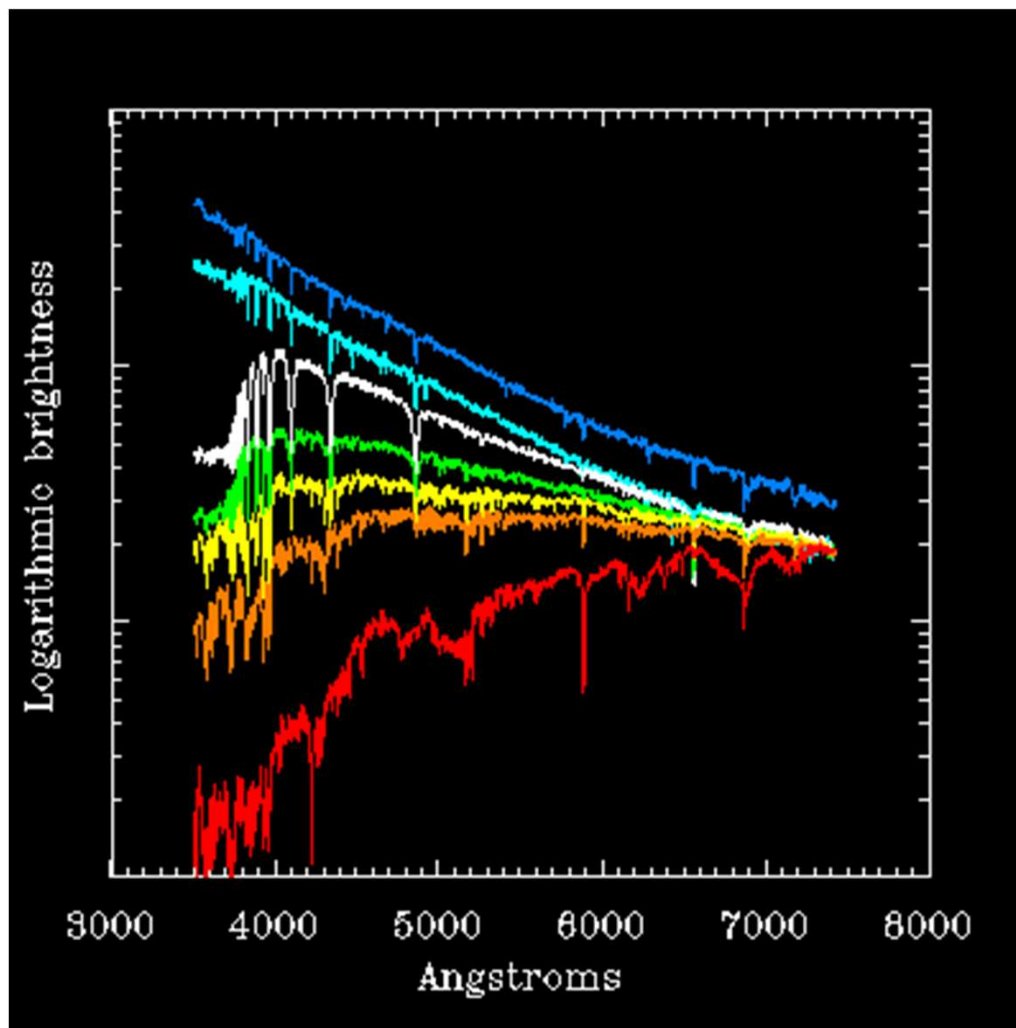


Εργαστήριο Κατεύθυνσης Αστροφυσικής

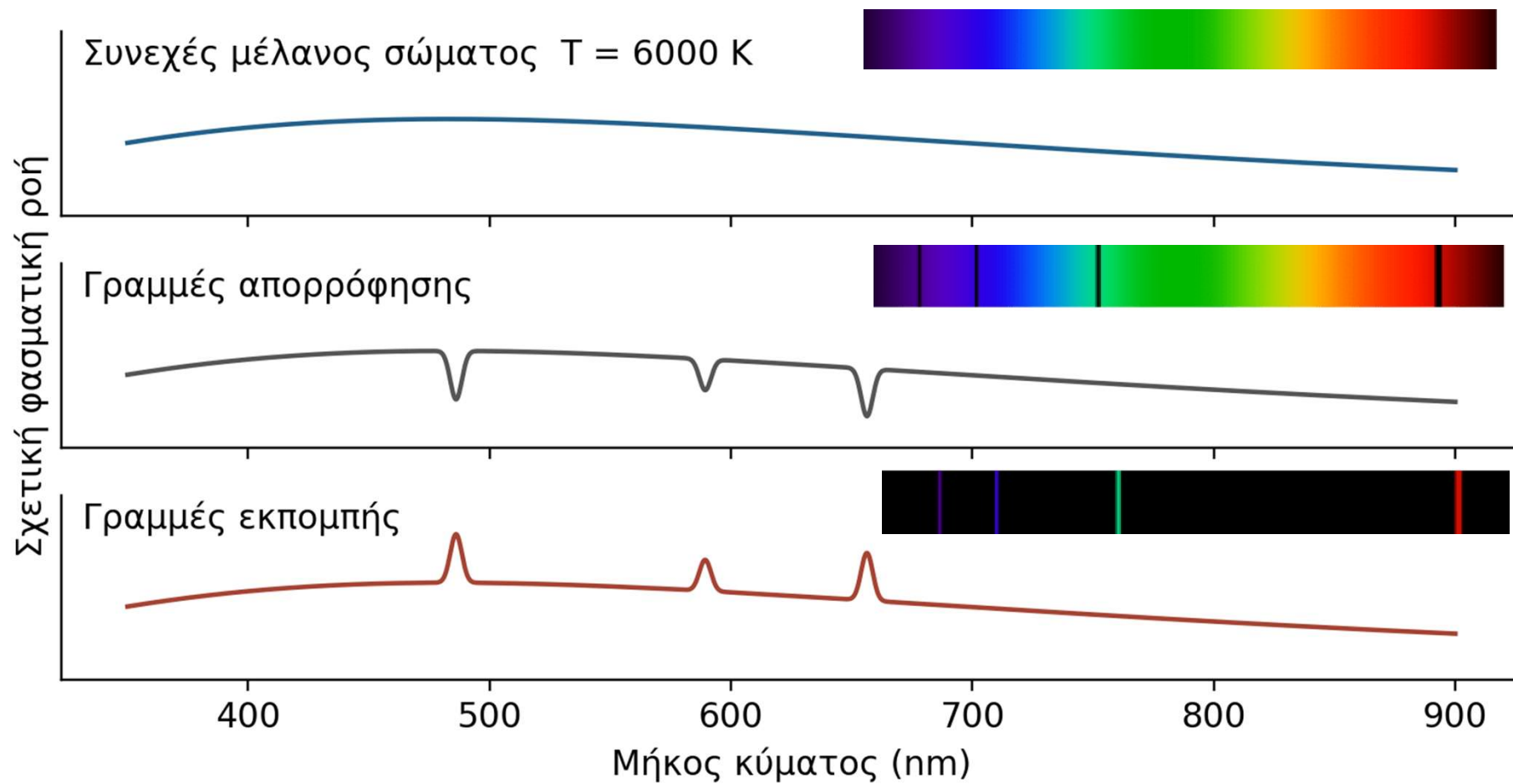
Αστρονομική φασματοσκοπία



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

Φασματοσκοπία

- **Φάσμα:** η κατανομή της ακτινοβολίας μιας πηγής ως συνάρτηση του μήκους κύματος λ ή της συχνότητας. ν
- **Φασματική πυκνότητα ροής** f_λ (ή f_ν), η ενέργεια που φθάνει ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας και διαστήματος μήκους κύματος (ή συχνότητας) π.χ. $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$, $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$
- **Συνεχές:** ομαλά μεταβαλλόμενη συνιστώσα του φάσματος σε ευρύ διάστημα μηκών κύματος.
- **Γραμμές εκπομπής ή απορρόφησης:** σχετικά στενές περιοχές όπου η ροή αυξάνεται ή μειώνεται ως προς το τοπικό συνεχές.
- **Μοριακές ζώνες:** σύνολα πολλών γειτονικών μοριακών μεταβάσεων (δονητικών και περιστροφικών)
- **Φασματοσκοπία:** η μέτρηση και ανάλυση του φάσματος, δηλαδή του συνεχούς και των γραμμών, για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων της πηγής (θερμοκρασία, χημική σύσταση, ταχύτητες κ.ά.).



Από την εξίσωση διάδοσης στο είδος του φάσματος

- **Οπτικά πυκνή θερμική πηγή σε ΤΘΙ** → συνεχές φάσμα που προσεγγίζει το φάσμα μέλανος σώματος.
- **Οπτικά αραιό αέριο** → οι ακτινοβολιακές αποδιεγέρσεις ατόμων, ιόντων και μορίων δίνουν γραμμές εκπομπής.
- **Αέριο μπροστά από πηγή συνεχούς φάσματος έντασης I_0 , με σταθερή συνάρτηση πηγής, S_ν ,**
$$I_\nu = I_{\nu,0} e^{-\tau_\nu} + S_\nu (1 - e^{-\tau_\nu})$$
- **Στις συχνότητες των μεταβάσεων** το τ_ν αυξάνεται, οπότε η I_ν τείνει προς τη S_ν
 - αν $I_{\nu,0} > S_\nu$, η ένταση μειώνεται → **γραμμή απορρόφησης**,
 - αν $I_{\nu,0} < S_\nu$ η ένταση αυξάνεται → **γραμμή εκπομπής**.

(από Φυσική των Αστέρων)

Η φυσική προέλευση των φασματικών γραμμών

- Τα άτομα, τα ιόντα και τα μόρια έχουν διακριτές ενεργειακές στάθμες (για τις δέσμιες καταστάσεις τους)
- Μια **ακτινοβολιακή αποδιέγερση** από ανώτερη (u) σε κατώτερη (l) στάθμη συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίου, του οποίου η ενέργεια ισούται με τη διαφορά των ενεργειών τους,

$$E_u - E_l = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

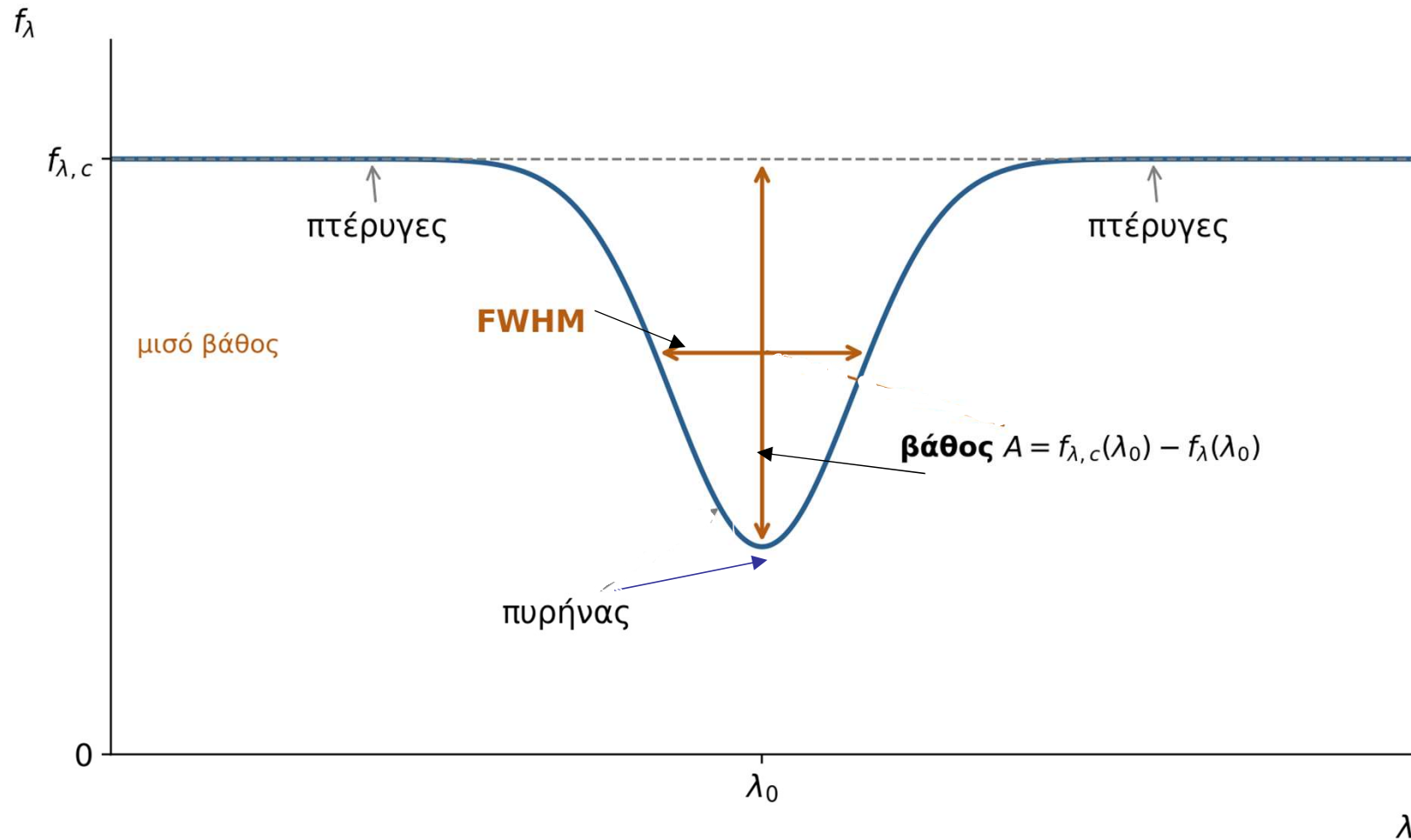
όπου h η σταθερά του Planck, c η ταχύτητα του φωτός.

- Αντίστροφα, ένα φωτόνιο με την ίδια ενέργεια $h\nu$ μπορεί να απορροφηθεί και να προκαλέσει τη μετάβαση του σωματιδίου από τη στάθμη l στη στάθμη u .
- Σημ. Οι μεταβάσεις μεταξύ σταθμών δεν γίνονται όμως μόνο με ακτινοβολία, αλλά μπορούν να συμβούν και με κρούσεις, χωρίς απορρόφηση ή εκπομπή φωτονίου

Παραδείγματα διακριτών μεταβάσεων για αστρικά φάσματα

Είδος μετάβασης	Ενέργεια (eV)	Φασματική περιοχή	Παράδειγμα
Υπέρλεπτη υφή	10^{-6} -10^{-5}	ραδιοφωνική	Διάσπαση και διαπλάτυνση γραμμών Mn I, Co I, Ba II, Eu II στα αστρικά φάσματα, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις αφθονίες (γραμμή 21 cm του H I στη μεσοαστρική ύλη)
Μοριακές περιστροφικές μεταβάσεις	10^{-4} -10^{-2}	χιλιοστομετρική και υπέρυθρη	Μετάβαση $J = 1 \rightarrow 0$ του CO στα 2,6 mm, σε περιαστρικά κελύφη αστέρων AGB
Λεπτή υφή (σύζευξη σπιν-τροχιάς)	10^{-3} -1	υποχιλιοστομετρική και υπέρυθρη	Διπλέτες στα αστρικά φάσματα: Na I D (589,0/589,6 nm), Ca II H και K (γραμμή [C II] στα 158 μ m στη μεσοαστρική ύλη)
Μοριακές περιστροφικές-δονητικές μεταβάσεις	10^{-1} -1	υπέρυθρη	Ζώνες του CO στα 2,3 μ m και του H ₂ O σε ψυχρούς γίγαντες και αστέρες M
Ηλεκτρονικές μεταβάσεις μορίων	1-5	εγγύς υπέρυθρη, ορατή, υπεριώδης	Ζώνες TiO και VO στους αστέρες M· ζώνη G του CH (430 nm), ζώνες CN και C ₂ σε αστέρες άνθρακα
Ηλεκτρονικές μεταβάσεις ατόμων και ιόντων	10^{-1} -10^4	υπέρυθρη έως ακτίνες X	Σειρές Balmer και Lyman του H· Ca II H και K, Mg II h και k· He I 587,6 nm και He II 468,6 nm σε αστέρες O· γραμμές Fe XVII, Fe XXV και O VI από στέμματα αστέρων (ακτίνες X και άπω υπεριώδεις)

Παράμετροι φασματικών γραμμών



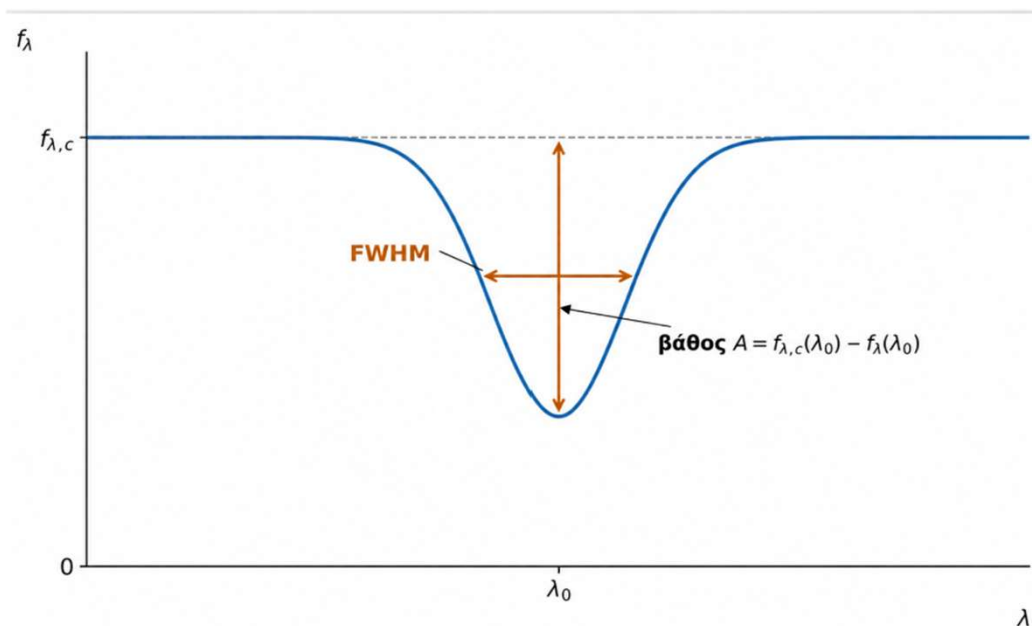
Ολοκληρωμένη ροή μιας γραμμής απορρόφησης $f_{\text{abs}} = \int_{\text{line}} [f_{\lambda,c}(\lambda) - f_\lambda(\lambda)] d\lambda$

Ολοκληρωμένη ροή μιας γραμμής εκπομπής $f_{\text{em}} = \int_{\text{line}} [f_\lambda(\lambda) - f_{\lambda,c}(\lambda)] d\lambda$

Εκτίμηση της ολοκληρωμένης περίσσειας ή του ολοκληρωμένου ελλείμματος ροής

Για Γκαουσιανό προφίλ γραμμής (μετά την αφαίρεση του συνεχούς), με ύψος ή βάθος A και τυπική απόκλιση σ_λ

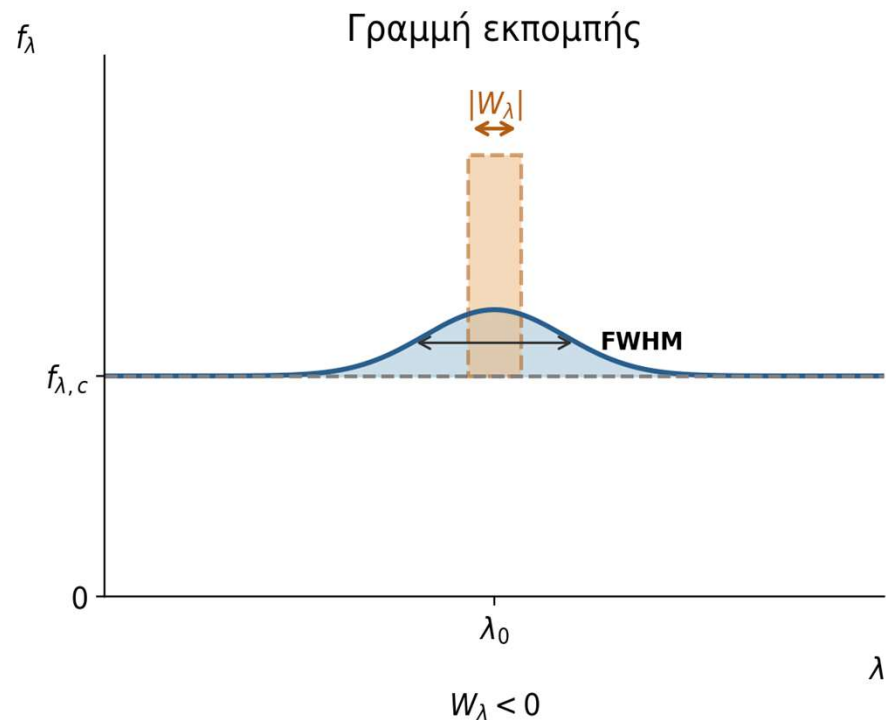
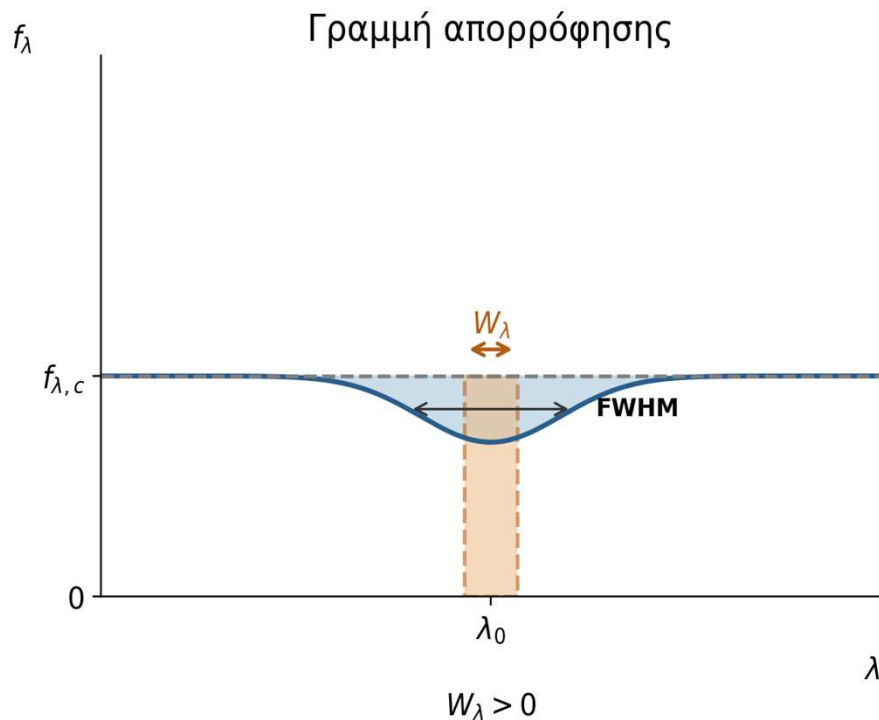
$$f = A\sqrt{2\pi} \sigma_\lambda = A\sqrt{\pi/(4\ln 2)} FWHM \simeq 1,064 A \times FWHM$$



Εκτίμηση της ολοκληρωμένης περίσσειας ή του ολοκληρωμένου ελλείμματος ροής

Ισοδύναμο πλάτος γραμμής – equivalent width

$$EW = \int_{\text{γραμμή}} \left[1 - \frac{f_{\lambda}}{f_{\lambda,c}} \right] d\lambda$$



Τι μαθαίνουμε από ένα αστρικό φάσμα (I): σύσταση και βασικές παράμετροι

Φυσική παράμετρος	Φασματικό διαγνωστικό
Ταυτοποίηση στοιχείων, ιόντων, μορίων	Θέση (μήκος κύματος) των γραμμών και των μοριακών ζωνών
Ακτινική ταχύτητα ως προς τον παρατηρητή, v_r	Μετατόπιση Doppler των γραμμών, $\Delta\lambda/\lambda = v_r/c$ (για $v_r \ll c$, μετά τη διόρθωση για την κίνηση της Γης)
Ενεργός θερμοκρασία T_e (φασματικός τύπος)	Σχετικές εντάσεις γραμμών από διαφορετικές στάθμες διέγερσης και στάδια ιονισμού· μορφή του συνεχούς· άλμα Balmer
Επιφανειακή βαρύτητα g , πίεση (τάξη λαμπρότητας)	Λόγοι γραμμών διαδοχικών σταδίων ιονισμού (εξίσωση Saha)· πτέρυγες ισχυρών γραμμών που διαπλατύνονται από την πίεση (π.χ. Balmer, Mg I b)
Χημική σύσταση (αφθονίες)	Ισοδύναμο πλάτος (καμπύλη αύξησης) ή σύνθεση του φάσματος, για δεδομένα T_e και g

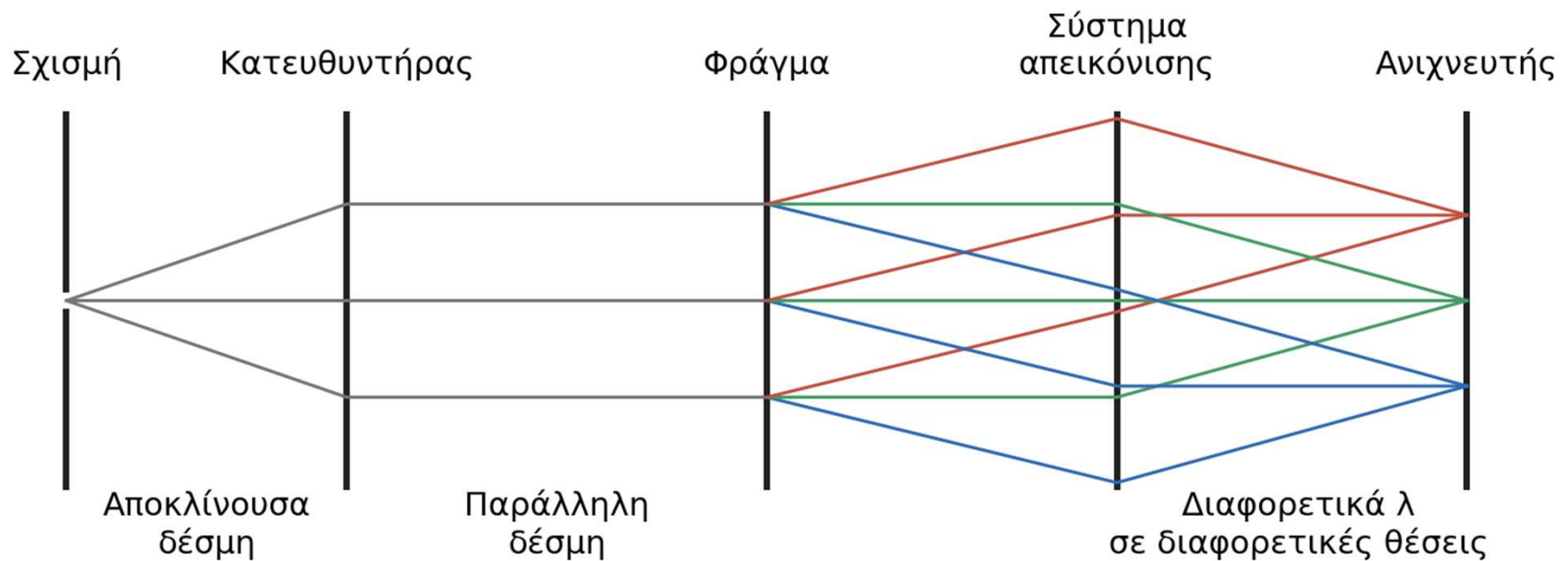
Τι μαθαίνουμε από ένα αστρικό φάσμα (II): κινήσεις, πεδία και δραστηριότητα

Φυσική παράμετρος	Φασματικό διαγνωστικό
Μικροσκοπικό πεδίο ταχυτήτων (θερμική κίνηση, μικροτύρβη)	Προφίλ γραμμής (πυρήνας Doppler)· ισοδύναμο πλάτος κορεσμένων γραμμών
Μακροσκοπικό πεδίο ταχυτήτων (περιστροφή $v \sin i$, μακροτύρβη, παλμοί)	Διαπλάτυνση και σχήμα του προφίλ· μεταβολές του προφίλ με τον χρόνο
Απώλεια μάζας, αστρικοί άνεμοι	Προφίλ P Cygni· γραμμές εκπομπής
Μαγνητικό πεδίο	Διαχωρισμός Zeeman, κυκλική και γραμμική πόλωση
Χρωμοσφαιρική δραστηριότητα	Εκπομπή στον πυρήνα γραμμών απορρόφησης (π.χ. Ca II H και K, H α)
Διπλά συστήματα	Περιοδικές μεταβολές της v_r · διπλές γραμμές (φασματοσκοπικά διπλοί)

Οι βασικές συνιστώσες ενός φασματογράφου

- Ένα μέσο να απομονώσουμε το φως από μία συγκεκριμένη πηγή στο εστιακό επίπεδο (συνήθως μία σχισμή)
- Ένας κατευθυντήρας (collimator) που κάνει παράλληλη τη δέσμη που προσπίπτει στο στοιχείο διασποράς.
- Το στοιχείο διασποράς π.χ. πρίσμα, φράγμα διάδοσης, ανακλαστικό φράγμα κλπ
- Κάμερα, που με ένα σύστημα φακών εστιάζει τις δέσμες που βγαίνουν από το στοιχείο διασποράς πάνω σε ένα ανιχνευτή

Απλουστευμένο οπτικό διάγραμμα με φράγμα διέλευσης



Τα χαρακτηριστικά ενός φασματογράφου που πρέπει να γνωρίζουμε όταν σχεδιάζουμε ένα πείραμα

- Διακριτική ικανότητα
- Περιοχή μηκών κύματος
- Απόδοση
- Δυνατότητα να παρατηρηθούν πολλά αντικείμενα ταυτόχρονα (MOS)
- Ύπαρξη χωρικής πληροφορίας (IFU)

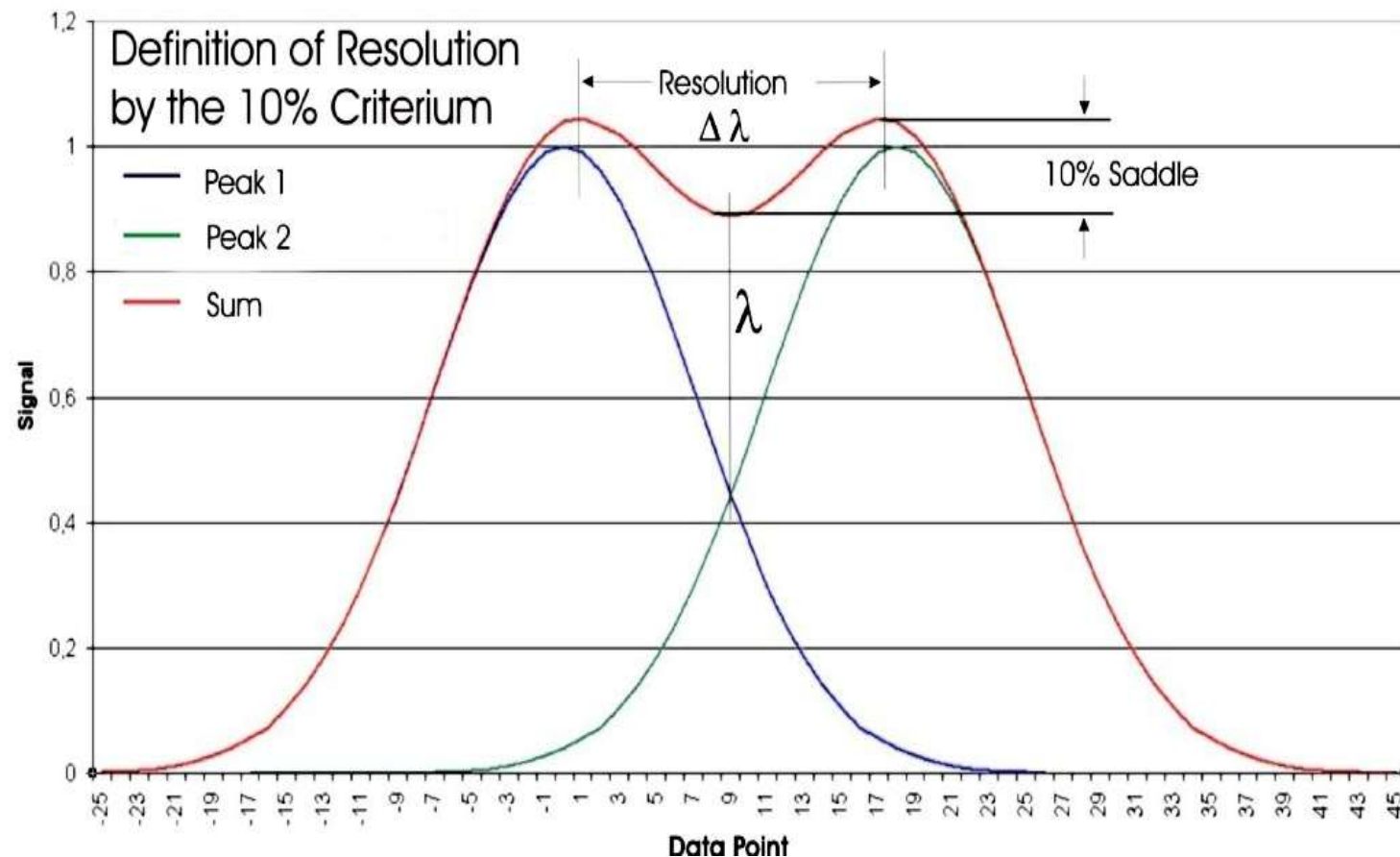
Διακριτική ικανότητα - Spectral resolution

Η μικρότερη δυνατή απόσταση ανάμεσα σε δύο φασματικές γραμμές που μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους.

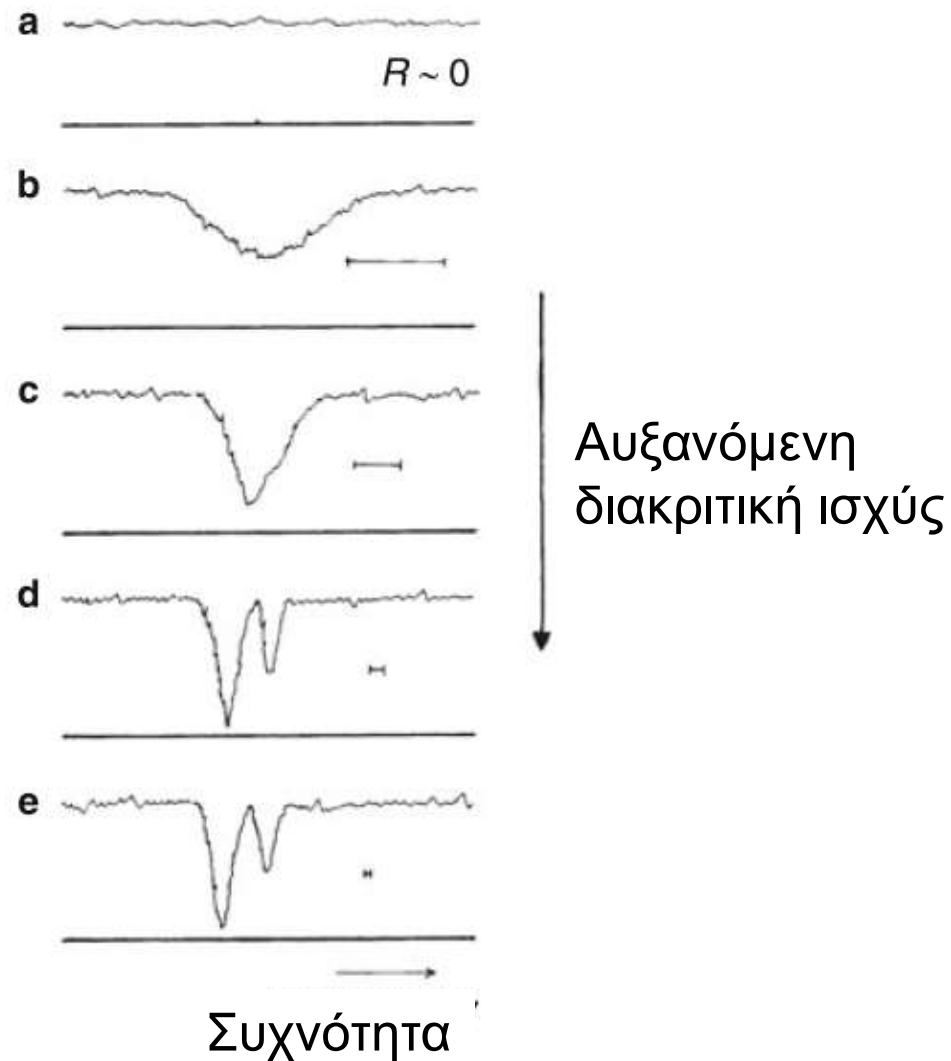
$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Διακριτική ισχύς
Resolving power RP

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$



Η επίδραση της διακριτικής ισχύος



Θερμική διαπλάτυνση φασματικών γραμμών

T (K)	$\Delta\lambda_{th}$ (Ang)	RP
3000	0.028	200.000
6000	0.04	140.000
10000	0.053	100.000
30000	0.091	60.000
100000	0.160	35.000

Διαπλάτυνση λόγω περιστροφής

Sp. T.	$V \sin i$ (km/s)	RP ¹
A0	150	2000
F0	80	3750
F5	25	12000
G0	3	100000
K	1	300000

¹ 2 pixel resolution, no other broadening

Περιεκτικότητα χημικών στοιχείων

Θερμά άστρα: $RP = 30.000$

Ψυχρά άστρα: $RP = 60.000 - 100.000$

- Διάκριση πολλών κοντινών φασματικών γραμμών
- Ακριβής καθορισμός του συνεχούς

Μετατοπίσεις γραμμών ισοτόπων

π.χ.:

Li^7 : 6707.76

Li^6 : 6707.92

R> 200.000

Προφίλ γραμμών (pulsations, spots, convection)

$$R=100.000 - 200.000$$

→ Απαιτείται η εύρεση αμυδρών παραμορφώσεων στα προφίλ των φασματικών γραμμών

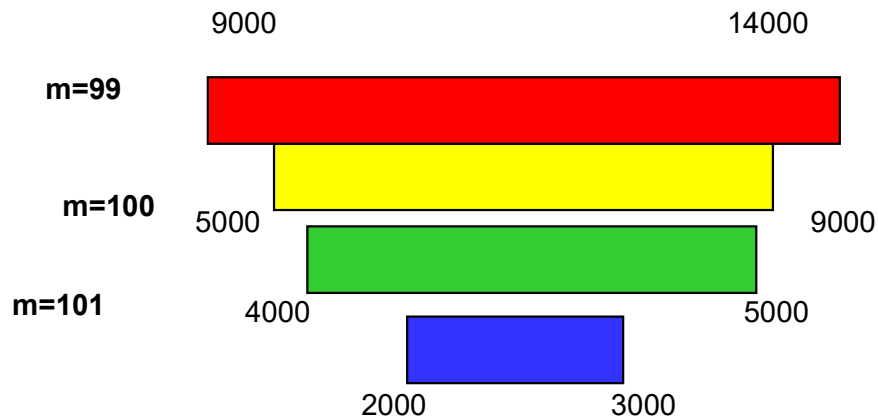
Τύπος Φασματο-γραφου	Αρχή λειτουργίας	Διακριτική ισχύς
Μακριάς σχισμής (long-slit)	Σχισμή στο εστιακό επίπεδο και φράγμα ή grism· χωρική πληροφορία κατά μήκος της σχισμής	$1\text{E}+2\text{-}1\text{E}+4$
Echelle	Φράγμα echelle σε υψηλές τάξεις συμβολής, με διασπορέα κάθετης διασποράς (cross-disperser)· οι τάξεις απεικονίζονται η μία κάτω από την άλλη	$3\text{E}+4\text{-}2\text{E}+5$
Πολλών αντικειμένων (multi-object, MOS)	Οπτικές ίνες ή μάσκα με πολλές σχισμές· εκατοντάδες έως χιλιάδες φάσματα ταυτόχρονα	$1\text{E}+3\text{-}2\text{E}+4$
Ολοκληρωμένου πεδίου (IFU)	Ο διαχωριστής εικόνας (ίνες, φακίδια ή κάτοπτρα) τεμαχίζει το πεδίο· ένα φάσμα για κάθε σημείο του πεδίου (κύβος δεδομένων x, y, λ)	$1\text{E}+3\text{-}4\text{E}+3$
Χωρίς σχισμή (slitless: αντικειμενικό πρίσμα, grism)	Το στοιχείο διασποράς μπροστά από όλο το πεδίο· φάσμα για κάθε πηγή του πεδίου	$1\text{E}+1\text{-}1\text{E}+3$
Φασματοπολωσίμετρο	Συνήθως φασματογράφος echelle με αναλυτή πόλωσης	$3\text{E}+4\text{-}1\text{E}+5$

Φασματογράφοι Echelle

- Blazed ανακλαστικό φράγμα (reflection grating)
 - Μικρός αριθμός «γραμμών» (grooves)
 - Γωνία blazing για χρήση σε μεγάλες τάξεις συμβολής (>50)
- Πρόβλημα: λόγω μικρού αριθμού γραμμών + μεγάλης τάξης περίθλασης, έχουμε πολύ μεγάλη επικάλυψη των φασμάτων γειτονικών τάξεων
- Λύση: cross-disperser

Φράγμα 79 mm^{-1}

Οι διαφορετικές τάξεις εμφανίζονται (σχηματικά) να διακρίνονται κατακόρυφα, για λόγους ευκρίνειας



Στη πραγματικότητα:



Λύση 1: φίλτρα συμβολής (interference filters)

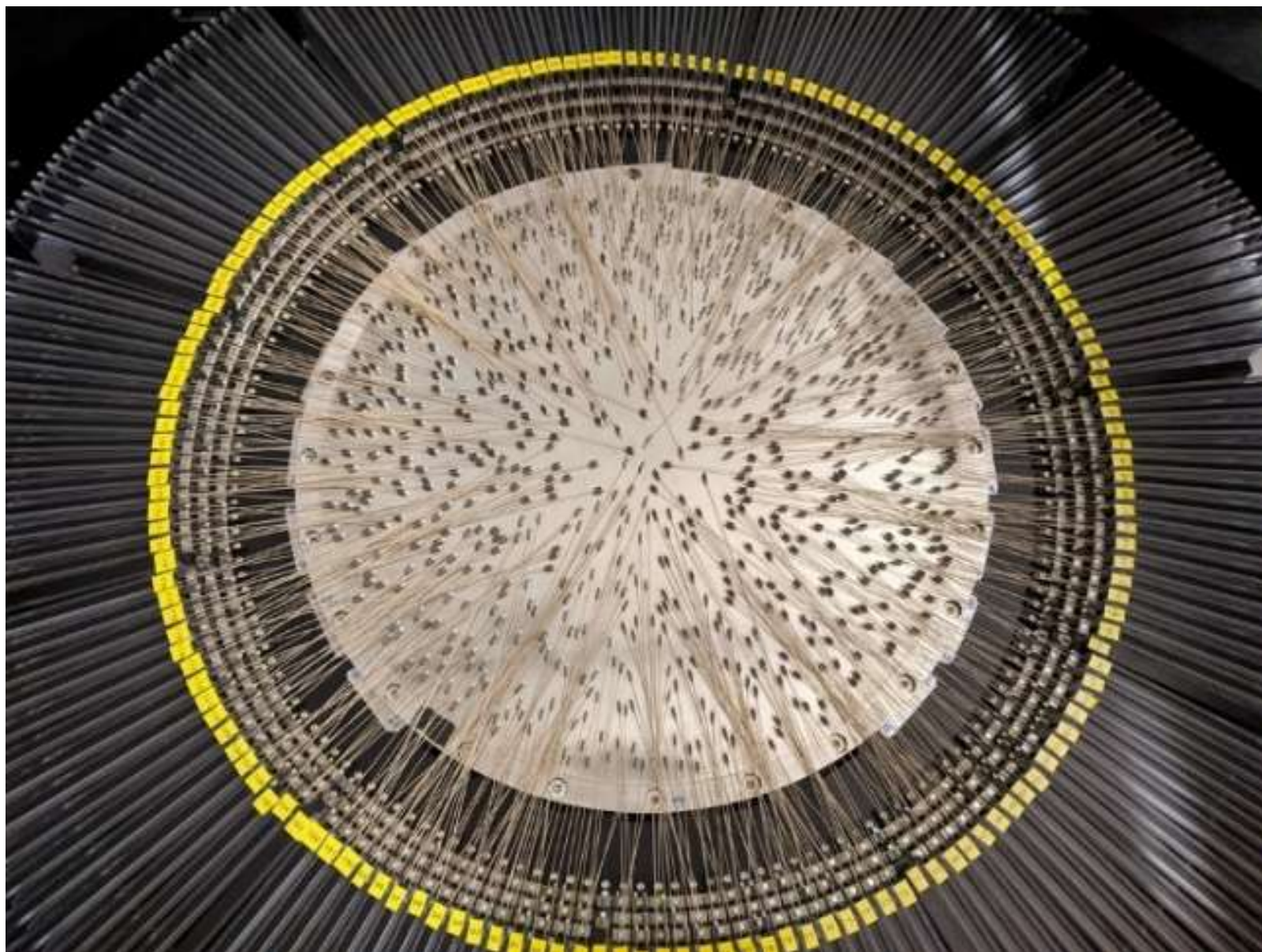
Λύση 2: cross-disperser → φασματογράφος echelle



Φασματογράφοι πολλαπλών αντικειμένων

Multi-object spectrographs

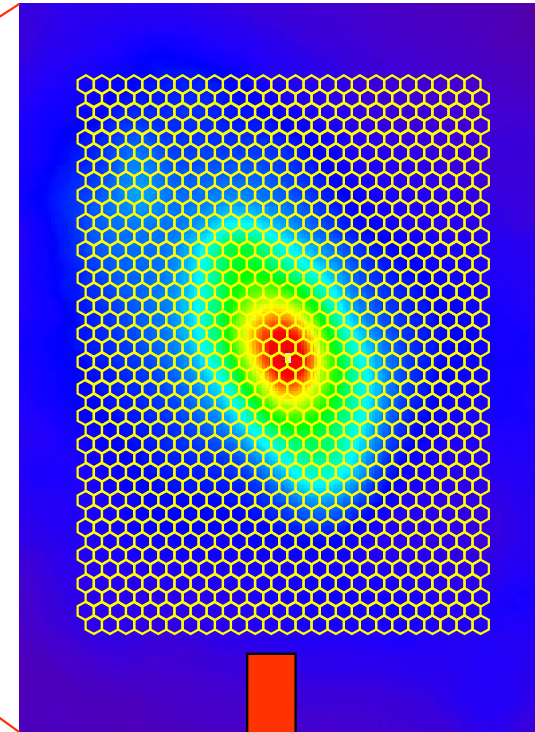
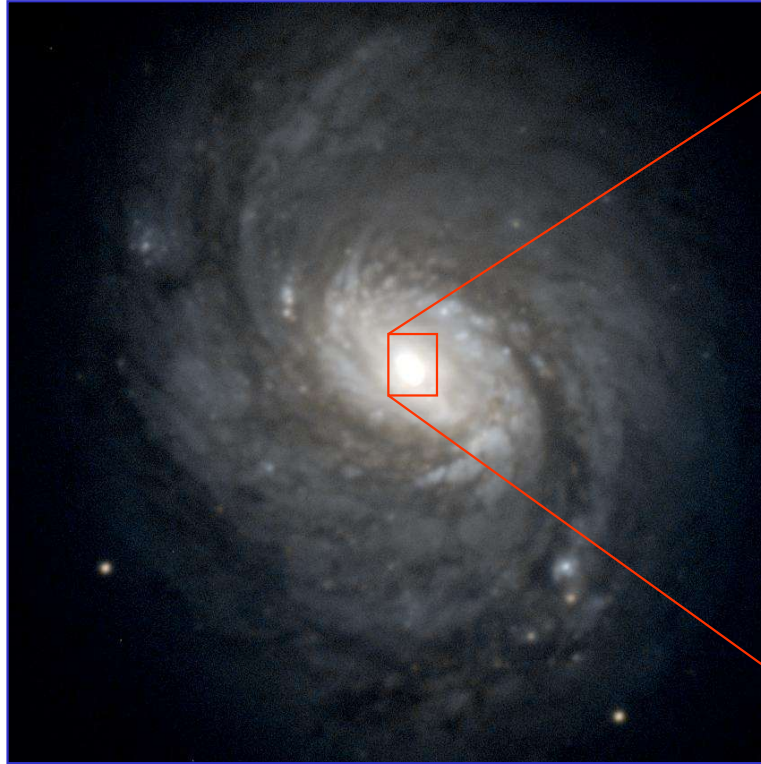
- ✓ Η φασματοσκοπία είναι «ακριβή» σε χρόνο παρατήρησης (και σε μέγεθος τηλεσκοπίου)
- ✓ Σημαντικό να μπορούμε να παρατηρήσουμε πολλά αντικείμενα ταυτόχρονα
- ✓ Αυτό μπορούμε να το κάνουμε
 - ✓ είτε απευθείας παίρνοντας φάσμα ολόκληρου του πεδίου
 - ✓ είτε χρησιμοποιώντας πολλαπλά «ανοίγματα» (apertures)
 - ✓ Φασματογράφοι πολλών σχισμών, γενικά μεγάλου format και χαμηλής ανάλυσης απεικονιστικοί φασματογράφοι, όπου οι σχισμές είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη
 - ✓ Φασματογράφοι πολλαπλών οπτικών ινών: Αναδιαμόρφωση του πεδίου έτσι ώστε τα αντικείμενα να τοποθετηθούν κατά μήκος μίας σχισμής



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.

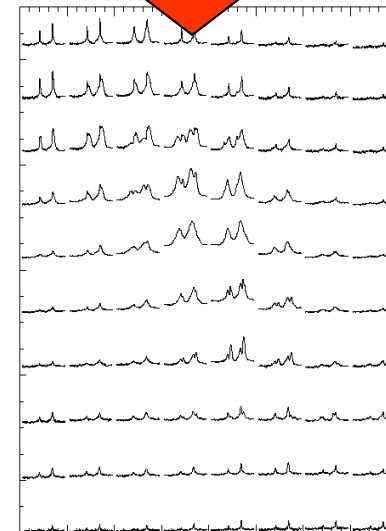
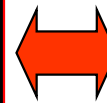
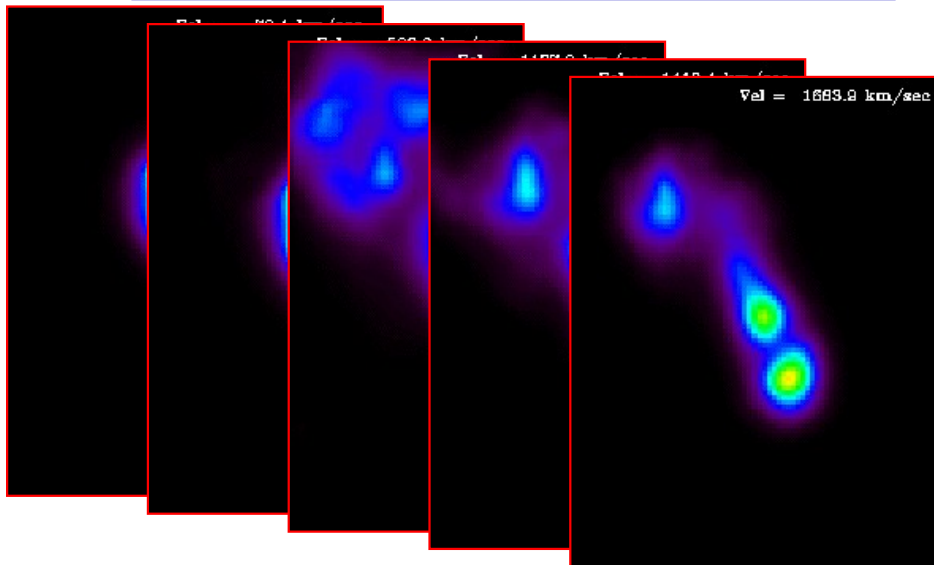
Φασματογράφοι ολοκληρωμένου πεδίου

Image taken
by
GMOS without
using the IFU



The IFU
records a
spectrum
for each
element

One
image
at each
velocity
from the
datacube
(only 4%
shown)



One spectrum
for each
element
(only 4%
shown)

GMOS integral field unit observes NGC1068

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.

Βασική ακολουθία φασματικών τύπων

O – B – A – F – G – K – M

Πίνακας 2.1 Κύρια χαρακτηριστικά φασματικών τύπων

<u>Τύπος</u>	T_{eff} (K)	<u>Ενδεικτικά φασματικά γνωρίσματα*</u>
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	<u>Balmer</u> με μέγιστη ισχύ κοντά στους A0–A2, <u>Ca II K</u> 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 <u>TiO</u> στους όψιμους K
M	$\lesssim 3\,700$	Ισχυρές μοριακές ζώνες, κυρίως <u>TiO</u> στο οπτικό, ισχυρή <u>Ca I 4227 Å</u>

* 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.

Πληθυσμοί σταθμών και ισχύς των γραμμών

- **Προϋπόθεση για απορρόφηση:** πληθυσμός στην κατώτερη στάθμη της μετάβασης και φωτόνιο με ενέργεια $h\nu = E_u - E_l$

- **Διέγερση (Boltzmann) σε ΤΘΙ**

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp \left[-\frac{E_u - E_l}{kT} \right]$$

- **Ιονισμός (Saha) σε ΤΘΙ**

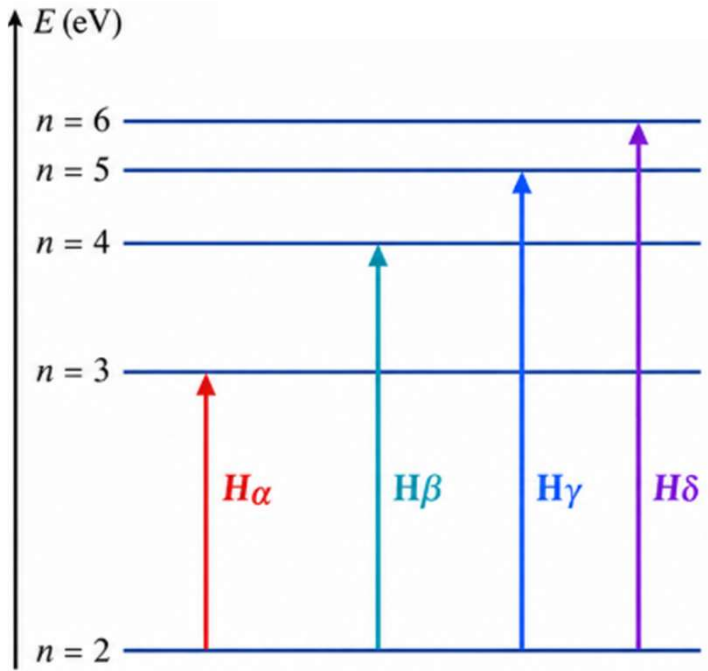
$$\frac{n_{r+1}n_e}{n_r} = 2 \frac{U_{r+1}(T)}{U_r(T)} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{\chi_r}{kT} \right]$$

όπου T είναι η θερμοκρασία στο στρώμα όπου σχηματίζεται η γραμμή

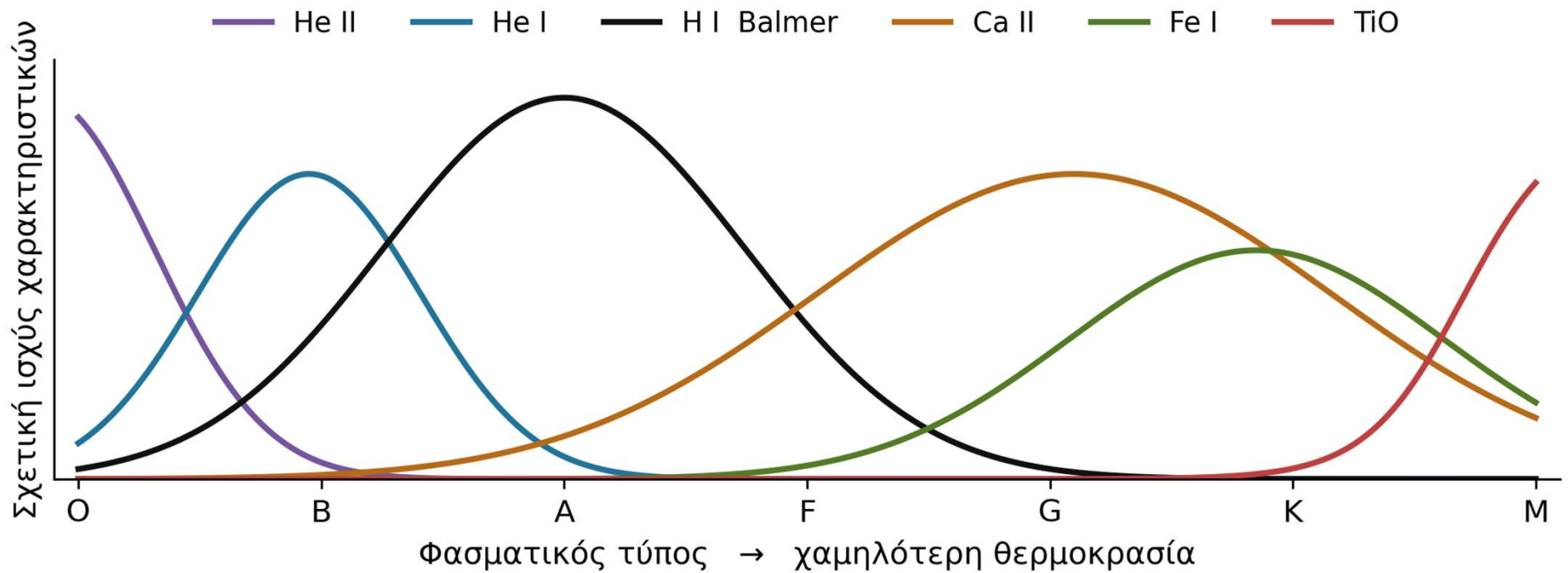
Παράδειγμα, γραμμές Balmer

(κατώτερη στάθμη $n = 2$ του H I)

- χαμηλή T : σχεδόν όλα τα άτομα βρίσκονται στο $n = 1 \rightarrow$ ασθενείς γραμμές,
- υψηλή T : το υδρογόνο ιονίζεται $\rightarrow$ ασθενείς γραμμές,
- μέγιστη ισχύς στους τύπους A0–A2, σε $T_{eff} \cong 10.000K$



Γραμμή	Μετάβαση	$\lambda \text{ (nm)}$
 $H\alpha$	$2 \rightarrow 3$	656,28
 $H\beta$	$2 \rightarrow 4$	486,13
 $H\gamma$	$2 \rightarrow 5$	434,05
 $H\delta$	$2 \rightarrow 6$	410,17



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

Η άσκηση σήμερα

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

Βήματα

- **Δεδομένα:** κατέβασμα και ανάγνωση των πρότυπων φασμάτων και οργάνωση σε λεξικό
- **Ακολουθία τύπων:** όλα τα φάσματα σε ένα διάγραμμα, κανονικοποιημένα. Παρατηρήστε την κλίση του συνεχούς, τις γραμμές Balmer, τις Ca II H και K, τη ζώνη G, τις ζώνες TiO και το άλμα Balmer ($3646 \text{ \AA}$).
- **Απομόνωση της H α** ($6563 \text{ \AA}$, αστέρας G0): περιοχή $\pm \Delta\lambda$ που περιλαμβάνει τις πτέρυγες και καθαρό συνεχές.
- **Συνεχές:** ευθεία μέσα από δύο παράθυρα, ένα σε κάθε πλευρά της γραμμής, χωρίς άλλες γραμμές μέσα τους.
- **Μετρήσεις:**
 - ροή της γραμμής, λόγος σήματος προς θόρυβο, σοδύναμο πλάτος
 - EW της H α σαν συναρτηση του φασματικού τύπου
 - Σύγκριση με μέλαν σώμα κατάλληλης θερμοκρασίας

Εργασία για το σπίτι

- 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, $n = 3 \rightarrow 7$, $\lambda \approx 10049 \text{ \AA}$).
- Θα χρησιμοποιήσετε τον ίδιο κώδικα (θα αλλάξετε το κέντρο της γραμμής και τα όρια του συνεχούς) για να υπολογίσετε τα αντίστοιχα ισοδύναμα πλάτη
- Θα εκτιμήσετε τη θερμοκρασία διέγερσης από τον ν. Boltzmann (δείτε λεπτομερείς οδηγίες)

Εργασία για το σπίτι

1. το κύριο αποτέλεσμα της άσκησης που εκτελέσατε στο εργαστήριο (δηλ. ένα διάγραμμα με τη μεταβολή του EW της γραμμής H α με το φασματικό τύπο και τη σύντομη ερμηνεία του)
2. (α) τις μετρήσεις του W_λ για τις γραμμές H δ και Pa δ , και τις αβεβαιότητές τους
(β) δυο διαγράμματα (snapshots) που να δείχνουν τη κάθε μια από τις γραμμές και το συνεχές που υποθέσατε
(γ) τον υπολογισμό της θερμοκρασίας διέγερσης
 - ✓ πίνακα τις τιμές των διαφόρων μεγεθών που χρησιμοποίησατε για τους υπολογισμούς σας,
 - ✓ τις βασικές μαθηματικές σχέσεις
 - ✓ ένα σύντομο σχολιασμό του αποτελέσματος.
 - ✓ Δεν χρειάζεται να προσθέσετε θεωρητική εισαγωγή.