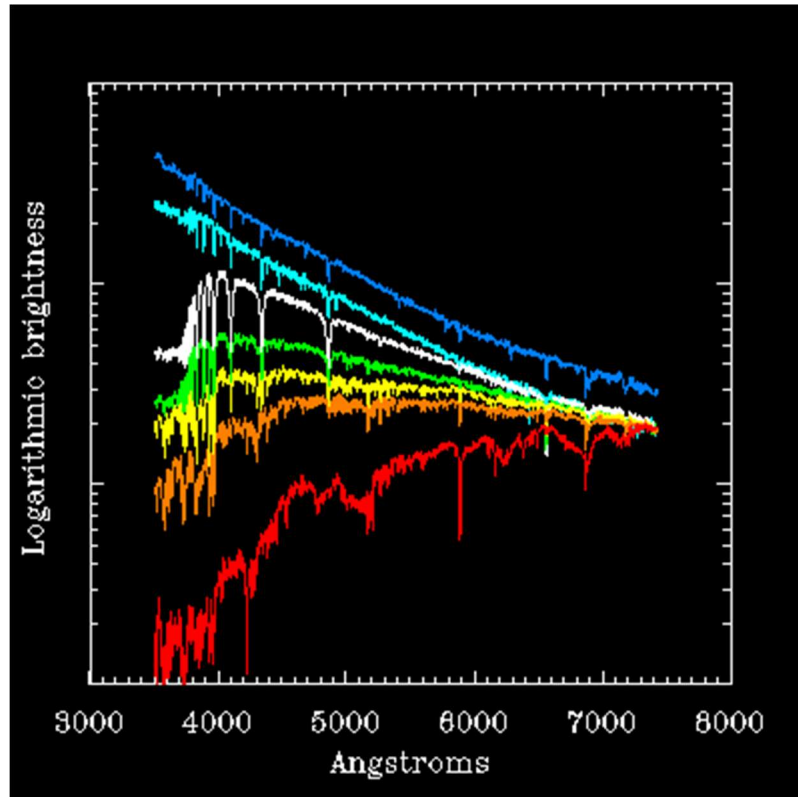


Εργαστήριο Φασματοσκοπίας

Φασματική ταξινόμηση αστέρων – εκτίμηση ενεργού
θερμοκρασίας



Δέσποινα Χατζηδημητρίου, Γεώργιος Βασιλόπουλος, Καλλιόπη
Δασύρα

Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ

α.ε. 2026-2027

Η εικόνα που εμφανίζεται στην πρώτη σελίδα:

<http://www.physics.sjsu.edu/tomley/ObjectSpectra/Rigel.html>

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στην αστρονομική φασματοσκοπία	4
1.1 Τι είναι η αστρονομική φασματοσκοπία	4
1.2 Η φυσική προέλευση των φασματικών γραμμών και των μοριακών ζωνών.....	5
1.3 Φυσικές πληροφορίες από τα φάσματα	6
1.3.1 Παράμετροι φασματικών γραμμών	6
1.3.2 Χημική σύσταση και αφθονίες	9
1.3.3 Θερμοκρασία και φυσικές συνθήκες.....	9
1.3.4 Ακτινικές ταχύτητες και ερυθρομετατόπιση	9
1.3.5 Πλάτη και μορφές γραμμών	10
1.3.6 Μαγνητικά πεδία και φαινόμενο Zeeman.....	11
1.4 Ο φασματογράφος.....	12
1.4.1 Ο φασματογράφος με πρίσμα.....	13
1.4.2 Το φράγμα περίθλασης.....	13
1.4.3 Αναγωγή δεδομένων και βαθμονόμηση	15
1.4.4 Είδη φασματογράφων	17
2. Φασματικοί τύποι αστέρων	19
2.1 Η ακολουθία των φασματικών τύπων.....	19
2.2 Η φυσική ερμηνεία της ακολουθίας φασματικών τύπων	21
2.3 Το σύστημα ταξινόμησης MK και οι τάξεις λαμπρότητας	22
3. Εργαστηριακή άσκηση	25
3.1 Σκοπός.....	25
3.2 Δεδομένα	25
3.3 Βήματα	25
3.4 Εργασία για το σπίτι.....	27
Βιβλιογραφία.....	28

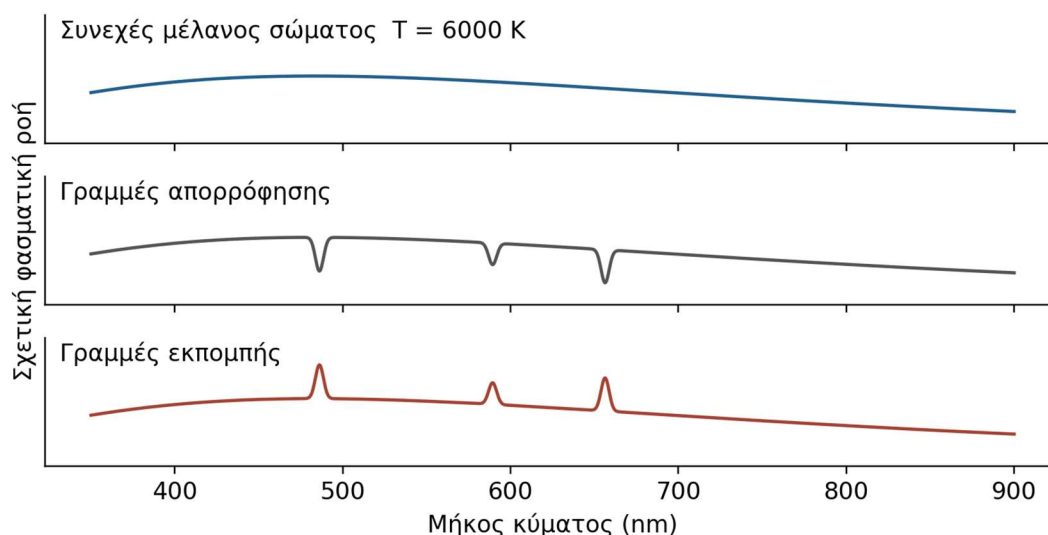
1. Εισαγωγή στην αστρονομική φασματοσκοπία

Η αστρονομική φασματοσκοπία συνδέει την κατανομή της παρατηρούμενης ακτινοβολίας ως προς το μήκος κύματος (ή τη συχνότητα, ή την ενέργεια του φωτονίου) με τη σύσταση, τις φυσικές συνθήκες και την κίνηση της αστρονομικής πηγής. Σκοπός αυτής της εισαγωγής είναι να εξηγήσει ποια πληροφορία περιέχει ένα φάσμα, πώς το καταγράφει ένας φασματογράφος και πώς οι ιδιότητες του οργάνου επηρεάζουν τις μετρήσεις. Η έμφαση δίνεται στην οπτική και εγγύς υπέρυθρη φασματοσκοπία, όπου χρησιμοποιούνται ευρέως όργανα με φράγματα περίθλασης.

1.1 Τι είναι η αστρονομική φασματοσκοπία

Φάσμα είναι η κατανομή της ακτινοβολίας μιας πηγής ως συνάρτηση του μήκους κύματος λ ή της συχνότητας ν . Στην αστρονομία παρουσιάζεται συχνά ως **φασματική πυκνότητα ροής** f_λ (ή f_ν), δηλαδή ενέργεια που φθάνει ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας και διαστήματος μήκους κύματος (ή συχνότητας). Η φασματοσκοπία μελετά τόσο τη συνολική μορφή αυτής της κατανομής όσο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της.

Ένα φάσμα μπορεί να περιλαμβάνει συνεχές υπόβαθρο, γραμμές εκπομπής, γραμμές απορρόφησης και μοριακές ζώνες (βλ. Σχήμα 1.1). Το συνεχές καλύπτει ευρύ διάστημα μηκών κύματος. Οι γραμμές αντιστοιχούν σε σχετικά στενές περιοχές όπου η ροή αυξάνεται ή μειώνεται ως προς το τοπικό συνεχές. Οι μοριακές ζώνες αποτελούνται από πολλές γειτονικές μεταβάσεις, οι οποίες συχνά δεν διακρίνονται χωριστά.



Σχήμα 1.1 . Σχηματικά φάσματα με συνεχές μέλανος σώματος για $T = 6000 \text{ K}$. Οι γραμμές προστίθενται ενδεικτικά· οι καμπύλες δεν είναι παρατηρήσεις ούτε μοντέλο αστρικής ατμόσφαιρας.

Η φωτομετρία (βλ. αντίστοιχη εργαστηριακή άσκηση) μέσω φίλτρων μετρά τη ροή ολοκληρωμένη σε σχετικά πλατιές φασματικές ζώνες (μέτρηση που εμπεριέχει την επίδραση της απόκρισης του φίλτρου και του συστήματος παρατήρησης ως συνάρτηση του μήκους κύματος). Η φασματοσκοπία μετρά τη ροή σε στενότερα διαστήματα μήκους κύματος, επιτρέποντας τη διάκριση φασματικών χαρακτηριστικών των οποίων οι επιμέρους συνεισφορές δεν μπορούν να διαχωριστούν στη φωτομετρική μέτρηση. Τα διαθέσιμα φωτόνια κατανέμονται, ωστόσο, σε περισσότερα στοιχεία φασματικής ανάλυσης, με αποτέλεσμα, για δεδομένο χρόνο έκθεσης, η λεπτομερέστερη φασματική πληροφορία να συνοδεύεται γενικά από χαμηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio, S/N) ανά στοιχείο φασματικής ανάλυσης.

1.2 Η φυσική προέλευση των φασματικών γραμμών και των μοριακών ζωνών

Τα άτομα, τα ιόντα και τα μόρια έχουν διακριτές ενεργειακές στάθμες (για τις δέσμιες καταστάσεις τους). Κατά την ακτινοβολιακή αποδιέγερση από μια ανώτερη στάθμη u σε μια κατώτερη στάθμη l εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά των ενεργειών των δύο σταθμών $E_u - E_l = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, όπου h η σταθερά του Planck και c η ταχύτητα του φωτός. Αντίστροφα, ένα φωτόνιο με την ίδια ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί και να προκαλέσει τη μετάβαση του σωματιδίου από τη στάθμη l στη στάθμη u . Οι μεταβάσεις μεταξύ σταθμών δεν γίνονται όμως μόνο με ακτινοβολία: σε ένα αέριο, διεγέρσεις και αποδιεγέρσεις μπορούν να συμβούν και με κρούσεις, χωρίς απορρόφηση ή εκπομπή φωτονίου. Στα μόρια υπάρχουν, επιπλέον των ηλεκτρονικών, δονητικές και περιστροφικές στάθμες, οι οποίες δημιουργούν πλούσια φασματική δομή. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά είδη μεταβάσεων, οι χαρακτηριστικές τους ενέργειες και οι αντίστοιχες φασματικές περιοχές, μαζί με παραδείγματα.

Μια θερμική πηγή με μεγάλο οπτικό βάθος, σε συνθήκες Τοπικής Θερμοδυναμικής Ισορροπίας (ΤΘΙ), εκπέμπει συνεχές φάσμα που προσεγγίζει εκείνο του μέλανος σώματος. Σε ένα οπτικά λεπτό αέριο, οι ακτινοβολιακές αποδιεγέρσεις ατόμων, ιόντων ή μορίων μπορούν να παράγουν γραμμές εκπομπής. Αν το αέριο παρεμβάλλεται μπροστά από μια πηγή συνεχούς φάσματος έντασης $I_{\nu,0}$, η ένταση που φτάνει στον παρατηρητή δίνεται από τη λύση της εξίσωσης μεταφοράς, $I_{\nu}(\tau_{\nu}) = I_{\nu,0}e^{-\tau_{\nu}} + S_{\nu}(1 - e^{-\tau_{\nu}})$, όπου τ_{ν} το οπτικό βάθος και S_{ν} η συνάρτηση πηγής του αερίου, η οποία θεωρείται σταθερή. Στις χαρακτηριστικές συχνότητες των μεταβάσεων, όπου το τ_{ν} αυξάνεται, η ένταση τείνει προς τη συνάρτηση πηγής. Αν $I_{\nu,0} > S_{\nu}$ το I_{ν} μειώνεται και εμφανίζεται γραμμή απορρόφησης, ενώ αν $I_{\nu,0} < S_{\nu}$ το I_{ν} αυξάνεται και εμφανίζεται γραμμή εκπομπής. Σε συνθήκες ΤΘΙ η συνάρτηση πηγής ισούται με τη συνάρτηση Planck, $S_{\nu} = B_{\nu}(T)$, οπότε γραμμή απορρόφησης προκύπτει όταν η θερμοκρασία του αερίου είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία λαμπρότητας της πηγής στο αντίστοιχο μήκος κύματος.

Η εμφάνιση μιας μετάβασης σε εκπομπή ή απορρόφηση καθορίζεται επομένως από τη σχέση της συνάρτησης πηγής του αερίου με την ένταση του υποβάθρου, $I_{\nu,0}$, δηλαδή από τις φυσικές συνθήκες του αερίου, την πηγή υποβάθρου και τη γεωμετρία της παρατήρησης.

Πίνακας 1.1 Παραδείγματα φασματικών γραμμών

Είδος μετάβασης	Ενέργεια (eV)	Φασματική περιοχή	Παράδειγμα
Υπέρλεπτη υφή	10^{-5}	Ραδιοφωνική	Γραμμή του ουδέτερου υδρογόνου στα 21 cm
Μοριακές περιστροφικές μεταβάσεις	10^{-4} – 10^{-2}	Χιλιοστομετρική και υπέρυθρη	Μετάβαση $J = 1 \rightarrow 0$ του μορίου CO στα 2,6 mm
Λεπτή υφή (σύζευξη σπιν–τροχιάς)	10^{-3} – 1	Υποχιλιοστομετρική και Υπέρυθρη	Γραμμή [C II] στα 158 μm
Μοριακές περιστροφικές–δονητικές μεταβάσεις	10^{-1} – 1	Υπέρυθρη	Γραμμές του H_2 κοντά στα 2 μm
Ηλεκτρονικές μεταβάσεις ατόμων, μορίων και ιόντων	10^{-1} – 10^4	Υπέρυθρη ως ακτίνες X	Σειρές Lyman και Balmer του υδρογόνου· γραμμές συντονισμού των C I, He I και K I· γραμμές ηλεκτρονικών μεταβάσεων στις στιβάδες K και L υψηλά ιονισμένων ιόντων (Fe XXV, Fe XVII, O VI)
Πυρηνικές μεταβάσεις	$> 10^4$	Ακτίνες X και γ	Γραμμή του ^{12}C στα 15,11 MeV
Εξαΰλωση	5×10^5	Ακτίνες γ	Γραμμή εξαΰλωσης ηλεκτρονίου–ποζιτρονίου στα 511 keV

1.3 Φυσικές πληροφορίες από τα φάσματα

1.3.1 Παράμετροι φασματικών γραμμών

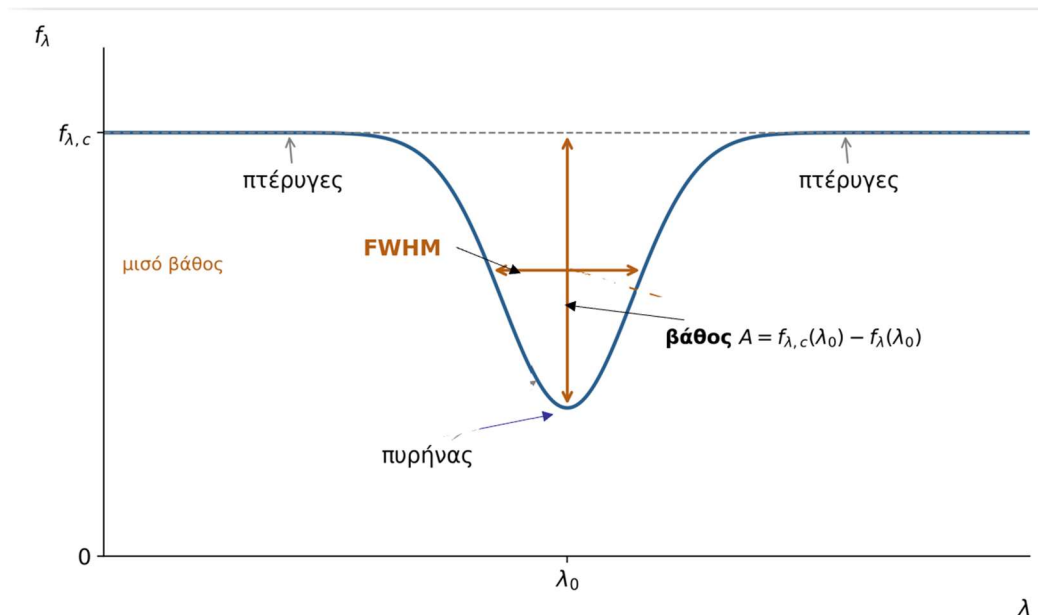
Μεγάλο μέρος της πληροφορίας που εξάγουμε από ένα φάσμα προέρχεται από μετρήσεις στις φασματικές γραμμές. Ένα απλό προφίλ γραμμής περιγράφεται συνήθως με λίγες παραμέτρους (βλ. Σχήμα 1.2). Η θέση της γραμμής είναι το μήκος κύματος του ελαχίστου ή του μεγίστου ή,

γενικότερα, του κέντρου βάρους του προφίλ, και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση της γραμμής και τη μέτρηση ακτινικών ταχυτήτων.

Το βάθος (ή το ύψος) είναι η απόκλιση από το τοπικό συνεχές στο κέντρο της γραμμής, $A = |f_\lambda(\lambda_0) - f_{\lambda,c}|$. Έχει τις ίδιες μονάδες με τη φασματική πυκνότητα ροής και δεν είναι κανονικοποιημένο ως προς το συνεχές. Όταν το συνεχές είναι μη μηδενικό, μπορούμε επιπλέον να ορίσουμε το σχετικό βάθος ή ύψος ως $A/f_{\lambda,c}(\lambda_0)$

Το πλάτος της γραμμής συνήθως περιγράφεται με το πλήρες πλάτος στο μισό του βάθους για γραμμή απορρόφησης και στο μισό του ύψους για γραμμή εκπομπής, γνωστό ως full width at half maximum (*FWHM*).

Στο προφίλ διακρίνουμε τον πυρήνα, γύρω από το κέντρο της γραμμής, και τις πτέρυγες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη διαπλάτυνση πίεσης (Ενότητα 1.3.5).



Σχήμα 1.2 Παράμετροι γραμμής απορρόφησης: θέση λ_0 , μη κανονικοποιημένο βάθος $A = |f_\lambda(\lambda_0) - f_{\lambda,c}|$, *FWHM*, πυρήνας και πτέρυγες. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το τοπικό συνεχές. Το βάθος έχει μονάδες φασματικής πυκνότητας ροής.

Η ολοκληρωμένη ροή μιας γραμμής εκπομπής είναι το ολοκλήρωμα της περίσσειας της φασματικής πυκνότητας ροής πάνω από το τοπικό συνεχές:

$$f_{\text{em}} = \int_{\text{line}} [f_\lambda(\lambda) - f_{\lambda,c}(\lambda)] d\lambda.$$

Για μια γραμμή απορρόφησης ορίζουμε θετικά το αντίστοιχο έλλειμμα ροής:

$$f_{\text{abs}} = \int_{\text{line}} [f_{\lambda,c}(\lambda) - f_\lambda(\lambda)] d\lambda.$$

Τα όρια ολοκλήρωσης πρέπει να περιλαμβάνουν ολόκληρη τη γραμμή. Οι ποσότητες αυτές μετρούν την ισχύ της γραμμής στο παρατηρούμενο φάσμα και έχουν μονάδες ροής, δηλαδή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας.

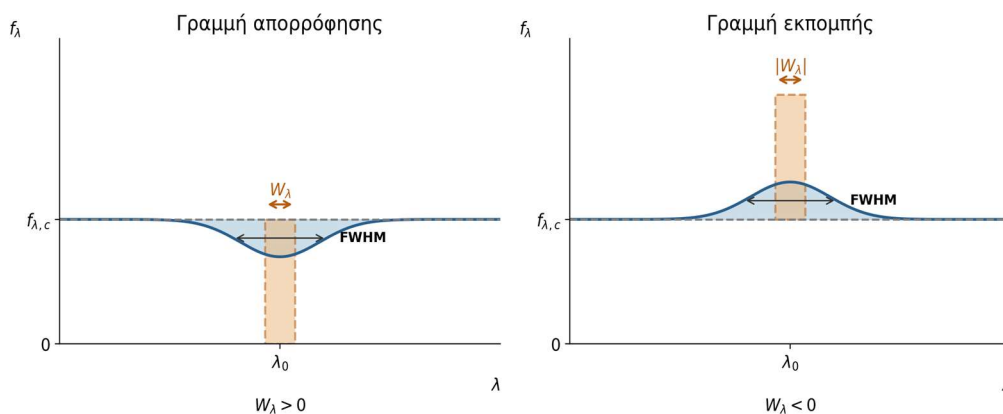
Για γκαουσιανό προφίλ μετά την αφαίρεση του συνεχούς, με ύψος ή βάθος A και τυπική απόκλιση σ_λ , η ολοκληρωμένη περίσσεια ή το ολοκληρωμένο έλλειμμα ροής είναι

$$f = A\sqrt{2\pi}\sigma_\lambda = A\sqrt{\pi/(4\ln 2)} FWHM \simeq 1,064 A FWHM.$$

Επομένως, το γινόμενο ύψος/βάθος $\times FWHM$ δίνει μια απλή προσέγγιση της ροής, f , με υποεκτίμηση περίπου 6% για ακριβώς γκαουσιανή γραμμή.

Αντί αυτού, συχνά, η ισχύς μιας γραμμής εκφράζεται μέσω του λεγόμενου ισοδύναμου πλάτους (equivalent width, EW). Αυτό είναι το πλάτος μιας υποθετικής ορθογώνιας γραμμής, με βάθος ή ύψος ίσο με τη φασματική πυκνότητα ροής του συνεχούς, η οποία θα είχε την ίδια ολοκληρωμένη ροή με την πραγματική γραμμή. Επομένως, για περίπου σταθερό συνεχές στην περιοχή της γραμμής, το γινόμενο του EW επί τη φασματική πυκνότητα ροής του συνεχούς δίνει το έλλειμμα ροής μιας γραμμής απορρόφησης ή, χρησιμοποιώντας την απόλυτη τιμή του EW , την περίσσεια ροής μιας γραμμής εκπομπής. Το EW αποτελεί έτσι ένα ισοδύναμο πλάτος που συνδέεται με το συνολικό εμβαδόν της γραμμής, ενώ το $FWHM$ περιγράφει το πλάτος του πραγματικού προφίλ στο μισό του βάθους ή του ύψους του.

Το ισοδύναμο πλάτος ορίζεται ως $EW = \int_{\gamma_{\rho\alpha\mu}} \left[1 - \frac{f_\lambda}{f_{\lambda,c}} \right] d\lambda$, όπου $f_{\lambda,c}$ είναι το τοπικό συνεχές (βλ. Σχήμα 1.3).¹ Το EW έχει μονάδες μήκους. Η αβεβαιότητα στη μέτρηση του EW εξαρτάται από τον θόρυβο, την τοποθέτηση του συνεχούς και την ανάμειξη με γειτονικές γραμμές.



Σχήμα 1.3 Διάκριση EW και $FWHM$, για περίπου σταθερό συνεχές. Σε κάθε πλαίσιο το πορτοκαλί ορθογώνιο έχει ύψος ίσο με το συνεχές και εμβαδόν ίσο με τη γαλάζια περιοχή μεταξύ γραμμής και συνεχούς. Το πλάτος του είναι EW για απορρόφηση και $|EW|$ για εκπομπή. Το $FWHM$ μετράται στο μισό του βάθους ή ύψους και δεν ισούται γενικά με το EW .

¹ Με αυτό τον ορισμό, το ισοδύναμο πλάτος για μία γραμμή εκπομπής είναι αρνητικό.

Οι παράμετροι αυτές επαρκούν για σχετικά απλά προφίλ. Σύνθετα ή αναμειγμένα προφίλ απαιτούν προσαρμογή μοντέλων.

1.3.2 Χημική σύσταση και αφθονίες

Κάθε χημικό είδος διαθέτει χαρακτηριστικό σύνολο μεταβάσεων. Συγκρίνοντας τις θέσεις των παρατηρούμενων γραμμών με εργαστηριακά μήκη κύματος, ταυτοποιούμε άτομα, ιόντα και μόρια. Μια ασφαλής ταυτοποίηση βασίζεται συνήθως σε περισσότερες από μία γραμμές και λαμβάνει υπόψη πιθανές προσμίξεις, μετατοπίσεις και την παρουσία τελλουρικών γραμμών, δηλαδή γραμμών που οφείλονται σε απορρόφηση από συστατικά της ατμόσφαιρας της Γης.

Η ταυτοποίηση ενός στοιχείου δεν αρκεί για τον προσδιορισμό της αφθονίας του. Η ισχύς μιας γραμμής (όπως μετράται συνήθως από το ισοδύναμο πλάτος, βλ. 1.3.1) εξαρτάται επίσης από την πιθανότητα της μετάβασης, τον πληθυσμό της κατώτερης ή ανώτερης στάθμης, τη θερμοκρασία, τον ιονισμό, το οπτικό βάθος και τους μηχανισμούς διαπλάτυνσης. Οι μηχανισμοί διαπλάτυνσης καθορίζουν την καμπύλη αύξησης στις κορεσμένες γραμμές. Για τον λόγο αυτό, ισχυρότερη γραμμή δεν σημαίνει γενικά μεγαλύτερη αφθονία. Οι αφθονίες προκύπτουν από σύγκριση με κατάλληλα μοντέλα και ατομικά ή μοριακά δεδομένα.

1.3.3 Θερμοκρασία και φυσικές συνθήκες

Το σχήμα του συνεχούς παρέχει πληροφορία για τη θερμοκρασία όταν η εκπομπή είναι κατά προσέγγιση θερμική. Ωστόσο, ένα αστρικό φάσμα δεν είναι ακριβές φάσμα μέλανος σώματος. Η μεσοαστρική ερύθρωση, η εξασθένηση από τη γήινη ατμόσφαιρα και η απόκριση του οργάνου μεταβάλλουν επίσης το παρατηρούμενο σχήμα του συνεχούς, οπότε πρέπει να γίνουν αντιστοιχες διορθώσεις. Για αξιόπιστη εκτίμηση της θερμοκρασίας συνδυάζονται το συνεχές, οι γραμμές και τα μοντέλα ατμοσφαιρών.

Η σχετική ισχύς γραμμών διαφορετικής διέγερσης ή διαφορετικών σταδίων ιονισμού επιτρέπει την εκτίμηση της θερμοκρασίας και των συνθηκών ιονισμού. Για παράδειγμα, οι γραμμές Balmer είναι ισχυρότερες στους αστέρες τύπου A. Αυτό οφείλεται στον πληθυσμό της στάθμης $n = 2$ του ουδέτερου υδρογόνου και όχι σε μεγαλύτερη αφθονία υδρογόνου (βλ. Ενότητα 2).

Σε νεφελώματα, λόγοι κατάλληλων γραμμών χρησιμοποιούνται ως διαγνωστικά της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ηλεκτρονίων.

1.3.4 Ακτινικές ταχύτητες και ερυθρομετατόπιση

Η κίνηση της πηγής κατά μήκος της γραμμής παρατήρησης (line of sight) μετατοπίζει τις φασματικές γραμμές λόγω του φαινομένου Doppler. Για ταχύτητες μικρές σε σχέση με την

ταχύτητα του φωτός: $\frac{v_r}{c} \simeq \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$, όπου λ_0 είναι το μήκος κύματος εργαστηρίου και λ_{obs} το παρατηρούμενο μήκος κύματος. Θετική ακτινική ταχύτητα, v_r , δηλώνει απομάκρυνση από τον παρατηρητή και μετατόπιση προς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Για ακριβείς μετρήσεις χρειάζεται διόρθωση για την κίνηση του παρατηρητή (περιστροφή της Γης και τροχιακή κίνηση γύρω από τον Ήλιο).

Για μια εξωγαλαξιακή πηγή ορίζουμε την ερυθρομετατόπιση $z = (\lambda_{obs} - \lambda_0)/\lambda_0$. Η κοσμολογική ερυθρομετατόπιση δεν οφείλεται στην κίνηση της πηγής μέσα στον χώρο, αλλά στη διαστολή του Σύμπαντος κατά τη διάδοση του φωτός.

Μετατόπιση των γραμμών προκαλεί επίσης το βαρυτικό πεδίο της πηγής. Ένα φωτόνιο που εκπέμπεται από την επιφάνεια σώματος μάζας M και ακτίνας R χάνει ενέργεια καθώς απομακρύνεται, με αποτέλεσμα βαρυτική ερυθρομετατόπιση

$z_g = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1/2} - 1 \approx \frac{GM}{Rc^2}$, όπου η προσέγγιση ισχύει για $\frac{GM}{Rc^2} \ll 1$. Για τον Ήλιο η μετατόπιση αντιστοιχεί σε ταχύτητα $cz_g \approx 0,6 \text{ km s}^{-1}$ και είναι σημαντική μόνο σε μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Σε συμπαγή αντικείμενα όπως οι λευκοί νάνοι φτάνει τις μερικές δεκάδες km s^{-1} και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό ακτινικών ταχυτήτων. Αντίστροφα, η μέτρησή της παρέχει πληροφορία για τον λόγο M/R .

Γενικά, οι ακτινικές ταχύτητες παρέχουν πληροφορία για την κινηματική και τη δυναμική των πηγών. Χρονικές μεταβολές των ακτινικών ταχυτήτων αποκαλύπτουν τροχιακή κίνηση σε διπλά συστήματα. Η κατανομή των ακτινικών ταχυτήτων των μελών ενός αστρικού σμήνους δίνει τη διασπορά ταχυτήτων του. Χωρικές μεταβολές σε εκτεταμένες πηγές επιτρέπουν τη μελέτη περιστροφής, εκρών και πεδίων ταχυτήτων.

1.3.5 Πλάτη και μορφές γραμμών

Μια φασματική γραμμή έχει πεπερασμένο πλάτος ακόμη και απουσία εξωτερικών επιδράσεων, λόγω του πεπερασμένου χρόνου ζωής των σταθμών (φυσική διαπλάτυνση γραμμής).

Οι θερμικές κινήσεις και η τυρβώδης κίνηση προκαλούν διαπλάτυνση Doppler.

Οι συγκρούσεις και οι αλληλεπιδράσεις με γειτονικά σωματίδια προκαλούν διαπλάτυνση πίεσης, η οποία αυξάνεται με την πυκνότητα του αερίου. Μια σημαντική μορφή της είναι η διαπλάτυνση Stark, κατά την οποία τα ηλεκτρικά πεδία των γειτονικών ιόντων και ηλεκτρονίων μετατοπίζουν τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου, και η οποία είναι ιδιαίτερα ισχυρή στις γραμμές του υδρογόνου.

Σε ένα περιστρεφόμενο άστρο, η ακτινοβολία από το άκρο του δίσκου (δηλ. της προβολής του άστρου στο επίπεδο του ουρανού) που πλησιάζει και από εκείνο που απομακρύνεται έχει αντίθετες μετατοπίσεις Doppler. Η γραμμή διαπλατύνεται ανάλογα με την προβολή $v \sin i$, όπου

v η ισημερινή ταχύτητα περιστροφής και i η κλίση του άξονα περιστροφής ως προς τη γραμμή παρατήρησης.

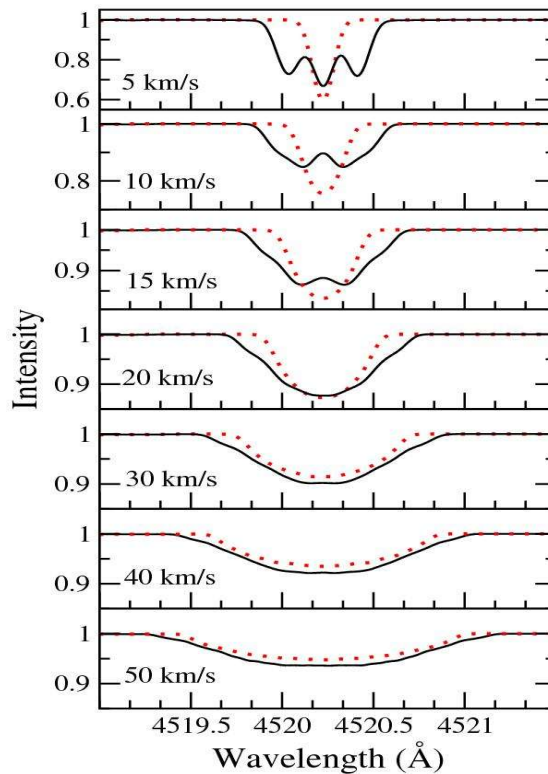
Διπλές κορυφές ή ασυμμετρίες μπορούν να αποκαλύψουν σύνθετη γεωμετρία και κινηματική. Ένα προφίλ P Cygni, με εκπομπή και απορρόφηση μετατοπισμένη προς το μπλε, αποτελεί χαρακτηριστική ένδειξη εκροής. Το αντίστροφο προφίλ P Cygni, με απορρόφηση μετατοπισμένη προς το ερυθρό, υποδηλώνει πρόσπτωση ύλης.

Ο φασματογράφος διαπλάτνει επίσης τις γραμμές, λόγω της πεπερασμένης διακριτικής του ικανότητας (βλ. 1.4.2). Το καταγεγραμμένο προφίλ είναι η συνέλιξη του εγγενούς προφίλ της γραμμής με τη συνάρτηση απόκρισης του οργάνου σε μονοχρωματική ακτινοβολία (line spread function). Για τον προσδιορισμό του εγγενούς πλάτους απαιτείται επομένως διόρθωση για την απόκριση του οργάνου, η οποία γίνεται αβέβαιη όταν η φυσική διαπλάτυνση είναι πολύ μικρότερη από τη διαπλάτυνση του οργάνου.

1.3.6 Μαγνητικά πεδία και φαινόμενο Zeeman

Ένα μαγνητικό πεδίο διαχωρίζει τις ενεργειακές στάθμες των ατόμων, με αποτέλεσμα κάθε φασματική γραμμή να χωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες (φαινόμενο Zeeman). Η απόσταση των συνιστωσών αυξάνεται με την ένταση του πεδίου, ενώ οι ίδιες είναι πολωμένες. Όταν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από το πλάτος της γραμμής, οι συνιστώσες δεν διακρίνονται και η διάσπαση εμφανίζεται ως πρόσθετη διαπλάτυνση (βλ. Σχήμα 1.4).

Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται επίσης ότι, όταν οι συνιστώσες δεν διακρίνονται, η γραμμή παρουσία μαγνητικού πεδίου είναι βαθύτερη και έχει μεγαλύτερο ισοδύναμο πλάτος από τη γραμμή απουσία πεδίου. Η διάσπαση Zeeman κατανέμει την απορρόφηση σε ευρύτερο διάστημα μηκών κύματος και μειώνει τον κορεσμό της γραμμής (μαγνητική ενίσχυση). Η μέτρηση του διαχωρισμού ή της διαπλάτυνσης, καθώς και της πόλωσης των γραμμών (φασματοπολωσιμετρία), δίνει επομένως πληροφορία για το μαγνητικό πεδίο.

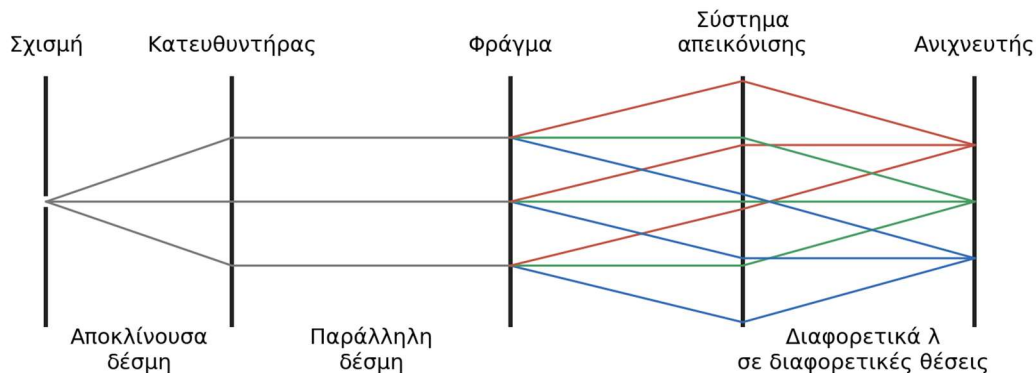


Σχήμα 1.4 Συνθετικά προφίλ της γραμμής Fe II 4520 Å χωρίς μαγνητικό πεδίο (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) και με πεδίο 15 kG (μαύρη συνεχής καμπύλη), για διαφορετικές τιμές της προβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής $v \sin i$. Πηγή: Bailey (2014), A&A, 568, A38.

1.4 Ο φασματογράφος

Ένας φασματογράφος διασποράς μετατρέπει τις διαφορές μήκους κύματος σε διαφορές θέσης πάνω στον ανιχνευτή. Το τηλεσκόπιο σχηματίζει την εικόνα της πηγής στην είσοδο του οργάνου. Τα βασικά στοιχεία είναι η σχισμή, ο κατευθυντήρας, το στοιχείο διασποράς, το σύστημα απεικόνισης και ο ανιχνευτής (Σχήμα 1.5).

Η **σχισμή** βρίσκεται στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου και επιλέγει το τμήμα της εικόνας που εισέρχεται στο όργανο. Το εύρος της επηρεάζει τη φασματική διακριτική ικανότητα, ενώ το μήκος της καθορίζει την περιοχή του ουρανού που καταγράφεται. Σε σημειακή πηγή, οι γειτονικές περιοχές της σχισμής χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του υποβάθρου του ουρανού. Μια στενή σχισμή δίνει καλύτερη διακριτική ικανότητα, αλλά αποκόπτει μέρος του φωτός όταν η εικόνα του άστρου, λόγω της ατμοσφαιρικής τύρβης (seeing), η οποία προκαλεί μεταβολές στη θέση και διαπλάτυνση του ειδώλου της πηγής, είναι πλατύτερη από αυτήν. Η επιλογή του εύρους είναι επομένως συμβιβασμός μεταξύ διακριτικής ικανότητας και λόγου σήματος προς θόρυβο.



Σχήμα 1.5 Απλουστευμένο οπτικό διάγραμμα με φράγμα διέλευσης. Οι φακοί παριστάνονται με κατακόρυφες γραμμές. Για κάθε μήκος κύματος, το σύστημα απεικόνισης εστιάζει την παράλληλη δέσμη σε διαφορετική θέση. Το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα.

Ο **κατευθυντήρας** (collimator) μετατρέπει την αποκλίνουσα δέσμη από τη σχισμή σε παράλληλη δέσμη, η οποία προσπίπτει στο στοιχείο διασποράς. Μετά τη διασπορά, το **σύστημα απεικόνισης** (camera) εστιάζει κάθε μήκος κύματος σε διαφορετική θέση του ανιχνευτή. Έτσι σχηματίζεται ένα είδωλο της σχισμής για κάθε μήκος κύματος. Ο **ανιχνευτής** είναι συνήθως CCD στο οπτικό, στο υπεριώδες και στο κοντινό υπέρυθρο. Χαρακτηρίζεται από την απόδοσή του ως συνάρτηση του μήκους κύματος, τον θόρυβο ανάγνωσης, το σκοτεινό ρεύμα και τον κορεσμό. **Λυχνίες βαθμονόμησης** παρέχουν φάσματα αναφοράς με γνωστά μήκη κύματος.

1.4.1 Ο φασματογράφος με πρίσμα

Στον φασματογράφο με πρίσμα, το στοιχείο διασποράς είναι ένα διαφανές πρίσμα. Επειδή ο δείκτης διάθλασης του υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος, τα διαφορετικά μήκη κύματος εκτρέπονται κατά διαφορετικές γωνίες και σχηματίζουν φάσμα στον ανιχνευτή. Στην ορατή περιοχή, για συνήθη οπτικά υλικά, το μπλε φως εκτρέπεται περισσότερο από το κόκκινο. Η διασπορά δεν είναι σταθερή ως προς το μήκος κύματος. Σε αντίθεση με το φράγμα, το πρίσμα δεν δημιουργεί διαδοχικές τάξεις περίθλασης.

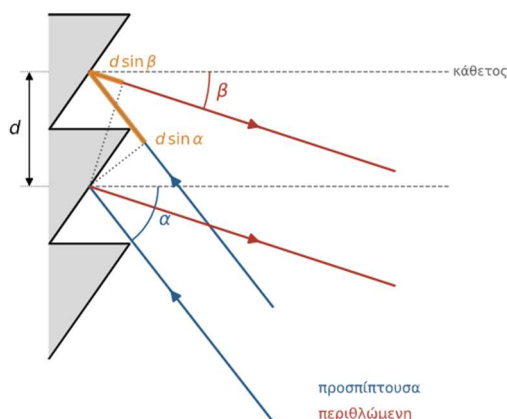
1.4.2 Το φράγμα περίθλασης

Ως στοιχείο διασποράς χρησιμοποιείται συνήθως φράγμα περίθλασης. Αυτό είναι μια επιφάνεια με πολλές παράλληλες, ισαπέχουσες αυλακώσεις. Στα φράγματα ανάκλασης οι αυλακώσεις βρίσκονται σε ανακλαστική επιφάνεια (βλ. Σχήμα 1.6), ενώ στα φράγματα διέλευσης το φως περνά μέσα από το φράγμα (όπως το παράδειγμα του Σχήματος 1.5). Κάθε αυλακώση, επειδή έχει πλάτος συγκρίσιμο με το μήκος κύματος, περιθλά το φως σε ένα εύρος γωνιών. Η συμβολή των κυμάτων από όλες τις αυλακώσεις δίνει μέγιστα μόνο σε διευθύνσεις όπου η διαφορά δρόμου μεταξύ διαδοχικών αυλακώσεων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος: $m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$, όπου d η απόσταση διαδοχικών αυλακώσεων, m

η τάξη περίθλασης, α η γωνία πρόσπτωσης και β η γωνία περίθλασης ως προς την κάθετο στο φράγμα. Για δεδομένη α , κάθε μήκος κύματος περιθλάται σε διαφορετική γωνία β . Η γωνιακή διασπορά είναι $d\beta/d\lambda = m/(d \cos \beta)$ και αυξάνεται σε μεγαλύτερη τάξη ή με πυκνότερες αυλακώσεις (οπότε μειώνεται το d).

Επειδή η διεύθυνση περίθλασης εξαρτάται από το γινόμενο $m\lambda$, διαφορετικές τάξεις επικαλύπτονται. Για παράδειγμα, τα 800 nm στην πρώτη τάξη συμπίπτουν με τα 400 nm στη δεύτερη. Οι ανεπιθύμητες τάξεις αποκόπτονται με κατάλληλα φίλτρα.

Σε φράγματα με κεκλιμένες αυλακώσεις (blaze), η κατοπτρική ανάκλαση από την επιφάνεια κάθε αυλάκωσης κατευθύνεται προς μια επιλεγμένη τάξη, έτσι ώστε εκεί να συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος του φωτός (Σχήμα 1.6).

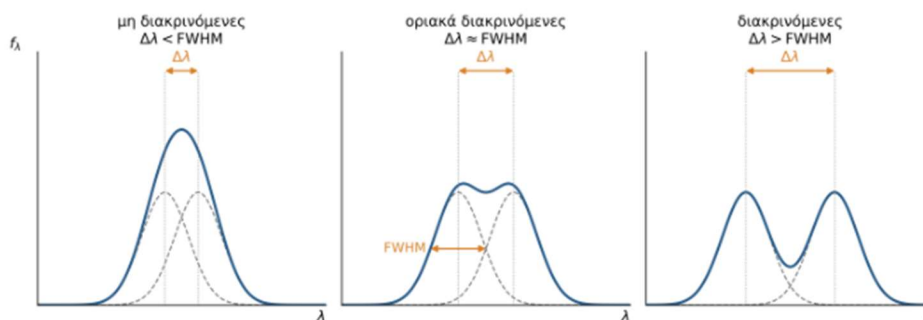


Σχήμα 1.6 Περίθλαση σε φράγμα ανάκλασης με κεκλιμένες αυλακώσεις. Οι ακτίνες που ανακλώνται σε αντίστοιχα σημεία δύο γειτονικών αυλακώσεων, σε απόσταση d , διαφέρουν κατά $d \sin \alpha + d \sin \beta$ σε οπτικό δρόμο. Ενισχυτική συμβολή συμβαίνει όταν η διαφορά αυτή είναι ίση με $m\lambda$. Οι γωνίες α και β μετρώνται ως προς την κάθετο στο επίπεδο του φράγματος και είναι θετικές όταν βρίσκονται στην ίδια πλευρά της. Στο σχήμα η περιθλώμενη δέσμη συμπίπτει με την κατοπτρική ανάκλαση από την επιφάνεια κάθε αυλάκωσης (συνθήκη blaze).

Ως στοιχείο διασποράς χρησιμοποιείται επίσης το «*grism*», που είναι συνδυασμός πρίσματος και φράγματος διέλευσης.

Η ικανότητα του φασματογράφου να διαχωρίζει γειτονικά μήκη κύματος περιγράφεται από τη φασματική διακριτική ικανότητα $R = \lambda/\Delta\lambda$, όπου $\Delta\lambda$ το μικρότερο διάστημα μήκους κύματος που διακρίνεται (στοιχείο φασματικής ανάλυσης, Σχήμα 1.7). Για ένα ιδανικό φράγμα το θεωρητικό όριο είναι $R = mN$, όπου N ο αριθμός των φωτιζόμενων αυλακώσεων. Στην πράξη η διακριτική ικανότητα καθορίζεται συνήθως από το εύρος της σχισμής, δηλαδή από το πλάτος του ειδώλου της στον ανιχνευτή, και εκτιμάται από το FWHM εγγενώς στενών γραμμών μιας λυχνίας βαθμονόμησης. Η αντίστοιχη κλίμακα ταχυτήτων είναι $\Delta\nu \approx c/R$. Για παράδειγμα, $R \approx 1000$, τυπική τιμή για φασματική ταξινόμηση, αντιστοιχεί σε $\Delta\nu \approx 300 \text{ km s}^{-1}$. Η $\Delta\nu$ δεν είναι η αβεβαιότητα μιας ακτινικής ταχύτητας, η οποία με καλό σήμα μπορεί να μετρηθεί με

πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Για να μη χάνεται πληροφορία, κάθε στοιχείο φασματικής ανάλυσης πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον δύο έως τρία pixels του ανιχνευτή. Μεγαλύτερη διασπορά βελτιώνει τη διακριτική ικανότητα, αλλά με δεδομένο ανιχνευτή μειώνει το φασματικό εύρος που καταγράφεται.



Σχήμα 1.7 Διακριτική ικανότητα. Δύο φασματικές γραμμές με το ίδιο προφίλ οργάνου (διακεκομμένες καμπύλες) και το καταγεγραμμένο άθροισμά τους (συνεχής καμπύλη), για τρεις αποστάσεις $\Delta\lambda$ μεταξύ των κέντρων τους. Όταν η απόσταση είναι περίπου ίση με το FWHM του προφίλ, οι δύο γραμμές μόλις διακρίνονται (μεσαίο πλαίσιο). Αυτή η απόσταση ορίζει το στοιχείο φασματικής ανάλυσης στη σχέση $R = \lambda/\Delta\lambda$. Σχήμα με βοήθεια Claude.

1.4.3 Αναγωγή δεδομένων και βαθμονόμηση

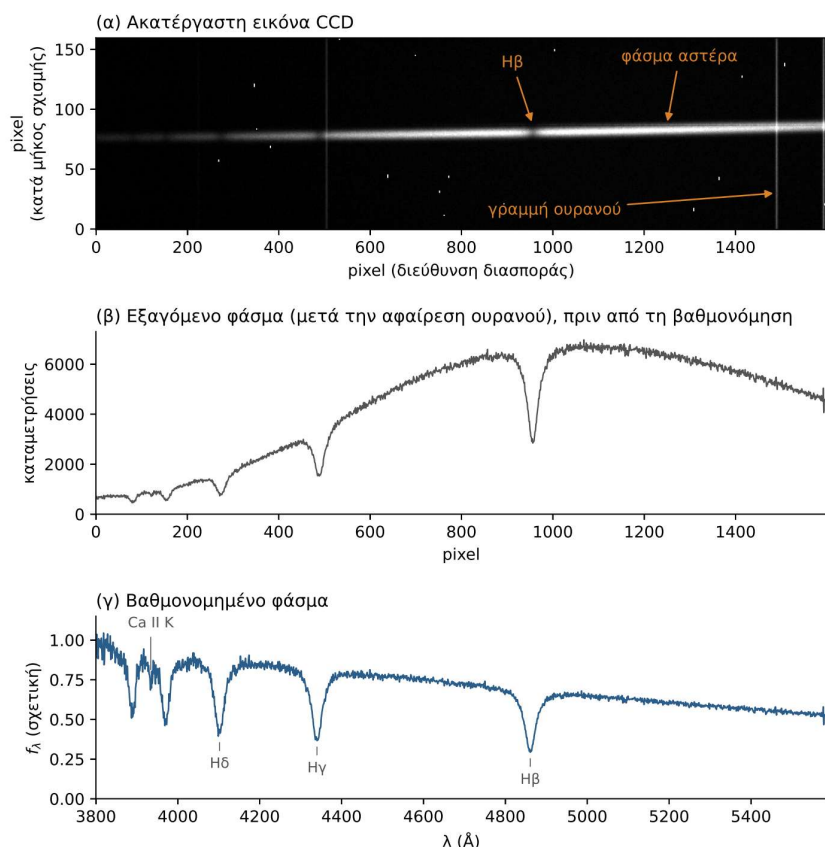
Η εικόνα που καταγράφει ο ανιχνευτής δεν είναι ακόμη φάσμα. Περιέχει τη συνεισφορά του ίδιου του ανιχνευτή, το φως του ουρανού και τη μεταβλητή απόκριση του οργάνου, ενώ οι θέσεις των pixels δεν αντιστοιχούν ακόμη σε μήκη κύματος.

Η **αναγωγή δεδομένων** (data reduction) μετατρέπει την ακατέργαστη εικόνα σε μονοδιάστατο φάσμα f_λ ως συνάρτηση του λ . Για φασματογράφο μακράς σχισμής με CCD, τα βασικά βήματα είναι (βλ. Σχήμα 1.8):

1. **Διόρθωση ανιχνευτή.** Αφαιρείται το bias, δηλαδή το σταθερό ηλεκτρονικό επίπεδο, που μετράται από εκθέσεις μηδενικού χρόνου. Όπου χρειάζεται, αφαιρείται και το σκοτεινό ρεύμα (dark).
2. **Flat field.** Η εικόνα διαιρείται με κανονικοποιημένη έκθεση ομοιόμορφης πηγής φωτός. Έτσι διορθώνονται οι διαφορές ευαισθησίας μεταξύ pixels και οι ανομοιομορφίες της σχισμής. Αφαιρούνται επίσης τα ίχνη κοσμικών ακτίνων.
3. **Εξαγωγή του φάσματος.** Εντοπίζεται η θέση του φάσματος της πηγής κατά μήκος της σχισμής. Το υπόβαθρο του ουρανού εκτιμάται από τις γειτονικές περιοχές και αφαιρείται, και η ροή αθροίζεται κάθετα στη διεύθυνση διασποράς.

4. **Βαθμονόμηση μήκους κύματος.** Γραμμές λυχνίας αναφοράς (π.χ. He–Ne–Ar) με γνωστά μήκη κύματος ταυτοποιούνται στον ανιχνευτή. Μια πολυωνυμική σχέση θέσης–μήκους κύματος (λύση διασποράς) εφαρμόζεται στο φάσμα. Τα υπόλοιπα της προσαρμογής δείχνουν την ακρίβεια της βαθμονόμησης.
5. **Βαθμονόμηση ροής.** Η παρατήρηση ενός πρότυπου αστέρα με γνωστή κατανομή ροής δίνει τη συνάρτηση ευαισθησίας του συστήματος. Αυτή, μαζί με τη διόρθωση για την ατμοσφαιρική εξασθένηση ως συνάρτηση της αέριας μάζας, μετατρέπει τα καταμετρούμενα φωτόνια σε f_λ . Χωρίς αυτό το βήμα το σχήμα του συνεχούς δεν αντιπροσωπεύει την πηγή (Ενότητα 1.3.3).
6. **Τελικές διορθώσεις.** Ανάλογα με τον σκοπό: διόρθωση τελλουρικών γραμμών, διόρθωση ακτινικής ταχύτητας για την κίνηση του παρατηρητή (Ενότητα 1.3.4) και κανονικοποίηση στο συνεχές, όταν μας ενδιαφέρει η σχετική ισχύς των γραμμών, όπως στη φασματική ταξινόμηση.

Η ποιότητα του τελικού φάσματος εκφράζεται με τον λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N), που πρέπει να δηλώνεται ανά pixel ή ανά στοιχείο φασματικής ανάλυσης. Όταν κυριαρχεί ο θόρυβος φωτονίων της πηγής, το S/N αυξάνεται ως η τετραγωνική ρίζα του αριθμού των καταγεγραμμένων φωτονίων. Συμβάλλουν επίσης ο ουρανός και ο θόρυβος ανάγνωσης. Τέλος, η διαφορετική ατμοσφαιρική διάθλαση μετατοπίζει την εικόνα της πηγής διαφορετικά σε κάθε μήκος κύματος και σε στενή σχισμή προκαλεί απώλειες που εξαρτώνται από το λ . Το φαινόμενο περιορίζεται αν η σχισμή προσανατολιστεί κατά την παραλλακτική γωνία.



Σχήμα 1.8 Στάδια αναγωγής ενός φάσματος μακράς σχισμής (παράδειγμα αστέρα τύπου A). (α) Ακατέργαστη εικόνα CCD: το φάσμα του αστέρα εμφανίζεται ως οριζόντια λωρίδα, οι γραμμές του ουρανού καλύπτουν όλο το μήκος της σχισμής και τα φωτεινά σημεία οφείλονται σε κοσμικές ακτίνες. (β) Εξαγόμενο φάσμα μετά την αφαίρεση του ουρανού, ως συνάρτηση της θέσης στον ανιχνευτή. Το σχήμα του καθορίζεται κυρίως από την απόκριση του οργάνου. (γ) Φάσμα μετά τη βαθμονόμηση μήκους κύματος και ροής, με σημειωμένες τις γραμμές Balmer και τη γραμμή Ca II K.

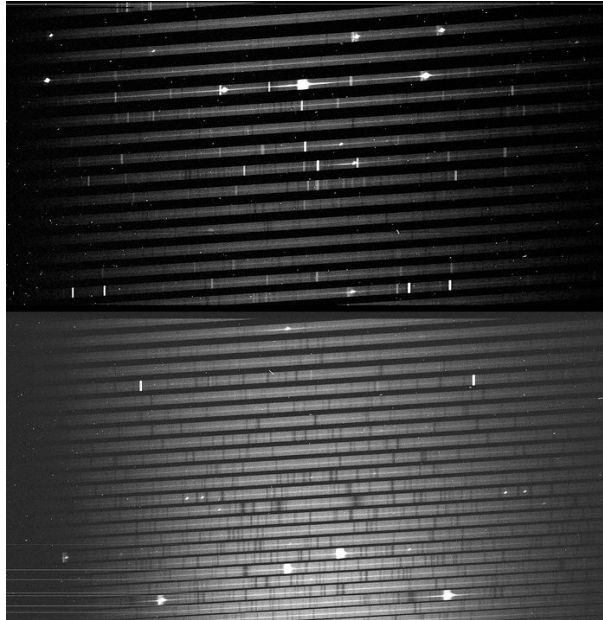
1.4.4 Είδη φασματογράφων

Οι φασματογράφοι διαφέρουν κυρίως ως προς το πόσες πηγές ή περιοχές του ουρανού καταγράφουν ταυτόχρονα και με ποια διακριτική ικανότητα.

Οι φασματογράφοι **μακράς σχισμής** καταγράφουν το φάσμα κάθε σημείου κατά μήκος της σχισμής, διατηρώντας μία χωρική διάσταση (Σχήμα 1.8α). Χρησιμοποιούνται για μεμονωμένους αστέρες και για εκτεταμένες πηγές, όπως νεφελώματα ή γαλαξίες, ενώ οι περιοχές της σχισμής γύρω από την πηγή δίνουν το υπόβαθρο του ουρανού.

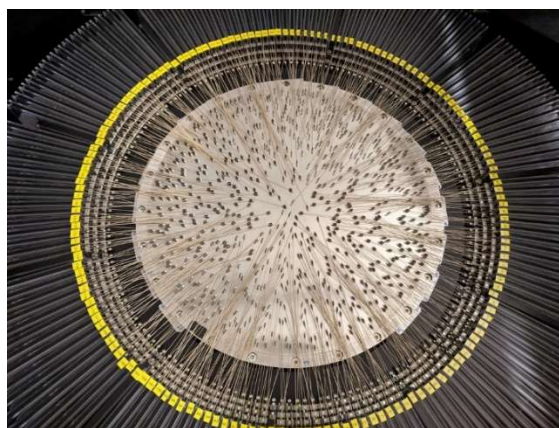
Οι φασματογράφοι **échelle** χρησιμοποιούν φράγμα σε υψηλές τάξεις περίθλασης, όπου η διασπορά και η διακριτική ικανότητα είναι μεγάλες (Ενότητα 1.4.1). Επειδή σε υψηλές τάξεις οι τάξεις επικαλύπτονται, ένα δεύτερο στοιχείο διασποράς τις διαχωρίζει σε κάθετη διεύθυνση. Το φάσμα καταγράφεται έτσι ως σειρά παράλληλων λωρίδων στον ανιχνευτή (Σχήμα 1.9), και

συνδυάζεται υψηλή διακριτική ικανότητα ($R \sim 10^5$) με μεγάλη φασματική κάλυψη. Χρησιμοποιούνται για ακριβείς ακτινικές ταχύτητες και λεπτομερή ανάλυση αστρικών ατμοσφαιρών.



Σχήμα 1.9 Δισδιάστατο φάσμα echelle του SN 1987A, καταγεγραμμένο με τον UVES στο VLT. Διακρίνονται οι διαδοχικές τάξεις περίθλασης και πολλές γραμμές εκπομπής. Πηγή: ESO, εικόνα eso9944b

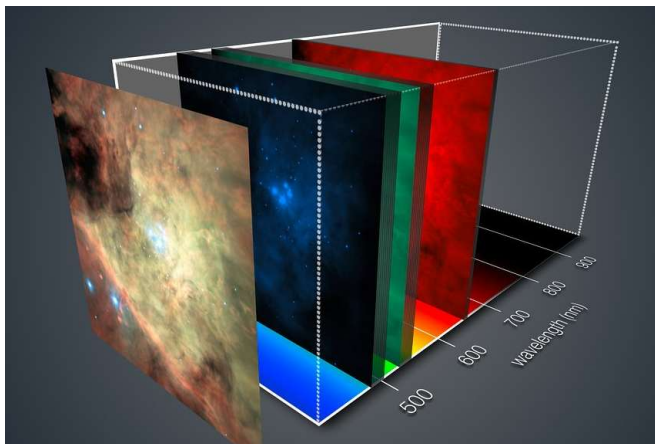
Οι φασματογράφοι **πολλαπλών αντικειμένων** (multi-object spectrographs, MOS) καταγράφουν ταυτόχρονα τα φάσματα δεκάδων έως χιλιάδων πηγών του ίδιου πεδίου. Το φως κάθε πηγής οδηγείται στον φασματογράφο είτε από μια μικρή σχισμή σε μάσκα, είτε από οπτική ίνα που τοποθετείται στη θέση της πηγής στο εστιακό επίπεδο (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10 Διάταξη οπτικών ινών στην πλάκα του εστιακού επιπέδου του WEAVE. Οι κεφαλές των ινών τοποθετούνται ρομποτικά στις θέσεις των επιλεγμένων στόχων. Φωτογραφία: Gavin Dalton/University of Oxford και STFC RAL Space· πηγή: Isaac Newton Group of Telescopes.

Χρησιμοποιούνται όταν χρειάζονται φάσματα πολλών επιλεγμένων πηγών κατανεμημένων σε εκτεταμένη περιοχή του ουρανού. Είναι το βασικό εργαλείο μεγάλων επισκοπήσεων αστέρων και γαλαξιών.

Οι φασματογράφοι **ολοκληρωμένου πεδίου** (integral field units, IFU) καταγράφουν φάσμα για κάθε σημείο ενός δισδιάστατου πεδίου. Το αποτέλεσμα είναι ένας κύβος δεδομένων με δύο χωρικές διαστάσεις και μία φασματική (Σχήμα 1.11). Από αυτόν προκύπτουν χάρτες ταχυτήτων, χημικής σύστασης και φυσικών συνθηκών σε γαλαξίες και νεφελώματα.



Σχήμα 1.11 Απεικόνιση του κύβου δεδομένων του νεφελώματος του Ωρίωνα από τον φασματογράφο ολοκληρωμένου πεδίου MUSE στο VLT. Κάθε χωρικό στοιχείο διαθέτει ένα φάσμα, ενώ κάθε τομή κατά τη φασματική διάσταση δίνει μια εικόνα σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η έγχρωμη εικόνα προκύπτει από τον συνδυασμό τριών επιλεγμένων φασματικών περιοχών. Πηγή: ESO, eso1407b.

2. Φασματικοί τύποι αστέρων

Η φασματική ταξινόμηση κατατάσσει τα αστρικά φάσματα με βάση την παρουσία, τη σχετική ισχύ και σε ορισμένες περιπτώσεις τα προφίλ των φασματικών γραμμών και των μοριακών ζωνών. Είναι εμπειρικό σύστημα, που στηρίζεται στη σύγκριση με φάσματα αστέρων αναφοράς και όχι σε φυσικά μοντέλα. Ο φασματικός τύπος συσχετίζεται κυρίως με την ενεργό θερμοκρασία και η τάξη λαμπρότητας με την επιφανειακή βαρύτητα. Η φυσική ερμηνεία αυτών των συσχετίσεων βασίζεται στις συνθήκες διέγερσης και ιονισμού στην αστρική ατμόσφαιρα.

2.1 Η ακολουθία των φασματικών τύπων

Η βασική ακολουθία O–B–A–F–G–K–M αντιστοιχεί σε φθίνουσα ενεργό θερμοκρασία. Κάθε τύπος υποδιαιρείται σε αριθμητικούς υποτύπους, συνήθως από 0 έως 9 (χρησιμοποιούνται και ενδιάμεσοι, π.χ. B0.5), με αύξοντα αριθμό προς χαμηλότερη θερμοκρασία: A0, A1, ..., A9, F0 κλπ. Οι όροι «πρώιμος» και «όψιμος» τύπος δηλώνουν μόνο τη θέση στην ακολουθία. Προέρχονται

από μια παλαιότερη, εσφαλμένη υπόθεση ότι η ακολουθία ήταν εξελικτική, και δεν σχετίζονται με την ηλικία ή το εξελικτικό στάδιο του αστέρα.

Η ενεργός θερμοκρασία T_{eff} είναι η θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος που εκπέμπει την ίδια συνολική ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας με τον αστέρα: $F = \sigma T_{eff}^4$, ή ισοδύναμα $L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$ όπου L η φωτεινότητα (luminosity), δηλαδή η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς του αστέρα (σε W), και R η ακτίνα του αστέρα. Χαρακτηρίζει την ατμόσφαιρα ως σύνολο και δεν είναι τοπική θερμοκρασία. Κατά προσέγγιση, είναι η θερμοκρασία στο στρώμα της ατμόσφαιρας με οπτικό βάθος $\tau \approx 2/3$, από το οποίο προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας που διαφεύγει. Η αντιστοίχιση φασματικού τύπου και T_{eff} εξαρτάται επίσης από την «τάξη λαμπρότητας» (βλ. 2.2) και τη χημική σύσταση.

Η μεταβολή της ισχύος μιας γραμμής κατά μήκος της ακολουθίας δεν οφείλεται σε αντίστοιχη μεταβολή της αφθονίας του στοιχείου. Καθορίζεται κυρίως από τον πληθυσμό της κατώτερης στάθμης της μετάβασης, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση μέσω της διέγερσης και του ιονισμού (βλ. 2.2). Για παράδειγμα, οι ισχυρές γραμμές Balmer στους αστέρες τύπου A δεν σημαίνουν ότι αυτοί περιέχουν περισσότερο υδρογόνο από τους αστέρες τύπου O ή M. Σε όλους αυτούς τους αστέρες το υδρογόνο αποτελεί περίπου το 70% της μάζας της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 2.1 Κύρια χαρακτηριστικά φασματικών τύπων

Τύπος	T_{eff} (K)	Ενδεικτικά φασματικά γνωρίσματα*
O	$\geq 30\,000$	He II και He I, γραμμές ιόντων υψηλών σταδίων ιονισμού (π.χ. N III, Si IV), ασθενείς Balmer
B	10 000–30 000	He I με μέγιστο κοντά στον B2, Balmer που ενισχύονται προς τους όψιμους B, Si II–IV, Mg II
A	7 500–10 000	Balmer με μέγιστη ισχύ κοντά στους A0–A2, Ca II K που ενισχύεται, ασθενείς γραμμές μετάλλων
F	6 000–7 500	Balmer ασθενέστερες, ισχυρές Ca II H και K, γραμμές μετάλλων που ενισχύονται
G	5 200–6 000	Πολύ ισχυρές Ca II H και K, πολλές γραμμές μετάλλων, ζώνη G του CH
K	3 700–5 200	Ισχυρές γραμμές ουδέτερων μετάλλων και Ca I 4227 Å, ασθενείς Balmer, ζώνες TiO στους όψιμους K
M	$\leq 3\,700$	Ισχυρές μοριακές ζώνες, κυρίως TiO στο οπτικό, ισχυρή Ca I 4227 Å

* Οι θερμοκρασίες είναι προσεγγιστικές και αφορούν κυρίως αστέρες της κύριας ακολουθίας, ενώ τα όρια δεν αποτελούν ορισμούς των τύπων. Στη φασματοσκοπική γραφή ο λατινικός αριθμός δηλώνει το στάδιο ιονισμού: I για το ουδέτερο άτομο, II για το άπαξ ιονισμένο, III για το δις ιονισμένο κ.ο.κ. Ως «μέταλλα» στην αστροφυσική ονομάζονται όλα τα στοιχεία βαρύτερα από το ήλιο.

2.2 Η φυσική ερμηνεία της ακολουθίας φασματικών τύπων

Η απορρόφηση ενός φωτονίου σε μια δέσμια-δέσμια μετάβαση προϋποθέτει την παρουσία ατόμων, ιόντων ή μορίων στην κατώτερη από τις δύο ενεργειακές στάθμες που συνδέει η μετάβαση, και φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των δύο σταθμών. Με την απορρόφηση, το σωματίδιο μεταβαίνει στην ανώτερη στάθμη. Στις ηλεκτρονικές μεταβάσεις αυτό αντιστοιχεί στη μετάβαση ενός ηλεκτρονίου σε τροχιακό υψηλότερης ενέργειας. Στα μόρια υπάρχουν επιπλέον μεταβάσεις, δόνησης και περιστροφής.

Η απορρόφηση σε μια μετάβαση προϋποθέτει πληθυσμό στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη της. Σε συνθήκες ΤΘΙ, ο λόγος των πληθυσμών δύο σταθμών του ίδιου σταδίου ιονισμού δίνεται από την κατανομή Boltzmann:

$$\frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp \left[-\frac{E_j - E_i}{kT} \right]$$

όπου n_i και n_j οι πληθυσμοί ανά μονάδα όγκου, g_i και g_j τα στατιστικά βάρη, E_i και E_j οι ενέργειες των σταθμών, k η σταθερά Boltzmann και T η τοπική θερμοκρασία. Η κατανομή ανάμεσα σε διαδοχικά στάδια ιονισμού δίνεται από την εξίσωση Saha:

$$\frac{n_{r+1}n_e}{n_r} = 2 \frac{U_{r+1}(T)}{U_r(T)} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{\chi_r}{kT} \right]$$

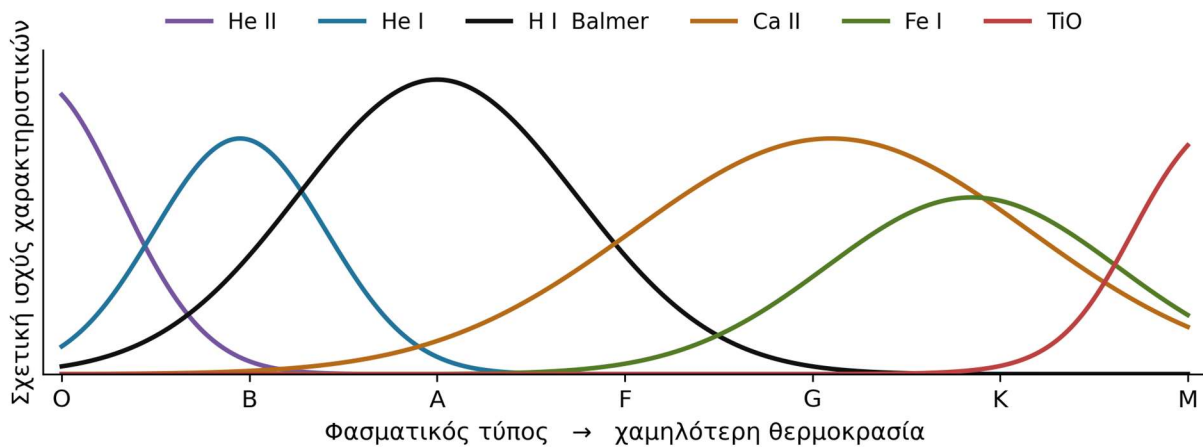
όπου n_r και n_{r+1} οι αριθμητικές πυκνότητες του στοιχείου στα στάδια ιονισμού r και $r + 1$, n_e η πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, U_r και U_{r+1} οι συναρτήσεις επιμερισμού, χ_r η ενέργεια ιονισμού από το στάδιο r στο $r + 1$, m_e η μάζα του ηλεκτρονίου και h η σταθερά Planck. Στις δύο εξισώσεις η T είναι η θερμοκρασία στο στρώμα όπου σχηματίζεται η γραμμή και όχι η T_{eff} , η οποία χαρακτηρίζει την ατμόσφαιρα ως σύνολο. Ο ιονισμός εξαρτάται επίσης από την n_e , δηλαδή από την πίεση, κάτι που αξιοποιείται στα κριτήρια λαμπρότητας (Ενότητα 2.3). Σε θερμές ή αραιές ατμόσφαιρες η παραδοχή ΤΘΙ μπορεί να μην ισχύει.

Οι γραμμές Balmer έχουν κατώτερη στάθμη την $n = 2$ του ουδέτερου υδρογόνου, η οποία βρίσκεται 10,2 eV πάνω από τη θεμελιώδη. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου $kT \ll 10,2$ eV, σχεδόν όλα τα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη στάθμη και ο πληθυσμός της $n = 2$ είναι αμελητέος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ο πληθυσμός αυτός αυξάνεται, αλλά σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες ο ιονισμός μειώνει το κλάσμα του ουδέτερου υδρογόνου. Ο συνδυασμός των δύο φαινομένων δίνει μέγιστη ισχύ των Balmer κοντά στους A0–A2, σε $T_{eff} \approx 10\,000$ K.

Με ανάλογο τρόπο ερμηνεύονται και οι χαρακτηριστικές γραμμές άλλων στοιχείων (ουδέτερων ατόμων, ή ιόντων) ή μορίων (Σχήμα 2.1):

- **He II:** απαιτεί ιονισμό του He (24,6 eV) και διέγερση του He⁺, γι' αυτό εμφανίζεται μόνο στους πολύ θερμούς αστέρες O.

- **He I:** οι οπτικές γραμμές του έχουν κατώτερες στάθμες περίπου 21 eV πάνω από τη θεμελιώδη, γι' αυτό κορυφώνονται στους αστέρες B.
- **Ca II H και K:** έχουν κατώτερη στάθμη τη θεμελιώδη του Ca^+ . Είναι ισχυρότερες όταν το ασβέστιο είναι κυρίως άπαξ ιονισμένο (6,1 eV) αλλά όχι δις (11,9 eV), δηλαδή στους τύπους G και K.
- **Ουδέτερα μέταλλα:** έχουν χαμηλά δυναμικά ιονισμού και διέγερσης και ενισχύονται προς τους ψυχρότερους τύπους.
- **Μόρια:** σε θερμοκρασίες κάτω από περίπου 4 000 K επιβιώνουν μόρια και εμφανίζονται ισχυρές ζώνες, όπως του TiO στους αστέρες M.



Σχήμα 2.1. Ποιοτική μεταβολή επιλεγμένων φασματικών χαρακτηριστικών κατά μήκος της ακολουθίας. Κάθε καμπύλη έχει ανεξάρτητη κανονικοποίηση. Οι καμπύλες είναι σχηματικές και δεν αποτελούν μετρήσεις ή υπολογισμούς αστρικών ατμοσφαιρών, ενώ οι αποστάσεις μεταξύ των τύπων δεν αντιστοιχούν σε ίσα διαστήματα θερμοκρασίας. Ανασχεδίαση και απλοποίηση, με τη βοήθεια του ChatGPT, του διαγράμματος στη σελίδα Spectral Classification of Stars, handprint.com..

Η ισχύς και το προφίλ μιας γραμμής εξαρτώνται επίσης από την αφθονία του στοιχείου, την πιθανότητα της μετάβασης, τον κορεσμό, τη θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας και την αδιαφάνεια του συνεχούς. Η τελευταία καθορίζει, σε σχέση με την αδιαφάνεια στη γραμμή, σε ποιο βάθος σχηματίζεται η γραμμή ως προς το συνεχές, και στους ψυχρούς αστέρες οφείλεται κυρίως στο ιόν H^- .

2.3 Το σύστημα ταξινόμησης MK και οι τάξεις λαμπρότητας

Το σύστημα Morgan–Keenan (MK) συνδυάζει τον φασματικό τύπο της ακολουθίας O–B–A–F–G–K–M με την «τάξη λαμπρότητας» και βασίζεται στην εμπειρική σύγκριση με φάσματα πρότυπων αστέρων, κατά κανόνα στην περιοχή 3800–4600 Å και με φασματική ανάλυση της τάξης των 2–3 Å. Διατηρούμε εδώ τον καθιερωμένο όρο «τάξη λαμπρότητας» (luminosity class) για τη

φασματική κατηγορία του συστήματος MK, ενώ για τη φυσική ποσότητα L , δηλαδή τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ του αστέρα, χρησιμοποιούμε τον όρο «φωτεινότητα». Οι βασικές τάξεις λαμπρότητας είναι:

- ✓ I: υπεργίγαντες, με υποδιαίρεσεις Ia και Ib
- ✓ II: λαμπροί γίγαντες
- ✓ III: γίγαντες
- ✓ IV: υπογίγαντες
- ✓ V: νάνοι (άστρα της κύριας ακολουθίας)

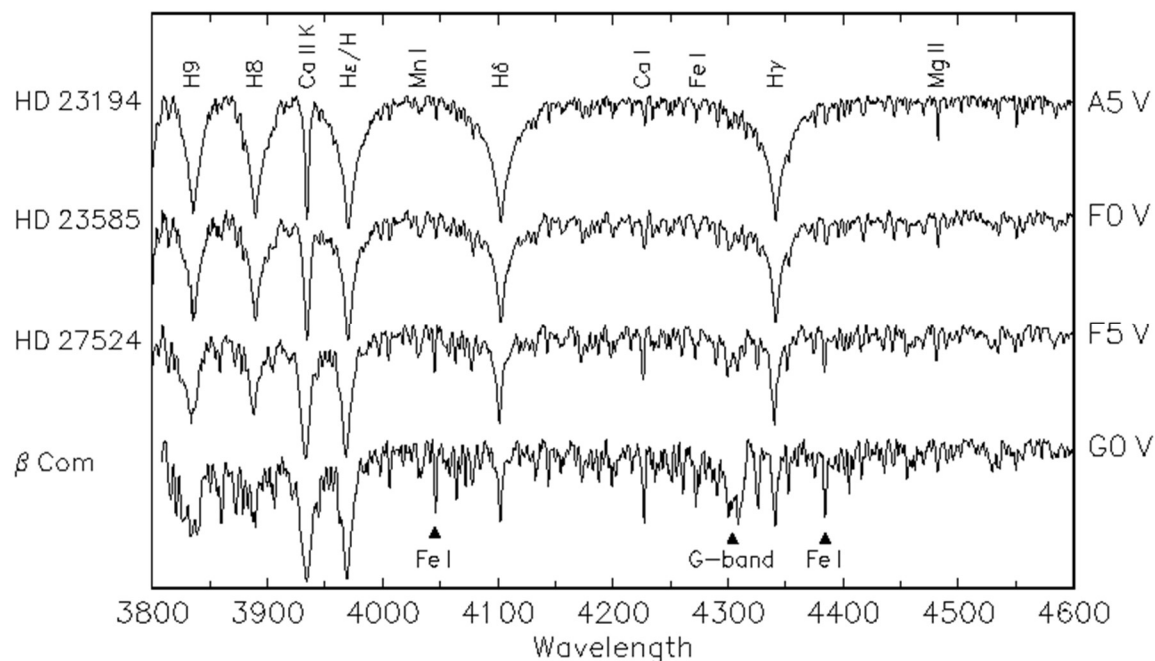
Ο χαρακτηρισμός G2 V, για παράδειγμα, δηλώνει φασματικό υποτύπο G2 και τάξη λαμπρότητας V. Είναι ο χαρακτηρισμός του Ήλιου.

Τα κριτήρια λαμπρότητας είναι φασματικά και βασίζονται κυρίως στην εξάρτηση των γραμμών από την επιφανειακή βαρύτητα $g = GM/R^2$. Για δεδομένη T_{eff} , ένας αστέρας μεγαλύτερης ακτίνας έχει ταυτόχρονα μεγαλύτερη φωτεινότητα (luminosity, $L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$) και μικρότερη επιφανειακή βαρύτητα. Η μικρότερη επιφανειακή βαρύτητα σημαίνει μικρότερη πίεση στην ατμόσφαιρα, η οποία ευνοεί τον ιονισμό (Ενότητα 2.2) και μειώνει τη διαπλάτυνση λόγω πίεσης. Στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο είδη κριτηρίων:

Στους αστέρες B και A: οι πτέρυγες των γραμμών Balmer, που οφείλονται κυρίως στη διαπλάτυνση Stark (Ενότητα 1.3.5). Επειδή η διαπλάτυνση αυξάνεται με την πυκνότητα των φορτισμένων σωματιδίων, οι πτέρυγες είναι πλατιές στους νάνους και πολύ στενότερες στους υπεργίγαντες.

Στους ψυχρότερους τύπους: λόγοι ισχύων γραμμών ιόντων προς γραμμές ουδέτερων ατόμων. Για παράδειγμα, η Sr II 4077 Å ενισχύεται σε σχέση με γειτονικές γραμμές Fe I στους αστέρες μεγαλύτερης φωτεινότητας.

Η τάξη λαμπρότητας δεν είναι επομένως άμεση μέτρηση της L , αλλά συσχετίζεται με αυτήν για δεδομένο φασματικό τύπο.



Σχήμα 2.2 Παρατηρούμενα φάσματα αστέρων της κύριας ακολουθίας από A5 V έως G0 V. Προς τους ψυχρότερους τύπους οι γραμμές Balmer εξασθενούν και οι γραμμές μετάλλων ενισχύονται, ενώ εμφανίζεται και η ζώνη G του CH. Τα φάσματα είναι κανονικοποιημένα ως προς το συνεχές και μετατοπισμένα κατακόρυφα. Ο άξονας του μήκους κύματος είναι σε Å ($10 \text{ Å} = 1 \text{ nm}$). Πηγή: R. O. Gray, A Digital Spectral Classification Atlas, v. 1.02, §17, Figure 16, NASA/IPAC NED.

Στην εργαστηριακή ταξινόμηση συγκρίνουμε φάσματα στην ίδια φασματική περιοχή και με την ίδια διακριτική ικανότητα, αφού έχουν ελεγχθεί η βαθμονόμηση μήκους κύματος και η μετατόπιση λόγω ακτινικής ταχύτητας. Η ίδια διακριτική ικανότητα είναι απαραίτητη, γιατί από αυτήν εξαρτώνται το φαινόμενο βάθος των γραμμών και η ανάμειξη γειτονικών γραμμών. Η ταξινόμηση βασίζεται σε πολλά διαγνωστικά γνωρίσματα μαζί και όχι σε μία γραμμή. Τη σύγκριση μπορούν να επηρεάσουν η περιστροφική διαπλάτυνση, η μεταλλικότητα, οι χημικές ιδιομορφίες (π.χ. αστέρες Ap και Am) και η υπέρθεση των φασμάτων δύο αστέρων σε διπλά συστήματα. Η κλίση του συνεχούς δίνει συμπληρωματική πληροφορία για τη θερμοκρασία, αλλά επηρεάζεται από τη μεσοαστρική ερύθρωση και από τη φασματική απόκριση του οργάνου.

3. Εργαστηριακή άσκηση

3.1 Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι η εξοικείωση με τη μέτρηση και τη φυσική ερμηνεία φασματικών γραμμών σε πραγματικά αστρικά φάσματα. Συγκεκριμένα:

- ✓ η σύγκριση φασμάτων διαφορετικών φασματικών τύπων και η αναγνώριση των κύριων γνωρισμάτων της ακολουθίας (Ενότητα 2.1, Πίνακας 2.1, Σχήμα 2.2),
- ✓ η μέτρηση του ισοδύναμου πλάτους, της ροής και του λόγου σήματος προς θόρυβο μιας γραμμής απορρόφησης (Ενότητες 1.3.1 και 1.4.3),
- ✓ η μελέτη της μεταβολής της ισχύος των γραμμών του υδρογόνου κατά μήκος της ακολουθίας και η ερμηνεία της με τις εξισώσεις Boltzmann και Saha (Ενότητα 2.2),
- ✓ η εκτίμηση θερμοκρασίας από τον λόγο ισχύων δύο γραμμών του υδρογόνου και η σύγκρισή της με την ενεργό θερμοκρασία.

3.2 Δεδομένα

Χρησιμοποιούνται τα πρότυπα φάσματα (templates) του πακέτου PyHammer (Kesseli et al. 2017), τα οποία είναι μέσοι όροι φασμάτων αστέρων κάθε τύπου από το Sloan Digital Sky Survey (SDSS/BOSS). Καλύπτουν την περιοχή 3 650–10 200 Å με διακριτική ικανότητα $R \approx 2\,000$.

Δίνονται πρότυπα φάσματα των τύπων O5, B0, B5, A0, A6, F0, F5, G0, G5, K0, K5, M0 και M5, όλοι αστέρες της κύριας ακολουθίας. Κάθε αρχείο περιέχει δύο στήλες: το μήκος κύματος σε Å και την πυκνότητα ροής f_λ σε μονάδες $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$. Τα φάσματα είναι ήδη ανηγμένα (reduced), δηλαδή έχουν γίνει τα βήματα της Ενότητας 1.4.3.

Η επεξεργασία γίνεται στο Jupyter notebook *Stellar_Spectroscopy* σε Python, με τις βιβλιοθήκες numpy και matplotlib, τοπικά ή στο Google Colab.

3.3 Βήματα

1. **Ανάκτηση και ανάγνωση των δεδομένων.** Κατεβάστε τα πρότυπα φάσματα και διαβάστε τα με τη συνάρτηση `np.loadtxt`. Τα φάσματα οργανώνονται σε λεξικό, ώστε κάθε φάσμα να καλείται με το όνομα του τύπου του, π.χ. `spectra["F0"]`.
2. **Σύγκριση της ακολουθίας φασματικών τύπων.** Σχεδιάστε όλα τα φάσματα στο ίδιο διάγραμμα, κανονικοποιημένα στη μέση τιμή τους. Παρατηρήστε τη μεταβολή της κλίσης του συνεχούς με τον φασματικό τύπο (Ενότητα 1.3.3). Αναγνωρίστε τα γνωρίσματα του Πίνακα 2.1: τις γραμμές Balmer, τις Ca II H και K, τη ζώνη G και τις ζώνες TiO. Σημειώστε επίσης το άλμα Balmer κοντά στα 3646 Å στους θερμούς αστέρες.

- 3. Απομόνωση μιας γραμμής.** Ως πρώτο παράδειγμα χρησιμοποιήστε τη γραμμή Ηα (6563 Å) στο φάσμα του αστέρα G0. Κρατήστε μια περιοχή $\pm \Delta\lambda$ γύρω από το κέντρο της γραμμής. Το $\Delta\lambda$ πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πλάτος της γραμμής, ώστε να περιλαμβάνει τις πτέρυγές της (βλ. 1.3.1) και περιοχές καθαρού συνεχούς. Στους θερμούς αστέρες οι πτέρυγες των Balmer εκτείνονται σε δεκάδες Å, λόγω της διαπλάτυνσης Stark (βλ. 1.3.5).
- 4. Προσαρμογή του συνεχούς.** Ορίστε δύο παράθυρα συνεχούς, ένα σε κάθε πλευρά της γραμμής. Το τοπικό συνεχές $f_{\lambda,c}$ προσεγγίζεται με ευθεία που διέρχεται από τις μέσες τιμές της ροής στα δύο παράθυρα. Ελέγξτε οπτικά ότι τα παράθυρα δεν περιέχουν άλλες γραμμές. Η επιλογή τους είναι η κύρια πηγή συστηματικού σφάλματος στη μέτρηση (βλ. 1.3.1).
- 5. Ροή, θόρυβος και ισοδύναμο πλάτος.** Για τη γραμμή Ηα του αστέρα G0, από τα pixels ανάμεσα στα δύο παράθυρα συνεχούς, υπολογίστε:
- ✓ τη ροή της γραμμής $F = |\Sigma (f_{\lambda} - f_{\lambda,c}) \Delta\lambda|$, δηλαδή το εμβαδόν μεταξύ φάσματος και συνεχούς, σε $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$,
 - ✓ τον λόγο σήματος προς θόρυβο $F/(\sqrt{N} \sigma \Delta\lambda)$, όπου σ η τυπική απόκλιση της ροής γύρω από το συνεχές στα παράθυρα και N ο αριθμός των pixels της γραμμής²,
 - ✓ το ισοδύναμο πλάτος $W_{\lambda} = \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{f_{\lambda,i}}{f_{\lambda,c,i}} \right] \Delta\lambda_i$, σε Å, που είναι η διακριτή μορφή του ορισμού της παρ. 1.3.1.
- Με τη σύμβαση αυτή μια γραμμή απορρόφησης έχει θετικό και μια γραμμή εκπομπής αρνητικό W_{λ} . Σε αντίθεση με τη ροή, το W_{λ} δεν εξαρτάται από τη φωτεινότητα (luminosity) ή την απόσταση του αστέρα, γι' αυτό επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών αστέρων.
- 6. Η γραμμή Ηα κατά μήκος της ακολουθίας.** Επαναλάβετε τη μέτρηση του W_{λ} της Ηα για όλους τους φασματικούς τύπους. Σχεδιάστε το W_{λ} ως συνάρτηση του φασματικού τύπου και ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σε ποιον τύπο εμφανίζεται το μέγιστο; Ερμηνεύστε το αποτέλεσμα με τη βοήθεια της παρ. 2.2 και του Σχήματος 2.1.
- 7. Σύγκριση με φάσμα μέλανος σώματος.** Για τον αστέρα F0, σχεδιάστε μαζί με το φάσμα του ένα φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας ίσης με την T_{eff} του αστέρα, με την ίδια κανονικοποίηση. Σε ποιες περιοχές αποκλίνουν; Συσχετίστε τις αποκλίσεις με το άλμα Balmer, με την πυκνότητα των γραμμών απορρόφησης στο μπλε και με τους παράγοντες της Ενότητας 1.3.3.

² $f = \sum_{i=1}^N (f_{\lambda,i} - f_{\lambda,c,i}) \Delta\lambda$, με $\sigma(f_{\lambda,i}) = \sigma$ για κάθε pixel. Για ανεξάρτητα pixels
 $\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^N (\sigma \Delta\lambda)^2 = N \sigma^2 \Delta\lambda^2$, άρα $\sigma_f = \sqrt{N} \sigma \Delta\lambda$ και $S/N = F/\sigma_f = F/(\sqrt{N} \sigma \Delta\lambda)$.

3.4 Εργασία για το σπίτι

Στόχος είναι η εκτίμηση της θερμοκρασίας διέγερσης στην ατμόσφαιρα του αστέρα F0 από τις γραμμές Hδ (σειρά Balmer, $n = 2 \rightarrow 6$, $\lambda \approx 4102 \text{ \AA}$) και Paδ (σειρά Paschen, $n = 3 \rightarrow 7$, $\lambda \approx 10049 \text{ \AA}$).

1. **Μέτρηση.** Μετρήστε το ισοδύναμο πλάτος των Hδ και Paδ στο φάσμα του F0, ακολουθώντας τα βήματα 3–5 της Ενότητας 3.2. Δώστε το W_λ και τον λόγο σήματος προς θόρυβο κάθε γραμμής, και αιτιολογήστε την επιλογή των παραθύρων συνεχούς. Η Paδ βρίσκεται κοντά στο άκρο του φάσματος, όπου ο θόρυβος είναι μεγαλύτερος.
2. **Καμπύλη αύξησης.** Η καμπύλη αύξησης δίνει το $\log(W_\lambda/\lambda)$ ως συνάρτηση του $\log(f N_\alpha \lambda)$, όπου f η ισχύς ταλαντωτή της μετάβασης και N_α ο αριθμός των απορροφούντων ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας. Στο γραμμικό της τμήμα, όπου η γραμμή δεν είναι κορεσμένη (Ενότητα 1.3.2), ισχύει $W_\lambda/\lambda \propto f N_\alpha \lambda$. Χρησιμοποιήστε την καμπύλη αύξησης του Ήλιου (Carroll & Ostlie, Σχήμα 6.22 της ελληνικής έκδοσης) για να διαπιστώσετε σε ποιο τμήμα της βρίσκονται οι δύο μετρήσεις σας.
3. **Λόγος πληθυσμών.** Αν και οι δύο γραμμές βρίσκονται στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης αύξησης, ο λόγος των πληθυσμών των κατώτερων σταθμών τους είναι $N_2/N_3 = (W_{H\delta} / W_{Pa\delta}) \cdot (f_{Pa\delta} / f_{H\delta}) \cdot (\lambda_{Pa\delta} / \lambda_{H\delta})^2$ με ισχύ ταλαντωτή $f_{H\delta} = 0,0221$ και $f_{Pa} = 0,0277$.
4. **Θερμοκρασία διέγερσης.** Οι ενέργειες των σταθμών του υδρογόνου, μετρημένες από τη θεμελιώδη, είναι $E_n = 13,6 (1 - 1/n^2) \text{ eV}$, και τα στατιστικά βάρη $g_n = 2n^2$. Εφαρμόστε την εξίσωση Boltzmann (βλ. 2.2) για τις στάθμες $n = 2$ και $n = 3$ και υπολογίστε τη θερμοκρασία διέγερσης T .
5. **Σύγκριση και ερμηνεία.** Συγκρίνετε την T με την αναμενόμενη ενεργό θερμοκρασία για αστέρες F0 της κύριας ακολουθίας ($\approx 7\,400 \text{ K}$, Πίνακας 2.1). Συζητήστε τις πιθανές αιτίες της διαφοράς, όπως:
 - ο η θέση των γραμμών στην καμπύλη αύξησης
 - ο η διαφορά ανάμεσα στην τοπική θερμοκρασία των στρωμάτων όπου σχηματίζονται οι γραμμές και στην T_{eff} (βλ. 2.1 και 2.2),
 - ο η διαφορετική αδιαφάνεια του συνεχούς στα $4100 \text{ \AA}$ και στα $10050 \text{ \AA}$,
 - ο η χρήση της καμπύλης αύξησης του Ήλιου για αστέρα διαφορετικού τύπου,
 - ο η αβεβαιότητα της μέτρησης, ιδίως για την Paδ.

Εργασία. Σύντομη αναφορά μέχρι 2 σελίδες με (i) το κύριο αποτέλεσμα της άσκησης που εκτελέσατε στο εργαστήριο (δηλ. ένα διάγραμμα με τη μεταβολή του EW της γραμμής Hα με το

φασματικό τύπο και τη σύντομη ερμηνεία του) και (ii) τις μετρήσεις του W_λ για τις γραμμές Hδ και Ραδ, και τις αβεβαιότητές τους (μπορείτε να προσθέσετε δυο διαγράμματα που να δείχνουν τη κάθε μια από τις γραμμές και το συνεχές που υποθέσατε), τον υπολογισμό της θερμοκρασίας διέγερσης (δώστε σε πίνακα τις τιμές των διαφόρων μεγεθών που χρησιμοποιήσατε για τους υπολογισμούς σας, και τις βασικές μαθηματικές σχέσεις) και ένα σύντομο σχολιασμό του αποτελέσματος. Δεν χρειάζεται να προσθέσετε θεωρητική εισαγωγή.

Βιβλιογραφία

- [1] Carroll, B. W. & Ostlie, D. A. (2017). An Introduction to Modern Astrophysics, 2nd ed. Cambridge University Press
- [2] Massey, P. & Hanson, M. M. (2013), Astronomical Spectroscopy. Στο T. D. Oswalt & H. E. Bond (επιμ.), Planets, Stars and Stellar Systems, Vol. 2, σ. 35–98. Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-5618-2_2.
- [3] Tennyson, J. (2005), Astronomical Spectroscopy: An Introduction to the Atomic and Molecular Physics of Astronomical Spectra. Imperial College Press. Ιδίως κεφάλαια 1 και 2.
- [4] Gray, R. O. & Corbally, C. J. (2009). Stellar Spectral Classification. Princeton University Press.
- [5] Gray, R. O. A Digital Spectral Classification Atlas, v. 1.02. Appalachian State University· ηλεκτρονική έκδοση NASA/IPAC NED.
https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Gray/Gray_contents.html

Για τη γλωσσική επιμέλεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο τεχνητής νοημοσύνης Claude (Anthropic).

Τα Σχήματα 1.2, 1.6–1.9 δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του Claude (Anthropic) και βασίζονται σε συνθετικά δεδομένα.