινο	5	5	5	$\times 10^5$	
Μπλε	6	6	6	$\times 10^6$	

Χρώμα	A	B	Γ	Δ	Ε
Μωβ	7	7	7	--	
Γκρι	8	8	8	--	
Ασπρο	9	9	9	--	
Χρυσό	--	--	--	$\times 10^{-1}$	$\pm 5 \%$
Ασημένιο	--	--	--	$\times 10^{-2}$	$\pm 10 \%$
Αχρωμο	--	--	--	--	$\pm 20 \%$

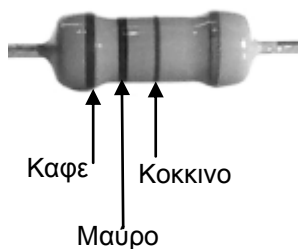
Αρχικά λοιπόν παρατηρούμε αν η αντίσταση φέρει 3+1 ή 4+1 λωρίδες. Οι 3 (ή 4) μας βοηθάν στην τιμή της αντίστασης και η άλλη στην τιμή της ανοχής. Στην συνέχεια ακολουθούμε τον παρακάτω κανόνα



Κάθε χρώμα αντιστοιχεί στην αντίστοιχη στήλη του πίνακα. Το πρώτο χρώμα μας δίνει το πρώτο ψηφίο της αντίστασης, το δεύτερο χρώμα το δεύτερο ψηφίο αντίστοιχα (στις αντιστάσεις με 4+1 χρώματα το τρίτο χρώμα μας δίνει το τρίτο ψηφίο) και το επόμενο χρώμα είναι ο πολλαπλασιαστής.

66

Παράδειγμα:



$$= 1 \ 0 \times 10^2 = 1000\Omega = 1K\Omega$$

β) Πυκνωτές

Υπάρχουν πολλά είδη πυκνωτών ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους όπως οι κεραμικοί, πολυεστερικοί, ηλεκτρολυτικοί, τανταλίου κ.α. Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες πυκνωτών:



Κεραμικοί



Ηλεκτρολυτικός

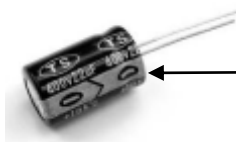


Πολυεστερικός



Τανταλίου

Οι πυκνωτές (εκτός των ηλεκτρολυτικών) δεν έχουν πολικότητα, οπότε τοποθετούνται με οποιονδήποτε τρόπο στο κύκλωμα. **Οι ηλεκτρολυτικοί όμως διαθέτουν πολικότητα και μάλιστα αν τοποθετηθούν αντίστροφα καταστρέφονται.** Ο ακροδέκτης με την αρνητική πολικότητα ξεχωρίζει από την ειδική λωρίδα που φαίνεται παρακάτω:



Λωρίδα αρνητικής πολικότητας

Η τιμή της χωρητικότητας για τους πυκνωτές (εκτός των ηλεκτρολυτικών) δίνεται από τον κωδικό που αναγράφεται πάνω τους. Αφού βρούμε τον κωδικό αυτό θα πρέπει να ανατρέξουμε στον κατάλληλο πίνακα. Ο πίνακας αυτός διαφέρει για κάθε υλικό πυκνωτή.

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αναγράφουν την τιμή της χωρητικότητάς τους δίπλα στην λωρίδα πολικότητας που είδαμε πριν.