

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η αστρονομική παρατήρηση

Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στους περισσότερους κλάδους της φυσικής, ο ερευνητής που ασχολείται με τη μελέτη των ουρανίων αντικειμένων βρίσκεται (συνήθως) σε μεγάλη απόσταση από αυτά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να πραγματοποιήσει πειράματα, με τη συνηθισμένη σημασία της λέξης, δηλαδή να δημιουργήσει κάποιες συνθήκες και να μετρήσει τη συμπεριφορά της ύλης κάτω από αυτές. Στην αστροφυσική οι φυσικές συνθήκες είναι δεδομένες και ο μελετητής προσπαθεί να τις *διαγνώσει*, δηλαδή να μετρήσει από μακριά τις τιμές φυσικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η ταχύτητα κίνησης, το μαγνητικό πεδίο. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, επιχειρεί στη συνέχεια να βγάλει συμπεράσματα για τα φαινόμενα, για τις φυσικές διαδικασίες που εμπλέκονται και γενικότερα για τη συμπεριφορά του αντικειμένου της μελέτης του.

Η διαδικασία αυτή συνιστά την *αστρονομική παρατήρηση*, η οποία υποκαθιστά το πείραμα. Προφανώς, για να επιτύχει στη διάγνωση των φυσικών συνθηκών, ο αστροφυσικός πρέπει να αναπτύξει τα κατάλληλα όργανα και σ' αυτή τη διαδικασία λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί ένας εργαστηριακός συνάδελφός του. Επί πλέον, στην προσπάθειά του για την κατανόηση των φαινομένων, ο αστροφυσικός χρησιμοποιεί πειραματικά δεδομένα από άλλους κλάδους, όπως π.χ. την οπτική, τη φασματοσκοπία, την πυρηνική φυσική ή ακόμα, όταν τέτοια δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, χρειάζεται να τα παράξει ο ίδιος.

Με την ανάπτυξη της διαστημικής έχει γίνει δυνατή η προσπέλασή μας σε ένα μέρος του διαστήματος, το μεσοπλανητικό χώρο και τα σώματα του ηλιακού συστήματος. Η αστροφυσική χρησιμοποιεί το διάστημα για *επιτόπιες μετρήσεις*, αλλά και για παρατηρήσεις αντικειμένων από κοντά, ακόμα και για να αποφύγει τα εμπόδια που βάζει η ατμόσφαιρα της Γης.

Η μόνη δυνατότητα *ενεργητικών μετρήσεων* που έχουμε είναι η χρήση ραντάρ για κοντινά αντικείμενα. Με ιδιαίτερη επιτυχία χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος στη μελέτη πλανητών και αστεροειδών από τη Γη, αλλά και για τη χαρτογράφηση της επιφάνειας της Αφροδίτης από το διαστημόπλοιο Magellan.

1.2 Οι φορείς της πληροφορίας

Το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας που φτάνει σε μας μεταφέρεται από *φωτόνια*. Η αστρονομική παρατήρηση ασχολείται σε μεγάλο βαθμό με τη συλλογή και την ανάλυση των φωτονίων και με αυτά κυρίως θα απασχοληθούμε στο βιβλίο αυτό. Δεν είναι όμως τα φωτόνια η μοναδική μας πηγή. Πληροφορίες φτάνουν σε μας και με υλικούς φορείς, σε δύο μορφές: ως *κοσμικές ακτίνες*, σωμάτια όλων των ειδών που φτάνουν στη Γη από διάφορα μέρη του διαστήματος, αλλά και ως *μετεωρίτες*, που μεταφέρουν συμπυκνωμένη ύλη από το ηλιακό μας σύστημα. Ένας άλλος φορέας πληροφορίας, ανεπιβεβαίωτος ακόμα, είναι η *βαρυτική*

ακτινοβολία¹, που ενδεχόμενα δημιουργείται κάτω από ιδιαίζουσες συνθήκες.

Τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζουν σημαντική ανάπτυξη δύο νέοι κλάδοι της παρατήρησης. Ο ένας από αυτούς είναι η *αστρονομία των νετρίνων*. Τα σωματίνα αυτά, ελάχιστης ή μηδενικής μάζας, παράγονται σε πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό των αστεριών, σε εκρήξεις σουπερνόβα, σε ενεργούς γαλαξίες και φθάνουν σε μας σχεδόν ανεμπόδιστα. Η ανίχνευσή τους όμως έχει σημαντικές δυσκολίες. Ο άλλος κλάδος είναι η μελέτη του εσωτερικού του ήλιου και των αστεριών με βάση κύματα που παρατηρούνται στη φωτόσφαιρά τους (*ηλιοσεισμολογία ή αστροσεισμολογία*). Τα κύματα αυτά ανιχνεύονται με βάση τη μετάθεση Doppler των φασματικών γραμμών και παρουσιάζουν ένα πολύ πλούσιο φάσμα συχνοτήτων και κυματαριθμών.

1.3 Η διαδικασία της παρατήρησης

Η παρατήρηση έχει στόχο να καταγράψει, κατά τον δυνατόν πιστότερα, τις ιδιότητες των φωτονίων που φτάνουν στο όργανο. Αν το όργανο βρίσκεται στο έδαφος, η ποιότητα της παρατήρησης θα επηρεαστεί σοβαρά από την ατμόσφαιρα της Γης, θέμα που θα μας απασχολήσει στο επόμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, κάθε όργανο εκτελεί τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- Συλλέγει τα φωτόνια που περνούν από το άνοιγμά του.
- Συνήθως σχηματίζει εικόνα του αντικειμένου.
- Επιλέγει μία φασματική περιοχή, ή κάνει φασματική ανάλυση.
- Μετρά τα φωτόνια με κάποιο σύστημα που είναι ευαίσθητο σ' αυτά και καταγράφει το αποτέλεσμα.

Με κάποιες εξαιρέσεις, κάθε μία από τις παραπάνω λειτουργίες εκτελείται από ξεχωριστό μέρος του οργάνου. Θα τις εξετάσουμε στα κεφάλαια 3 έως 6. Στο 7ο κεφάλαιο θα συζητήσουμε την πόλωση της ακτινοβολίας ενώ στο 8ο θα ασχοληθούμε με την παρατήρηση άλλων φορέων αστρονομικής πληροφορίας, πέρα από τα φωτόνια. Τέλος, στο παράρτημα θα δώσουμε κάποια στοιχεία *Αστρονομίας Θέσης* η οποία, μολονότι είναι έξω από τη φυσική πλευρά της αστρονομικής παρατήρησης, είναι απολύτως αναγκαία για την υλοποίησή της.

Αφού συλλέξει τις μετρήσεις του, ο παρατηρητής τις επεξεργάζεται για να διορθώσει, όσο αυτό είναι δυνατόν, την επίδραση που έχουν σ' αυτές τα όργανα. Η σχέση ανάμεσα στα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή και συλλέγονται από το όργανο και το τελικό αποτέλεσμα της παρατήρησης είναι πολύπλοκη. Ο παρατηρητής πρέπει να γνωρίζει πολύ καλά τη συμπεριφορά του οργάνου για να είναι σε θέση να διορθώσει τις μετρήσεις του, έτσι που να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν καλύτερα την αρχική κατανομή των φωτονίων. Μετά τις διορθώσεις αυτές, η παρατήρηση είναι έτοιμη για παραπέρα μελέτη και αξιοποίηση, αντικείμενο γενικότερο της αστροφυσικής.

1.4 Σύνδεση της ακτινοβολίας με τις φυσικές συνθήκες

Τα φωτόνια, αλλά και οι άλλοι φορείς πληροφορίας, καταγράφουν τις φυσικές συνθήκες της περιοχής όπου δημιουργήθηκαν. Η αποκάλυψη των φυσικών συνθηκών από τις ιδιότητες των φωτονίων δεν είναι απλή υπόθεση. Οι τοπικές φυσικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, πυκνότητα, μαγνητικό πεδίο, χημική σύσταση) προσδιορίζουν τους μηχανισμούς της ακτινοβολίας και τη φασματική κατανομή των φωτονίων σε

¹Πρόσφατα (Φεβρουάριος 2016) ανακοινώθηκε η ανίχνευση βαρυτικής ακτινοβολίας από την ομάδα του πειράματος LIGO (βλ. εδάφιο 8.3).

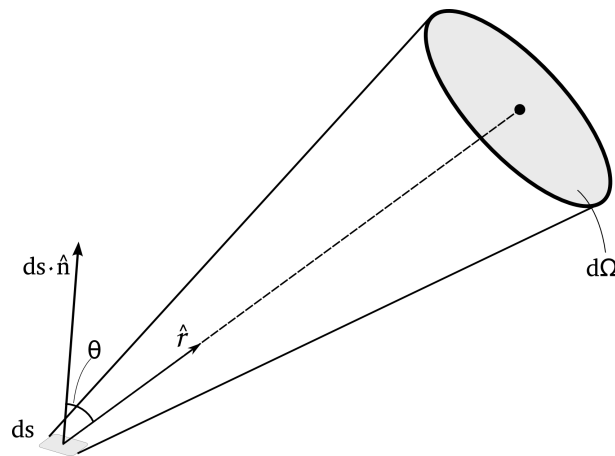
κάθε σημείο του αντικείμενου μας. Εδώ θα υπενθυμίσουμε κάποιες βασικές έννοιες και σχέσεις, χωρίς να εξαντλήσουμε το θέμα. Για περισσότερα, βλ. Αλυσσανδράκης (2014).

1.4.1 Η μεταφορά της ακτινοβολίας

Το βασικό μέγεθος που περιγράφει τη φασματική κατανομή των φωτονίων είναι η ειδική ένταση της ακτινοβολίας (specific intensity). Ας υποθέσουμε ότι ένας παρατηρητής δέχεται ακτινοβολία που περνά από μία στοιχειώδη επιφάνεια ds και περιέχεται σε κώνο στερεάς γωνίας $d\Omega$. Η κάθετος στην επιφάνεια σχηματίζει γωνία θ με τη διεύθυνση παρατήρησης, \hat{r} (Σχήμα 1.1). Η ενέργεια που δέχεται ο παρατηρητής στο χρονικό διάστημα dt , σε μία περιοχή συχνοτήτων ανάμεσα σε ν και $\nu + d\nu$ θα είναι:

$$dE_\nu = I_\nu ds \cos \theta d\Omega d\nu dt \quad (1.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση ορίζει την ειδική ένταση της ακτινοβολίας, I_ν , που είναι η ενέργεια που δέχεται ο παρατηρητής ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας, στερεάς γωνίας και συχνότητας. Αν μετράμε την ενέργεια σε erg, η ειδική ένταση θα εκφράζεται σε $\text{erg sec}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sterad}^{-1} \text{Hz}^{-1}$.



Σχήμα 1.1: Ορισμός της ειδικής έντασης της ακτινοβολίας.

Μέσα στο ίδιο το αντικείμενο τα φωτόνια διανύουν μια διαδρομή, κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης (line of sight), όπου κάποια απορροφώνται ενώ άλλα εκπέμπονται. Αυτό εκφράζεται από την εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας (equation of transfer):

$$\mu \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - S_\nu \quad (1.2)$$

Το οπτικό βάθος (optical depth), τ_ν , είναι αδιάστατη ποσότητα που χρησιμοποιείται στην Αστροφυσική αντί της απόστασης, ℓ , κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης. Ορίζεται από τη σχέση:

$$d\tau_\nu = -k_\nu \rho d\ell \quad (1.3)$$

όπου k_ν ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient) και ρ η πυκνότητα του υλικού. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το οπτικό βάθος μετράται από τον παρατηρητή προς το αντικείμενο, σε αντίθετη δηλαδή διεύθυνση από την απόσταση που μετράται από το αντικείμενο προς τον παρατηρητή. Έτσι το οπτικό βάθος είναι μέτρο της απόστασης και, ταυτόχρονα, της απορρόφησης.

Η ποσότητα S_ν στην εξίσωση (1.2) είναι ο λόγος του συντελεστή εκπομπής (emission coefficient), j_ν , προς το συντελεστή απορρόφησης k_ν και ονομάζεται *συνάρτηση πηγής της ακτινοβολίας* (source function).

$$S_\nu = j_\nu/k_\nu \quad (1.4)$$

Η συνάρτηση πηγής εκφράζει την εκπεμπτικότητα του υλικού και, στην περίπτωση θερμοδυναμικής ισορροπίας ή τοπικής θερμοδυναμικής ισορροπίας είναι ίση με τη συνάρτηση του Planck, που δίνει την εκπεμπτικότητα ενός μέλανος σώματος:

$$S_\nu = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.5)$$

όπου h η σταθερά του Planck και k η σταθερά του Boltzmann.

Η ειδική ένταση της ακτινοβολίας που μετρά ο παρατηρητής σε ένα σημείο κάποιου αντικειμένου δίνεται από την τυπική λύση της εξίσωσης μεταφοράς:

$$I_\nu(\tau_\nu = 0) = \int_0^\infty S_\nu(t_\nu) e^{-t_\nu} dt_\nu \quad (1.6)$$

όπου t_ν το οπτικό βάθος ως μεταβλητή ολοκλήρωσης.

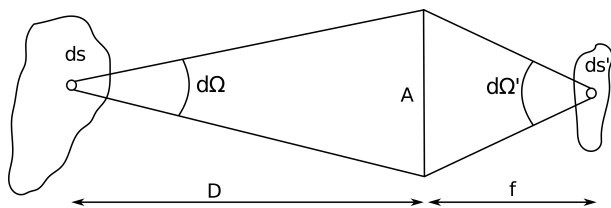
Η εξίσωση (1.6) μας λέει ότι στην ένταση που δέχεται ο παρατηρητής συμβάλλουν όλα τα στρώματα του αντικειμένου, το καθένα ανάλογα με την εκπεμπτικότητά του, $S_\nu(t_\nu)$, μειωμένη κατά την απορρόφηση των υπερκειμένων στρωμάτων, e^{-t_ν} .

Στην γενικότερη περίπτωση, η ειδική ένταση που μετρά ο παρατηρητής είναι συνάρτηση της συχνότητας, ν , του χρόνου, t και της θέσης πάνω στον ουρανό. Η θέση προσδιορίζεται από δύο γωνιακές συντεταγμένες, ας τις ονομάσουμε θ_x και θ_y , ή, με μορφή ανύσματος, $\boldsymbol{\theta}$:

$$I_\nu = I_\nu(\boldsymbol{\theta}, t) \quad (1.7)$$

1.4.2 Τι μετρά ένας παρατηρητής

Ας υποθέσουμε ότι ένας παρατηρητής χρησιμοποιεί κάποιο τηλεσκόπιο για να σχηματίσει εικόνα μιας *εκτεταμένης πηγής* (Σχήμα 1.2). Ως εκτεταμένες πηγές χαρακτηρίζονται τα αστρονομικά αντικείμενα που έχουν φαινόμενη (γωνιακή) διάμετρο μεγαλύτερη από τη διακριτική ικανότητα του οργάνου που χρησιμοποιούμε για την παρατήρησή τους, έτσι ώστε μπορούμε να διακρίνουμε λεπτομέρειες στην επιφάνειά τους. Τέτοια αντικείμενα είναι ο ήλιος, οι πλανήτες, τα νεφελώματα, οι γαλαξίες.



Σχήμα 1.2: Παρατήρηση εκτεταμένης πηγής.

Η ενέργεια που δέχεται το άνοιγμα του τηλεσκοπίου από μια στοιχειώδη επιφάνεια, ds , της εκτεταμένης πηγής είναι, σύμφωνα με την εξίσωση (1.1):

$$dE_\nu = I_\nu ds \Omega d\nu dt$$

όπου Ω είναι η στερεά γωνία υπό την οποία φαίνεται το άνοιγμα του τηλεσκοπίου από την πηγή και όπου για απλούστευση θέσαμε $\theta = 0$. Η στοιχειώδης επιφάνεια ds θα απεικονιστεί στη στοιχειώδη επιφάνεια ds' στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου, από όπου το άνοιγμα θα φαίνεται με στερεά γωνία Ω' . Έτσι η ενέργεια που περνάει από το άνοιγμα μπορεί να γραφτεί:

$$dE_\nu = I'_\nu ds' \Omega' d\nu dt$$

όπου I'_ν είναι η ειδική ένταση στο εστιακό επίπεδο. Από τις παραπάνω σχέσεις έχουμε, προφανώς:

$$I_\nu ds \Omega = I'_\nu ds' \Omega' \quad (1.8)$$

Αν η επιφάνεια του ανοίγματος είναι A , η απόσταση του αντικειμένου D και η εστιακή απόσταση του τηλεσκοπίου f , οι στερεές γωνίες Ω και Ω' δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Omega = \frac{A}{D^2}$$

$$\Omega' = \frac{A}{f^2}$$

Η μεγέθυνση του τηλεσκοπίου είναι f/D , συνεπώς ο λόγος των επιφανειών ds και ds' είναι

$$\frac{ds}{ds'} = \frac{D^2}{f^2}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και την (1.8) προκύπτει ότι

$$I'_\nu = I_\nu \quad (1.9)$$

δηλαδή η ειδική ένταση της ακτινοβολίας είναι η ίδια. Συνεπώς, για εκτεταμένες πηγές μπορούμε να μετρήσουμε την ειδική ένταση της ακτινοβολίας. Προσθέτουμε ότι η ενέργεια που θα καταγράψουμε ανά μονάδα επιφάνειας, συχνότητας και χρόνου θα είναι (σε $\text{erg}/\text{sec}/\text{cm}^2/\text{Hz}$):

$$E_\nu = I_\nu \Omega \quad (1.10)$$

Έτσι η τριδιάστατη κατανομή των φυσικών συνθηκών φτάνει σε μας, στην καλύτερη περίπτωση, ως διδιάστατη εικόνα, η οποία πρέπει να αποκρυπτογραφηθεί για να αποκαλύψει το περιεχόμενό της.

Στην περίπτωση που το αντικείμενό μας εμφανίζεται ως σημειακή πηγή (δηλαδή όταν το γωνιακό του μέγεθος είναι μικρότερο από τη διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου), ο παρατηρητής ολοκληρώνει την ειδική έντασης πάνω σε όλη την έκταση του αντικειμένου. Η ποσότητα που προκύπτει ονομάζεται ροή της ακτινοβολίας (flux):

$$\mathcal{F}_\nu = \int I_\nu(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y \quad (1.11)$$

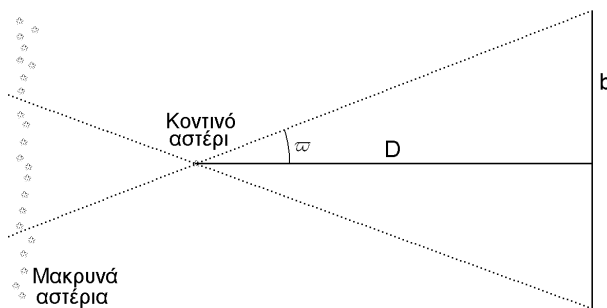
όπου θ_x, θ_y είναι οι γωνιακές αποστάσεις από το κέντρο το αντικειμένου. Στην περίπτωση ενός αστεριού, η ροή της ακτινοβολίας αντιστοιχεί στην ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας και συχνότητας (σε μονάδες $\text{erg sec}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) που περνάει από όλες τις διευθύνσεις από τη στοιχειώδη επιφάνεια ds του σχήματος 1.1:

$$\mathcal{F}_\nu = \int_{4\pi} I_\nu \cos \theta d\Omega \quad (1.12)$$

Κλασική περίπτωση σημειακών πηγών είναι τα αστέρια (εκτός από τον ήλιο).

1.5 Αποστάσεις

Η απόσταση ενός ουράνιου αντικειμένου είναι απαραίτητη όχι μόνο για να καθορίσουμε την θέση του στον τριδιάστατο χώρο, αλλά και για να υπολογίσουμε την ενέργεια που εκπέμπει το αντικείμενο από την ενέργεια που δεχόμαστε στη Γη. Η τεράστια διαφορά αποστάσεων ανάμεσα στα πιο κοντινά και τα πιο μακρινά αντικείμενα έχει ως αποτέλεσμα να μην επαρκεί μια και μόνη μέθοδος για τη μέτρησή τους, ως εκ τούτου υπάρχουν πολλοί τρόποι μέτρησης και ο κατάλληλος τρόπος εξαρτάται από την απόσταση του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει. Εδώ θα αναφέρουμε μόνο τη μέθοδο της τριγωνομετρικής παράλλαξης (trigonometric parallax), που είναι κατάλληλη για σχετικά κοντινά αντικείμενα και θα ορίσουμε και τη μονάδα μέτρησης. Γενικότερα για τη μέτρηση αποστάσεων βλ. Αλυσσανδράκης (2014) και Νίντος και Αλυσσανδράκης (2016).



Σχήμα 1.3: Μέτρηση της απόστασης με την τριγωνομετρική παράλλαξη.

Η μέθοδος της παράλλαξης στηρίζεται σε απλή τριγωνομετρία. Ένα κοντινό αντικείμενο προβάλλεται σε διαφορετική θέση πάνω σε υπόβαθρο μακρινών αντικειμένων, όταν παρατηρηθεί από δύο διαφορετικές θέσεις, που ορίζουν τα άκρα μιας γραμμής βάσης (baseline), μήκους $2b$, (σχήμα 1.3). Θυμίζουμε ότι αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο εντοπίζουμε τα κοντινά μας αντικείμενα χρησιμοποιώντας τα μάτια μας (για το λόγο αυτό έχουμε δύο, ενώ θα αρκούσε ένα για την όραση).

Η παράλλαξη, ϖ , ορίζεται ως η γωνία υπό την οποία βλέπει το κοντινό αντικείμενο το μισό της γραμμής βάσης, b :

$$\tan \varpi = \frac{b}{D} \quad (1.13)$$

Δεδομένου ότι παραλλακτική γωνία είναι πολύ μικρή, η απόσταση δίνεται από τη σχέση

$$D = \frac{b}{\varpi} \quad (1.14)$$

Όσο πιο μεγάλη είναι η γραμμή βάσης, τόσο μεγαλύτερη η παράλλαξη και τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια της μέτρησης. Για τη μέτρηση της απόστασης της Σελήνης αρκεί η διάμετρος της Γης. Για τα αστέρια χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε τη διάμετρο της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο, να παρατηρήσουμε δηλαδή το αστέρι σε δύο ακραίες θέσεις της Γης στην τροχιά της, σε χρονική απόσταση έξι μηνών.

Η μονάδα μέτρησης των αστρικών αποστάσεων είναι το *parsec*, (*pc*), που αντιστοιχεί στην απόσταση από όπου η μέση απόσταση Γης - ήλιου (αστρονομική μονάδα, Astronomical Unit, AU) φαίνεται με γωνία ενός δευτερόλεπτου της μοίρας ($1'' = \frac{\pi}{180} \frac{1}{3600}$ rad). Έτσι από τη σχέση (1.14) παίρνουμε τη σχέση μεταξύ του parsec και της αστρονομικής μονάδας:

$$D = 1\text{pc} = \frac{1\text{AU}}{1''} = \frac{1\text{AU}}{\frac{\pi}{180} \frac{1}{3600}\text{rad}} = 206\,265\text{AU}$$

Δεδομένου ότι,

$$1 \text{ AU} = 1.496 \cdot 10^{13} \text{ cm}$$

έχουμε τελικά:

$$1 \text{ pc} = 3.086 \cdot 10^{18} \text{ cm} \quad (1.15)$$

Δηλαδή 1 pc αντιστοιχεί σε 31 τρισεκατομμύρια χιλιόμετρα περίπου.

Πολύ συχνά στην αστρονομική εκλαίκευση χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης απόστασης το έτος φωτός, (ly), δηλαδή η απόσταση που διανύει το φως σε ένα έτος. Προφανώς,

$$1 \text{ ly} = (365.25 \times 24 \times 60 \times 60) \text{ sec} \times 299 \, 792 \text{ km/sec} = 0.946 \cdot 10^{18} \text{ cm}$$

Δηλαδή,

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly} \quad (1.16)$$

Μετρώντας την παράλλαξη σε δευτερόλεπτα τόξου ("), η απόσταση σε pc είναι:

$$D = \frac{1}{\varpi} \quad (1.17)$$

Οι αστρικές παραλλάξεις είναι πολύ μικρές και, κατά συνέπεια, μετρούνται δύσκολα. Για πρώτη φορά αυτό έγινε δυνατόν στα μέσα του 19ου αιώνα, πράγμα που αποτέλεσε την οριστική επιβεβαίωση του Κοπερνίκειου συστήματος. Το πιο κοντινό αστέρι είναι το α του αστερισμού του Κενταύρου ($\alpha \text{ Cen}$), που βρίσκεται σε απόσταση 1.25 pc ($\varpi = 0.797''$). Αξίζει τον κόπο να σημειώσουμε ότι μόνο περίπου 50 αστέρια βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 5 pc από τον ήλιο. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι πολύ καλύτερη από το διάστημα, π.χ. από τους αστρομετρικούς δορυφόρους Hipparcos και GAIA (βλ. εδάφιο Α'.8).

Για να δόσουμε μια εικόνα αποστάσεων αναφέρουμε ότι ο ήλιος απέχει ~ 8.5 kpc από το κέντρο του Γαλαξία, ενώ η ακτίνα του Γαλαξία είναι ~ 20 kpc. Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας είναι σε απόσταση 0.79 Mpc και το πιο κοντινό σμήνος γαλαξιών (στο αστερισμό της Παρθένου) ~ 15 Mpc. Τέτοιες αποστάσεις δεν μπορούν, προφανώς, να μετρηθούν με τη μέθοδο της τριγωνομετρικής παράλλαξης.

1.6 Λαμπρότητα, μέγεθος και χρώμα

Η ενέργεια, L_ν , που εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις ένα αστέρι με ακτίνα R , ανά μονάδα χρόνου και σε μία περιοχή συχνοτήτων μεταξύ ν και $\nu + d\nu$, είναι ίση με το γινόμενο της ροής της ακτινοβολίας, F_ν , επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του, $4\pi R^2$:

$$L_\nu = 4\pi R^2 F_\nu \quad (1.18)$$

Ας ονομάσουμε την ποσότητα L_ν απόλυτη λαμπρότητα (luminosity), αφού αντιστοιχεί στο σύνολο της ενέργειας που εκπέμπει το αστέρι ανά μονάδα χρόνου και εύρους συχνοτήτων. Από αυτή την ενέργεια, που σκορπίζεται σε όλες τις διευθύνσεις δηλαδή σε στερεά γωνία 4π , ένα τηλεσκόπιο συλλέγει τόση ενέργεια όση περιέχεται στη στερεά γωνία Ω , που ορίζει το άνοιγμά του, A , και η απόστασή του αστεριού από τη Γη, D , ($\Omega = A/D^2$). Συνεπώς το τηλεσκόπιο θα συλλέξει ενέργεια

$$E_\nu = L_\nu \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{L_\nu}{4\pi} \frac{A}{D^2} = A \frac{R^2}{D^2} F_\nu$$

ή,

$$E_\nu = A \ell_\nu \quad (1.19)$$

Η ποσότητα

$$\ell_\nu = \frac{R^2}{D^2} \mathcal{F}_\nu \quad (1.20)$$

ονομάζεται *φαινόμενη λαμπρότητα* και είναι η ενέργεια του αστεριού που φτάνει στη Γη ανά μονάδα συλλεκτικής επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα εύρους συχνοτήτων. Η σχέση της με την απόλυτη λαμπρότητα είναι, σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$L_\nu = 4\pi D^2 \ell_\nu \quad (1.21)$$

Για ιστορικούς λόγους η φαινόμενη λαμπρότητα των αστεριών δεν μετρείται με τις συνηθισμένες μονάδες της Φυσικής, αλλά με την κλίμακα των *αστρικών μεγεθών*. Ήδη από τον δεύτερο π.Χ. αιώνα ο Ίππαρχος είχε συντάξει τον πρώτο γνωστό κατάλογο με 1000 περίπου αστέρια (βλ. εδάφιο Α'.8), τα οποία κατέταξε, ανάλογα με τη λαμπρότητά τους, σε έξι μεγέθη: τα πιο λαμπρά χαρακτηρίστηκαν ως πρώτου μεγέθους και τα πιο αμυδρά έκτου.

Η κλίμακα αυτή έχει δύο ακόμα χαρακτηριστικά: κατά πρώτον είναι λογαριθμική, επειδή η απόκριση του ανθρώπινου ματιού στην ακτινοβολία είναι λογαριθμική. Έτσι μπορούμε να γράψουμε την παρακάτω σχέση ανάμεσα στο *φαινόμενο μέγεθος* (apparent magnitude), m , και τη φαινόμενη λαμπρότητα, ℓ :

$$m = m_o - a \log \ell$$

όπου m_o είναι μια σταθερά που προσδιορίζει την αρχή της κλίμακας, η οποία καθορίστηκε ώστε το μέγεθος του Βέγα να είναι 0.

Η ποσότητα a είναι μια άλλη σταθερά που προσδιορίζεται από το δεύτερο χαρακτηριστικό της κλίμακας, ότι τα αστέρια πρώτου μεγέθους είναι 100 φορές πιο λαμπρά από τα αστέρια έκτου μεγέθους. Αυτό οδηγεί στη σχέση:

$$m - 5 = m_o - a \log(100\ell)$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι $a = 2.5$ και τελικά:

$$m = m_o - 2.5 \log \ell \quad (1.22)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει απλά ότι όταν αυξάνει η λαμπρότητα μειώνεται το μέγεθος. Από τη σχέση (1.22) μπορεί κανείς εύκολα να υπολογίσει ότι διαφορά ενός μεγέθους αντιστοιχεί σε λόγο λαμπρότητας 2.512, διαφορά 0.1 μεγέθους αντιστοιχεί σε λόγο λαμπρότητας 1.0965 και διαφορά μεγέθους 0.01 αντιστοιχεί σε λόγο λαμπρότητας 1.000925.

Το πιο λαμπρό αντικείμενο στον ουρανό είναι φυσικά ο ήλιος, με φαινόμενο μέγεθος -26.7 . Ακολουθεί η πανσέληνος με $m = -12.6$ (500 000 φορές αμυδρότερη). Από τους πλανήτες πιο λαμπρή είναι η Αφροδίτη, με μέγεθος που φτάνει το -4.6 . Ο Δίας και ο Άρης φτάνουν μέχρι το -2.9 , ο Ερμής -1.9 , ο Κρόνος -0.4 . Από τα αστέρια το πιο λαμπρό είναι ο Σείριος (α Canis Majoris, CMa) με $m = -1.5$ και ακολουθεί ο Κάνωπος (α Carinae, Car) με -0.7 .

Γνωρίζοντας την απόσταση του αστεριού, D , μπορούμε να υπολογίσουμε την απόλυτη λαμπρότητα από τη φαινόμενη, ℓ_ν , με τη βοήθεια της σχέσης (1.21):

$$L_\nu = 4\pi D^2 \ell_\nu$$

Αν, επί πλέον, γνωρίζουμε την ακτίνα του αστεριού, R , μπορούμε να υπολογίσουμε από την απόλυτη λαμπρότητα τη ροή της ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.18):

$$\mathcal{F}_\nu = \frac{L_\nu}{4\pi R^2} = \frac{D^2 \ell_\nu}{R^2} \quad (1.23)$$

Όπως η φαινόμενη λαμπρότητα, έτσι και η απόλυτη λαμπρότητα εκφράζεται σε μεγέθη. Το απόλυτο μέγεθος (absolute magnitude), M , ενός αστεριού ορίζεται ως το μέγεθος που θα είχε το αστέρι αν βρισκόταν σε απόσταση 10 pc. Αν ℓ είναι η φαινόμενη λαμπρότητα του αστεριού και ℓ' η λαμπρότητα που θα είχε αν ήταν σε απόσταση 10 pc, έχουμε, προφανώς, από τη σχέση (1.22):

$$m - M = -2.5 \log \frac{\ell}{\ell'} \quad \text{και,}$$

$$\frac{\ell}{\ell'} = \frac{10^2}{D^2}$$

όπου η απόσταση, D , μετριέται σε pc. Από τα παραπάνω προκύπτει η σχέση:

$$m - M = 5 \log D - 5 \quad (1.24)$$

Η ποσότητα $m - M$ ονομάζεται *μέτρο απόστασης* (distance modulus), για προφανείς λόγους. Χρησιμοποιώντας την παράλλαξη αντί για την απόσταση παίρνουμε:

$$m - M = -5 \log \varpi - 5 \quad (1.25)$$

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το απόλυτο μέγεθος του ήλιου είναι μόλις 4.8, του Σείριου 1.4, του α Cen 4.4, του Κάνωπου -5.6 και του Βέγα 0.6. Τα πιο λαμπρά αστέρια έχουν απόλυτο μέγεθος κοντά στο -10 , ενώ τα πιο αμυδρά φτάνουν σε μέγεθος 22.

Πολύ χρήσιμες είναι και οι διαφορές των μεγεθών του ίδιου αστεριού σε διάφορες φασματικές περιοχές, $u - b$ και $b - v$, όπου u , b και v είναι το μέγεθος στο υπεριώδες, το μπλε και το ορατό μέρος του φάσματος. Οι διαφορές αυτές, όπως προκύπτει από την (1.24), είναι ανεξάρτητες της απόστασης του αστεριού. Από τη σχέση (1.22) έχουμε:

$$u - b = m_u - m_b = M_u - M_b = 2.5 \log \frac{\ell_b}{\ell_u} = 2.5 \log \frac{\mathcal{F}_b}{\mathcal{F}_u} \quad (1.26)$$

$$b - v = m_b - m_v = M_b - M_v = 2.5 \log \frac{\ell_v}{\ell_b} = 2.5 \log \frac{\mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_b} \quad (1.27)$$

Οι παραπάνω ποσότητες ονομάζονται *δείκτες χρώματος* (color index) ή, απλά, *χρώματα* και εκφράζουν το λόγο της ροής της ακτινοβολίας σε διάφορες φασματικές περιοχές, δίνοντας έτσι πληροφορίες για τη μορφή του αστρικού φάσματος.

1.7 Ασκήσεις

1. Αποδείξτε ότι η ειδική ένταση ενός πεπερασμένου στρώματος υλικού, με σταθερή συνάρτηση πηγής S_ν και οπτικό βάθος τ_ν δίνεται από τη σχέση:

$$I_\nu = S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (1.28)$$

Ποια μορφή παίρνει η παραπάνω σχέση όταν το οπτικό βάθος είναι πολύ μικρό και ποια όταν είναι πολύ μεγάλο;

2. Πόση ενέργεια ανά δευτερόλεπτο και ανά cm^2 δέχεται μια επιφάνεια στο εστιακό επίπεδο ενός τηλεσκοπίου διαμέτρου 50 cm και εστιακής απόστασης 20 m από τον ήλιο; (χρησιμοποιήστε τιμές από τον Πίνακα του παραρτήματος Γ').

3. Δεδομένου ότι το μηδέν της κλίμακας των απολύτων μεγεθών αντιστοιχεί σε ροή ενέργειας $2.52 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$, πόση ενέργεια δέχεται ανά δευτερόλεπτο ένα τηλεσκόπιο διαμέτρου 10 m από ένα αστέρι πρώτου μεγέθους και πόση από ένα αστέρι 30ου μεγέθους; Υποθέτοντας χοντρικά ότι το μέσο μήκος κύματος είναι 5000 \AA , σε ποια ροή φωτονίων αντιστοιχεί αυτή η ενέργεια;
4. Με πόση ταχύτητα (km/s) κινείται ένα αντικείμενο που διανύει 1 pc σε ένα εκατομμύριο χρόνια;
5. Υπολογίστε το μέτρο απόστασης για το κέντρο του Γαλαξία, για τον γαλαξία της Ανδρομέδας και για το σμήνος γαλαξιών του αστερισμού της Παρθένου. Τι φαινόμενο μέγεθος έχει ένα αστέρι σαν τον ήλιο που βρίσκεται στον γαλαξία της Ανδρομέδας; Θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε ένα τέτοιο αστέρι;
6. Σε ένα διπλό σύστημα αστεριών, το ένα έχει φαινόμενο μέγεθος 4 και το άλλο 6. Ποιο είναι το φαινόμενο μέγεθος του συστήματος;

1.8 Βιβλιογραφία

Αλυσσανδράκης, Κ. Ε.: 2014, *Εισαγωγή στην Αστροφυσική*, Αθήνα, Εκδόσεις Παπαζήση ISBN: 978-960-02-3058-1, κεφάλαια 1-5 και 12.2.

Νίντος, Α. και Αλυσσανδράκης, Κ. Ε.: 2015, *Γαλαξιακή και Εξωγαλαξιακή Αστροφυσική*, Αθήνα, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, κεφάλαια 1 και 6. ISBN: 978-960-603-346-9

Léna, P., Rouan, D., Lebrun, F., Mignard, F. & Pelat, D.: 2012, *Observational Astrophysics* (3rd edition), Springer, ISBN: 978-3-642-21814-9, κεφάλαια 1 και 3.

Karttunen, H., Krüger, P., Oja, H., Poutanen, M., and Donner, K.J.: 2007, *Fundamental Astronomy* (5th edition), Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-34143-7, κεφάλαια 1 και 4.