

Εργαστήριο Κατεύθυνσης Αστροφυσικής

Αστρονομική φασματοσκοπία

Θεωρητική εισαγωγή

Φασματοσκοπία

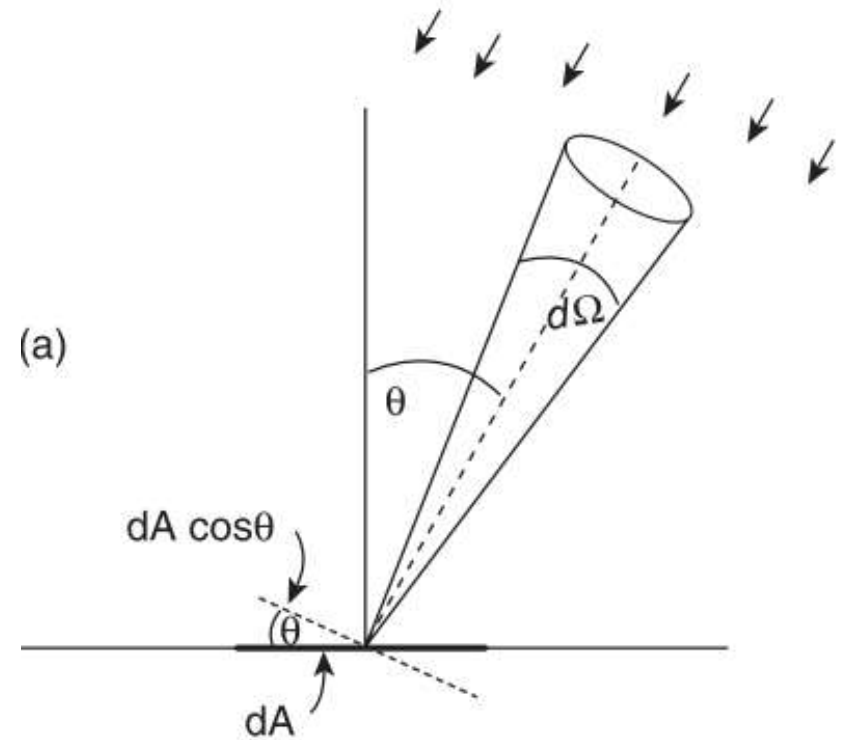
- Φάσμα = η ροή (ή η ένταση) ακτινοβολίας σαν συνάρτηση του μήκους κύματος (ή της συχνότητας, ή της ενέργειας)
- Στη φωτομετρία ολοκληρώνουμε σε μία περιοχή μηκών κύματος (που αντιστοιχεί στο φίλτρο που χρησιμοποιούμε) ενώ στη φασματοσκοπία έχουμε «συνεχή» δειγματοληψία ($\Delta\lambda \ll \lambda$) σε μήκος κύματος ή συχνότητα
- Παρόλο που η δειγματοληψία είναι συνεχής, η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το σχεδιασμό του φασματογράφου.
- Ένα «κλασικό» φάσμα δεν εμπεριέχει άμεση χωρική πληροφορία. Αρκετοί φασματογράφοι επιτρέπουν την ανάκτηση χωρικής πληροφορίας, είτε σε μία διάσταση είτε σε δύο διαστάσεις (integral field units)

Αστροφυσικά φάσματα

Η ακτινοβολία μιας πηγής χαρακτηρίζεται από την **ειδική ένταση ακτινοβολίας** $I_\nu(\theta)$, στη συχνότητα ν και σε γωνία παρατήρησης θ (μονάδες $\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$). Η κατάσταση πόλωσης της ακτινοβολίας (γραμμική, κυκλική, ελλειπτική) επίσης χαρακτηρίζει την πηγή (τις διαδικασίες παραγωγής της ακτινοβολίας)

Το φάσμα που εκπέμπει μία πηγή δίνει την εξάρτηση της ειδικής έντασης από τη συχνότητα.

Η ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον παρατηρητή είναι η συνισταμένη ενός μεγάλου αριθμού αλληλεπιδράσεων μέσα στην ίδια την πηγή, αλλά και κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης έξω από την πηγή μέχρι τον παρατηρητή (περιαστρική, μεσοαστρική, μεσογαλαξιακή ύλη)



$$dE = I_\nu \cos \theta d\nu d\Omega dA dt$$

- Είδαμε στο μάθημα της Φυσικής των αστέρων ότι οι αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας-ύλης συμπεριλαμβάνουν εκπομπή, απορρόφηση και ελαστική ή ανελαστική σκέδαση, ανάλογα με τα μέσα που συναντά η ακτινοβολία:
 - τη φυσική τους κατάσταση (στερεό, αέριο, πλάσμα...)
 - τις φυσικές παραμέτρους (θερμοκρασία, πίεση, πεδίο ταχυτήτων...)
 - τα τοπικά πεδία (μαγνητικά, βαρυτικά...)
- Το φάσμα που φτάνει στη Γη είναι το αποτέλεσμα περίπλοκων διαδικασιών διάδοσης (radiative transfer)

- Συζητήσαμε στη Φυσική των αστερών ότι η ειδική ένταση προκύπτει από την επίλυση της **εξίσωσης διάδοσης ακτινοβολίας**, που περιλαμβάνει την συνάρτηση πηγής. Η συνάρτηση πηγής είναι το ζητούμενο.
- Δηλ. από τις παρατηρήσεις πρέπει να αντιστρέψουμε τη διαδικασία και να βγάλουμε συμπέρασμα για τη συνάρτηση πηγής → θεμελιώδες πρόβλημα της αστροφυσικής
- Όσο ικανοποιούνται οι συνθήκες για τοπική θερμοδυναμική ισορροπία (**LTE**) μπορούμε να υποθέσουμε ότι η συνάρτηση πηγής ισούται με τη συνάρτηση Planck $S_\lambda = B_\lambda$
- Η μεγάλη ποικιλία των παρατηρούμενων φασμάτων αντικατοπτρίζει την πολυπλοκότητα των διαδικασιών διάδοσης της ακτινοβολίας σε διαφορετικά μέσα, όπως τις αστρικές ατμόσφαιρες, το μεσοαστρικό αέριο, τα μοριακά νέφη τις ατμόσφαιρες πλανητών, γαλαξίες, AGN κλπ

(Υπενθύμιση)

- Ένα φάσμα λέγεται **συνεχές** όταν η συνάρτηση $I(\nu)$ μεταβάλλεται αργά με τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος)
π.χ. ακτινοβολία μέλανος σώματος, ακτινοβολία σύγχροτρον
- Ένα γράμμα λέγεται **γραμμικό** όταν εμφανίζει γραμμές εκπομπής ή απορρόφησης, δηλ. το $I(\nu)$ μεταβάλλεται γρήγορα (απότομα) με το ν σε μία στενή περιοχή συχνοτήτων (ή μήκους κύματος) $\Delta\nu \ll \nu$.
π.χ. φάσμα απορρόφησης αστέρων, φάσματα εκπομπής νεφελωμάτων

Continuous Spectrum



Emission Lines



Absorption Lines



Οι κυριότερες φασματικές μεταβάσεις και οι αντίστοιχες συχνότητες

- Η ποσοτική περιγραφή υλικών συστημάτων αποδίδει διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις/ενεργειακά επίπεδα, E_i στα συστήματα αυτά $\rightarrow$ χαρακτηριστικές μεταβάσεις με συχνότητα

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

- Ανάλογα με τη πολυπλοκότητα του συστήματος, χρησιμοποιούμε ημι-κλασική ή κβαντομηχανική θεώρηση για να υπολογίσουμε τη πιθανότητα να συμβεί η συγκεκριμένη μετάβαση και να υπολογίσουμε την ενεργό διατομή της αλληλεπίδρασης του συστήματος με την ακτινοβολία..
- Αν η διάδοση ακτινοβολίας είναι αρκετά «απλή» τότε το φάσμα $I(\nu)$ που παίρνουμε κυριαρχείται τουλάχιστον σε μια περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων από μία τοπική συνάρτηση πηγής που περιγράφει συγκεκριμένες μεταβάσεις.

Παραδείγματα διακριτών μεταβάσεων

Μετάβαση	Ενέργεια (eV)	Φασματική περιοχή	Παράδειγμα
Hyperfine structure	10^{-5}	Radiofrequencies	21 cm hydrogen line
Spin-orbit coupling	10^{-5}	Radiofrequencies	1667 MHz transitions of OH molecule
Molecular rotation	10^{-2} – 10^{-4}	Millimetre and infrared	1–0 transition of CO molecule at 2.6 mm
Molecular rotation–vibration	1 – 10^{-1}	Infrared	H ₂ lines near 2 μm
Atomic fine structure	1 – 10^{-3}	Infrared	Ne II line at 12.8 μm
Electronic transitions of atoms, molecules and ions	10^{-2} – 10	Ultraviolet, visible, infrared	Lyman, Balmer series, etc., of H, resonance lines of C I, He I, and K, L shell electron lines (Fe XV, O VI)
Nuclear transitions	$> 10^4$	X and γ rays	¹² C line at 15.11 keV
Annihilations	$\gtrsim 10^4$	γ rays	Positronium line at 511 keV

Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός φάσματος

Ένα φάσμα περιλαμβάνει μία συνεχή συνιστώσα I_c , που μεταβάλλεται αργά με το ν και το γραμμικό φάσμα απορρόφησης ή εκπομπής που υπερτίθεται στη συνεχή συνιστώσα.

➤ Το προφίλ των γραμμών

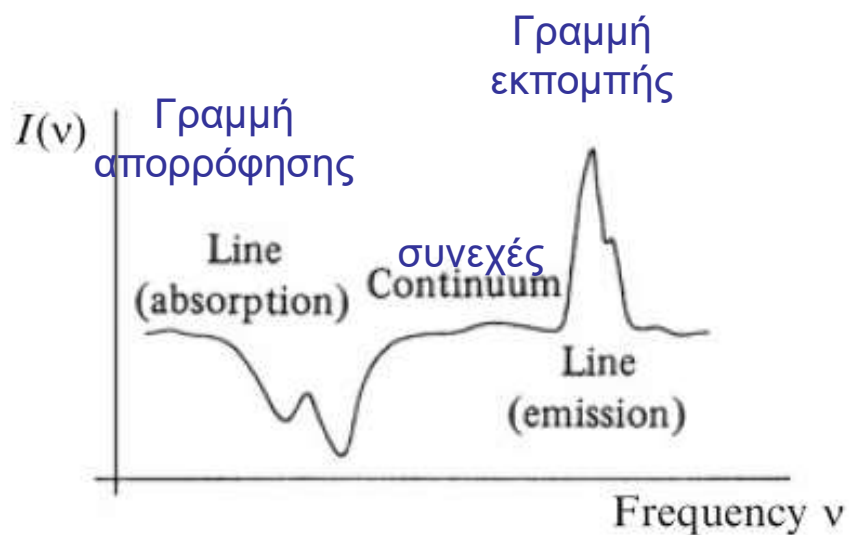
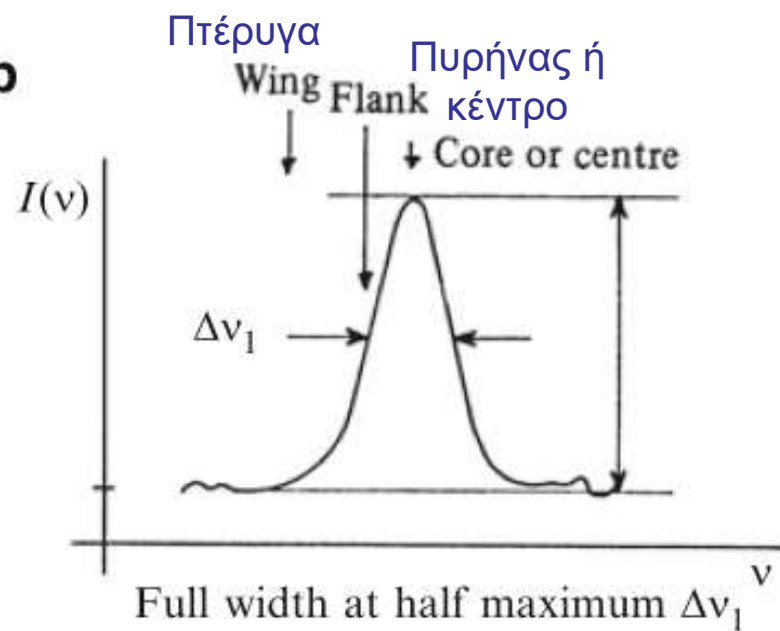
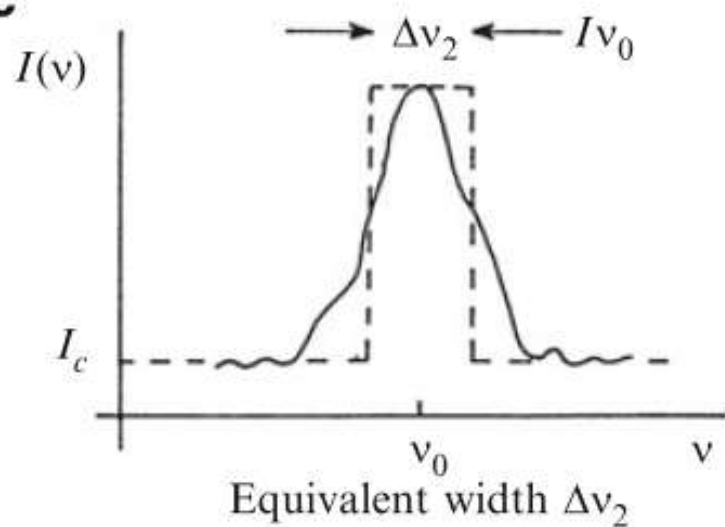
Υπάρχουν διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τη απλουστευμένη περιγραφή περίπλοκων προφίλ γραμμών:

- το συνολικό πλάτος στο μισό του μεγίστου (full width at half maximum)
- το ισοδύναμο πλάτος (equivalent width),
- η σχετική ένταση (relative intensity)

Αυτές οι παράμετροι είναι χρήσιμες όταν το προφίλ είναι σχετικά απλό.

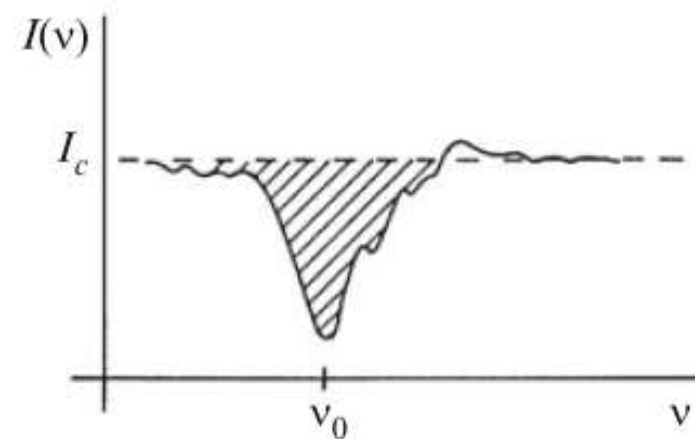
Άλλοι χρήσιμοι όροι: ο πυρήνας (core) ή το κέντρο της γραμμής, τα πτερύγια (wings) μιας γραμμής

- **Ένταση γραμμής (line intensity)**. Η συνολική ισχύς που περιλαμβάνεται στη γραμμή, αφαιρώντας τη συμμετοχή από το συνεχές. Η σχετική ένταση συγκρίνει τη γραμμή με το συνεχές.
- **Θέση γραμμής (line position)** Δίνει τη θέση του μεγίστου του $I(\nu)$ για γραμμή εκπομπής και του ελάχιστου για γραμμή απορρόφησης (σε μονάδες συχνότητας, μήκους κύματος, κυματάριθμου, ή ενέργειας)

a**b****c**

$$\int (I_{\nu} - I_c) d\nu = (I_{\nu_0} - I_c) \Delta\nu_2$$

Ισοδύναμο πλάτος

d

$$\text{Intensity} \int |I(\nu) - I_c| d\nu$$

$$\text{Relative intensity} \frac{|I(\nu_0) - I_c|}{I_c}$$

Σχετική ένταση

1. Θέση (του κέντρου) της γραμμής

- Η θέση ν_0 της γραμμής καθορίζεται από τη μετάβαση που τη παρήγαγε, και συνεπώς (λαμβάνοντας υπόψη και την ακρίβεια με την οποία μετρήθηκε η συχνότητα) οδηγεί στην ταυτοποίηση ενός δεδομένου στοιχείου (ή ιόντος, ή μορίου)
- Ωστόσο η θέση της γραμμής μπορεί να μεταβληθεί από την εκπομπή μέχρι τη λήψη της ακτινοβολίας.

Πιθανά αίτια μιας τέτοιας αλλαγής:

- **Φαινόμενο Doppler**

$$\Delta\nu = \begin{cases} \nu_0 \frac{v_{\parallel}}{c}, & \text{Μη σχετικιστικό } (v \ll c), \\ \nu_0 \left[1 - \frac{(1 - v_{\parallel}^2/c^2)^{1/2}}{1 - v_{\parallel}/c} \right], & \text{ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΟ} \end{cases}$$

όπου $v_{\parallel}$ είναι η προβολή της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής παρατήρησης (**ακτινική ταχύτητα**)

Θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του τις ακόλουθες διορθώσεις στη μετρούμενη προβολή της ταχύτητας:

- ✓ Ιδιοπεριστροφή της Γης
- ✓ Περιστροφή του κέντρου της γης γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος Γης-Σελήνης
- ✓ Κίνηση του ΚΜ Γης-Σελήνης γύρω από το κέντρο του ήλιου
- ✓ Κίνηση του ήλιου σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς (π.χ. το Local Standard of Rest)
- ✓ Το LSR είναι μία εκτίμηση της μέσης κίνησης των αστέρων στη γειτονιά του ήλιου. Ο ήλιος έχει μία μικρή ίδια κίνηση σε σχέση με το LSR, οπότε αν θέλουμε να ανάγουμε τη ταχύτητα στο σύστημα αυτό, πρέπει να αφαιρέσουμε την ίδια κίνηση του ήλιου ως προς το LSR από την ηλιοκεντρική ταχύτητα.
- ✓ $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (8.63 \pm 0.64, 4.76 \pm 0.49, 7.26 \pm 0.36) \text{ kms}^{-1}$. (Gaia DR2)

➤ Φαινόμενο Zeeman

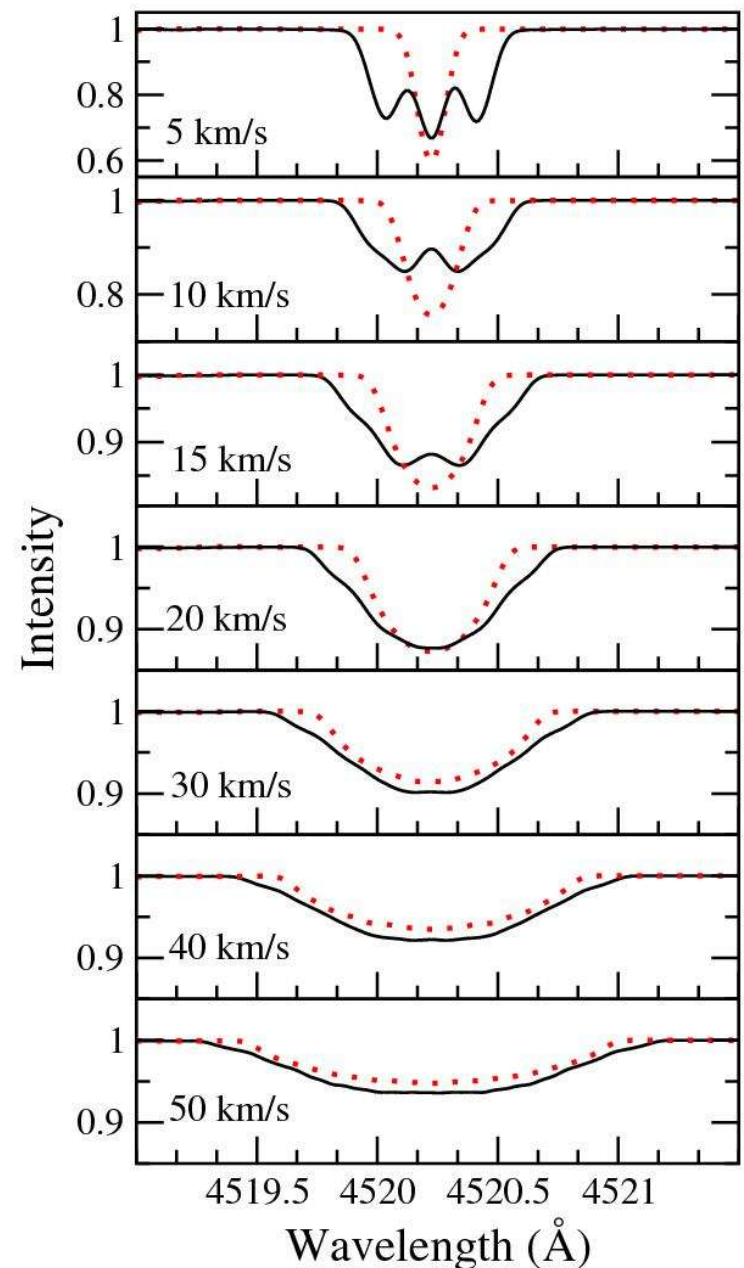
Όταν η γραμμή στη συχνότητα ν_0 παράγεται με παρουσία μαγνητικού πεδίου, εμφανίζονται τα υποεπίπεδα Zeeman και αντίστοιχες συστάδες γραμμών με διαφορετικές συχνότητες και πολώσεις.

Π.χ. Για το ομαλό φαινόμενο Zeeman, εμφανίζονται 3 συνιστώσες, ν_0 , και

$$\Delta\nu = \frac{eB}{4\pi m} = 1.4 \times 10^{10} B$$

(B in Tesla)

- ➔ Μέτρηση μαγνητικού πεδίου
- ➔ Χρειάζεται πολύ μεγάλη ανάλυση



Η γραμμή Fe II 4520 σε μαγνητικό πεδίο 15 kG (μαύρες γραμμές) και χωρίς μαγνητικό πεδίο (κόκκινες διακ. γραμ.) για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας περιστροφής $v \sin i$. Bailey 2014 A&A 568, A38

➤ **Einstein Effect (βαρυτική ερυθρομετατόπιση)**

Όταν ένα φωτόνιο συχνότητας ν_0 φεύγει από την επιφάνεια ενός αντικειμένου μεγάλης μάζας, η συχνότητά του μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu} = \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1/2} - 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta\nu}{\nu} \sim \frac{GM}{Rc^2}$$

Αυτή η διόρθωση είναι πολύ μικρή αλλά μετρήσιμη στον ήλιο.

Γίνεται πιο σημαντική σε συμπαγή αντικείμενα όπως οι λευκοί νάνοι και οι αστέρες νετρονίων.

2. Ένταση γραμμής - Line intensity

- Το ολοκλήρωμα της έντασης για όλη τη γραμμή δίνει τη συνολική αντίστοιχη απορρόφηση ή εκπομπή.
- Εξαρτάται από τον αριθμό N των ατόμων, ιόντων, μορίων, κόκκων σκόνης που συμμετέχουν στη συγκεκριμένη μετάβαση ν_0

$$\int_{\text{line}} [I(\nu) - I_c] d\nu = f(N)$$

- Η εξάρτηση αυτή είναι ~γραμμική αλλά για αρκετά μεγάλα N επέρχεται κορεσμός.

3. Προφίλ γραμμής - Line profile

The profile $\phi(\nu)$ is a function describing as closely as possible the **shape of the line**, and normalized to unity:

$$\int \phi(\nu) d\nu = 1$$

The profile of a line reflects exactly **the local physical conditions** which produced it.

Doppler broadening When the atoms, ions, or molecules undergoing transitions are in **Maxwellian thermal** agitation, at some **temperature T**, the **line profile** is primarily determined by the Doppler effect due to that agitation. It is given by a Gaussian function

$$\phi(\nu) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\sigma^2} \right]$$

where the frequency dispersion σ is given by

$$\sigma = \frac{\nu_0}{c\sqrt{2}} \left(\frac{2kT}{m} + V^2 \right)^{1/2}$$

where V the most likely value of the isotropic microturbulence speed

Lines dominated by collisions – Lorentz profile

At sufficiently high pressures, collisions between those particles undergoing transitions and other particles of the medium lead to a further damping effect, which broadens the line:

$$\phi(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_L}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L/2)^2}$$

where $\Delta\nu_L = 1/\pi\tau$ and τ is the mean time between collisions, directly related to the physical conditions described by agitation speed and collision cross-section.

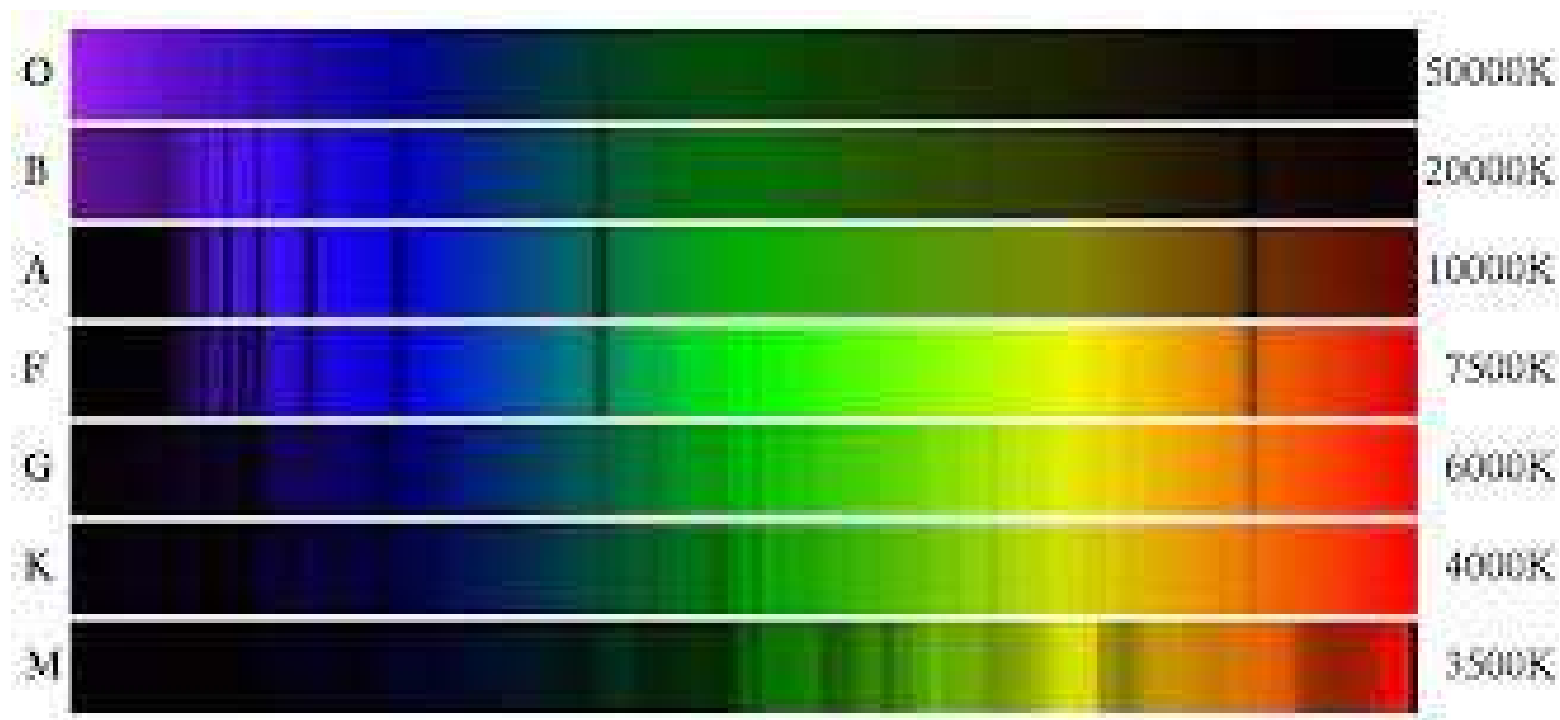
General profile (Doppler plus collisions) Voigt profile

Physical and spectroscopic parameters

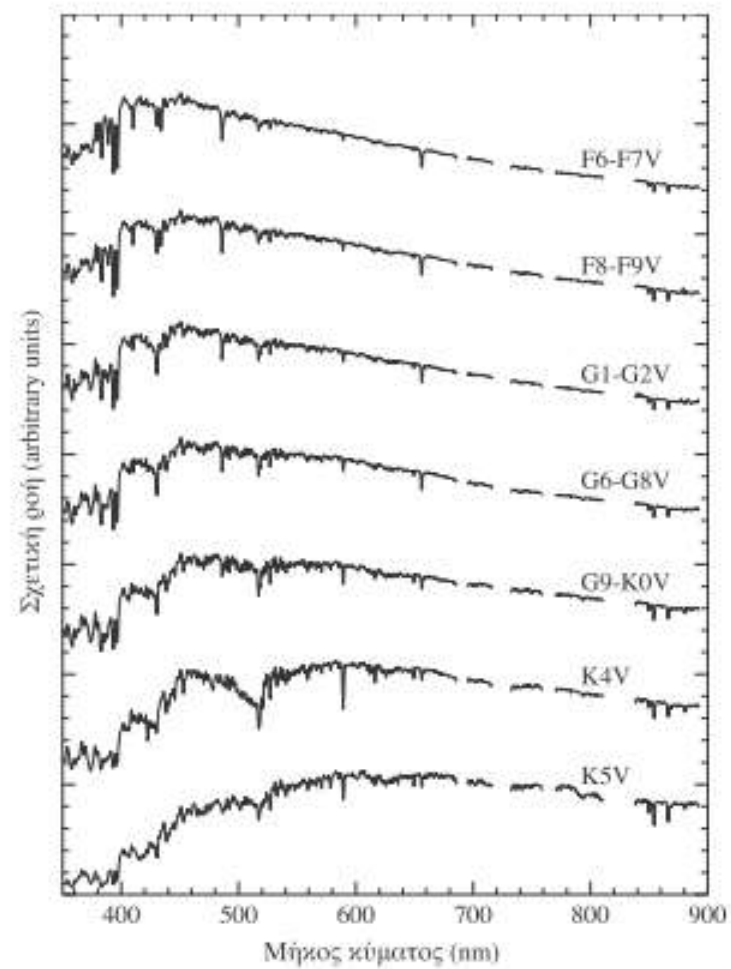
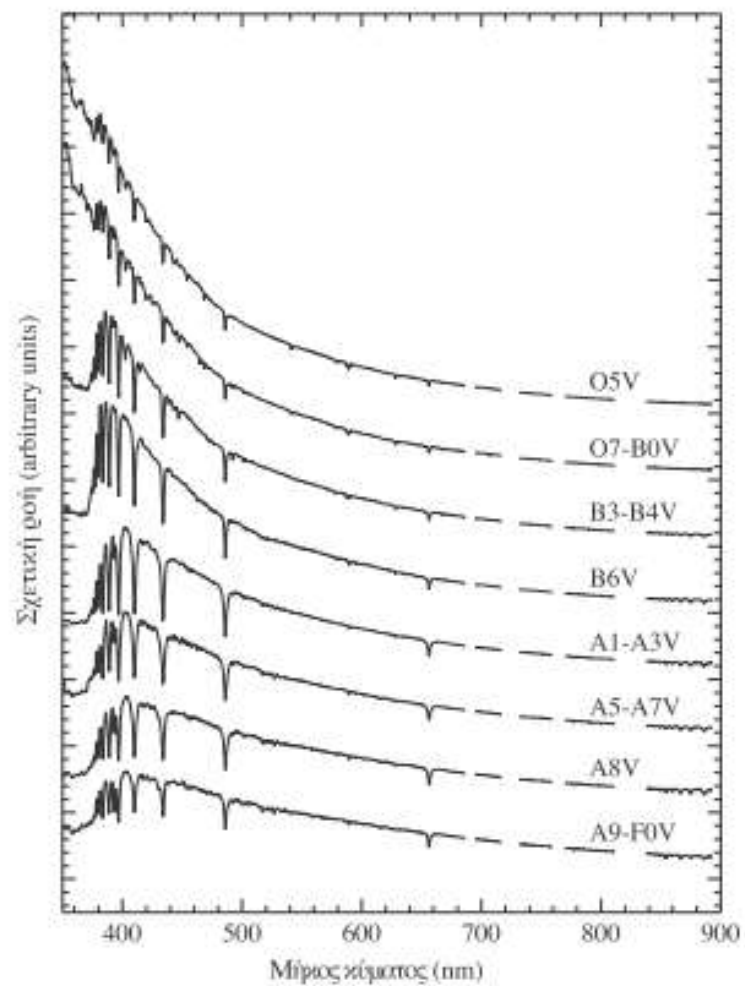
Type of element	Line position
Abundance	Intensity or equivalent width
Macroscopic velocity field	Position and profile
Temperature, pressure, gravity	Intensity
Microscopic velocity field	Profile
Magnetic field	Zeeman components, polarisation

Μεγάλη ποικιλία αστροφυσικών φασμάτων

1. Αστρικά Φάσματα – Φασματικοί τύποι



https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/spectra_a_astro_types.html



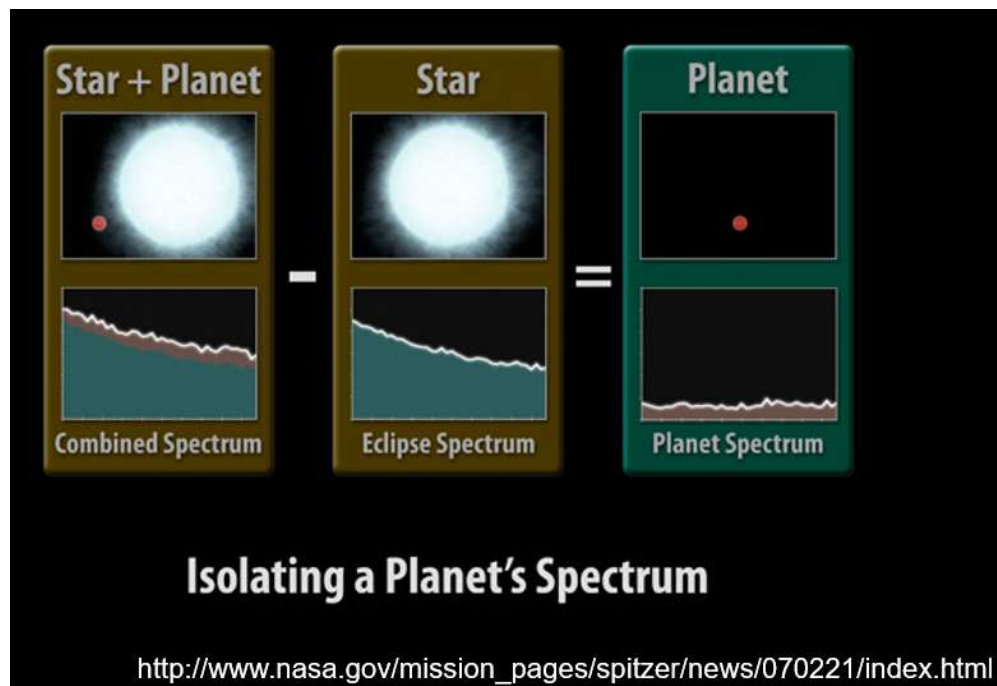
Σχήματα από Carroll και Ostlie

Αστρικά φάσματα

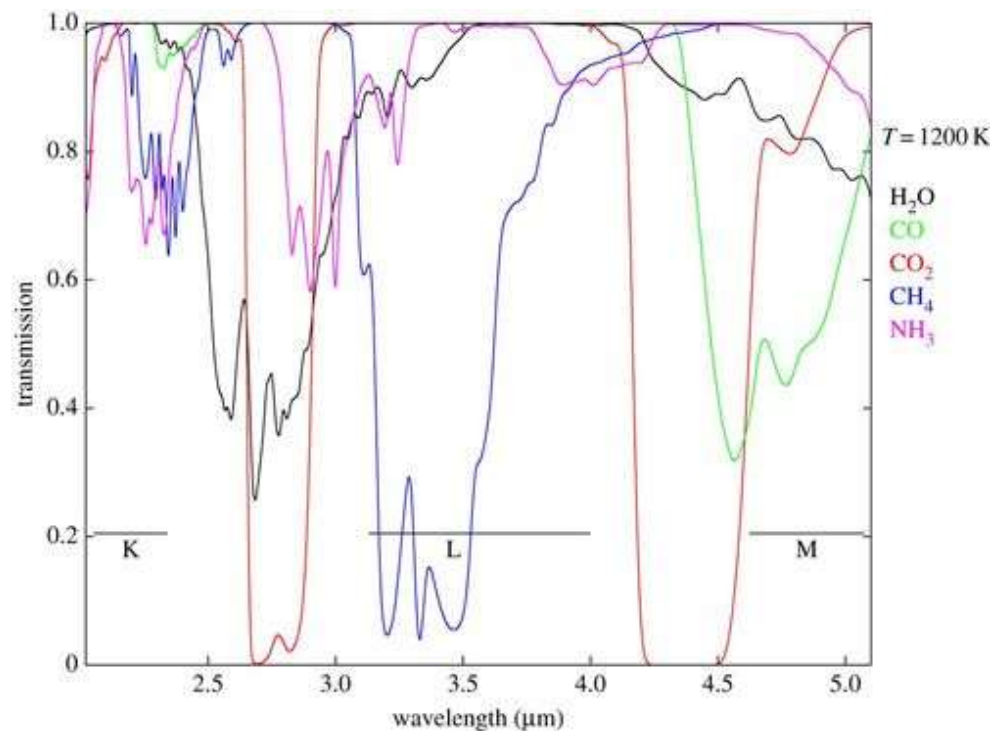
- Ένα από τα πρώιμα αποτελέσματα της παρατηρησιακής αστροφυσικής/αστρονομίας, ήταν το ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων της αστρικής επιφάνειας (π.χ. επιφανειακή θερμοκρασία) και της έντασης συγκεκριμένων γραμμών απορρόφησης στα αστρικά φάσματα.
- Ήδη από το 1863 ο Ιησουίτης αστρονόμος Angelo Secchi ταξινόμησε τα άστρα σε 4 κατηγορίες ανάλογα με κάποιες έντονες γραμμές απορρόφησης στα φάσματά τους.
- 2-3 δεκαετίες αργότερα αναπτύχθηκε το σύστημα ταξινόμησης Harvard (Pickering, Fleming, Maury) που χαρακτήριζε τα φάσματα με κεφαλαία γράμματα βάσει της έντασης των γραμμών απορρόφησης του υδρογόνου, ξεκινώντας με το γράμμα A για τις πιο ευρείες γραμμές.
- Το σύστημα αυτό τελειοποιήθηκε και έφτασε στη σημερινή του μορφή από την Annie Jump Cannon που αναδιάρθρωσε την ακολουθία των φασμάτων τοποθετώντας τους τύπους O και B πριν τους τύπους A, προσέθεσε δεκαδικές υποδιαιρέσεις (π.χ. A0–A9) και συγχώνευσε πολλές από τις τάξεις.
- Με αυτές τις αλλαγές, το σύστημα κατηγοριοποίησης του Harvard των «O B A F G K M» μετατράπηκε σε ακολουθία θερμοκρασιών, η οποία εκτείνεται από τα πιο θερμά μπλε άστρα τύπου O έως τα πιο ψυχρά κόκκινα άστρα τύπου M.
- Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ φασματικών χαρακτηριστικών και θερμοκρασίας (χρώματος, επήλθε με την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας, και βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε συνδυασμό των νόμων Boltzmann και Saha.

- Τα άστρα που βρίσκονται πιο κοντά στην αρχή αυτής της ακολουθίας αναφέρονται ως **προγενέστερου τύπου άστρα**, ενώ αυτά που είναι προς το τέλος, **μεταγενέστερου τύπου** (οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται και για τους υπο-τύπους, 0-9 σε κάθε τάξη)
- Στο σύστημα του Harvard οι **γραμμές Balmer φτάνουν στη μέγιστη έντασή τους στα φάσματα των άστρων τύπου A0**, τα οποία έχουν ενεργό θερμοκρασία $T_e = 9520 \text{ K}$.
- Οι ορατές φασματικές γραμμές του **ουδέτερου ηλίου (He I) είναι ισχυρότερες για τα άστρα τύπου B2** ($T_e = 22000 \text{ K}$)
- Οι ορατές φασματικές γραμμές του ασβεστίου που έχει ιονιστεί μία φορά (Ca II) είναι πιο έντονες για άστρα τύπου K0 ($T_e = 5250 \text{ K}$).
- Συμβολισμοί: OI → ουδέτερο άτομο οξυγόνου
OII → μονά ιονισμένο άτομο οξυγόνου
OIII → διπλά ιονισμένο άτομο οξυγόνου κ.ο.κ.

Φάσματα ατμοσφαιρών πλανητών



- Infrared transit spectroscopy of exoplanets
- Ανίχνευση μορίων

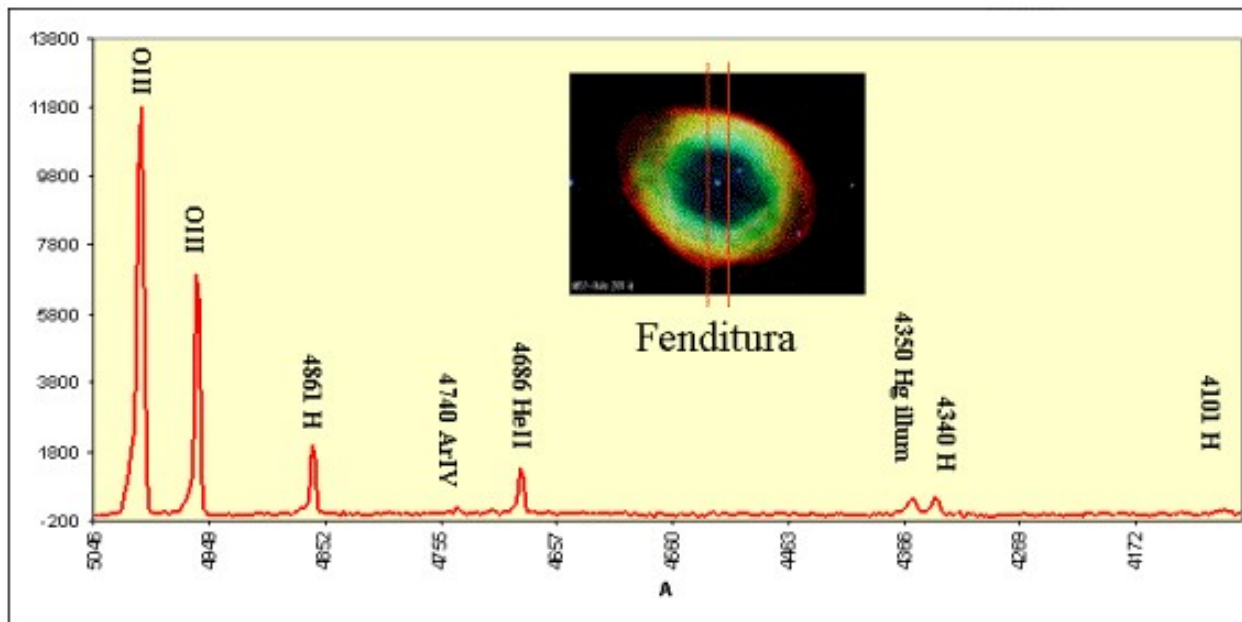
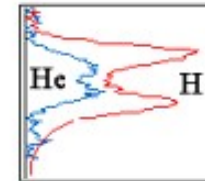


T. Encrenaz 2014

<https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0083>

Φάσματα πλανητικών νεφελωμάτων

M 57 visible spectrum



https://www.astrogeo.va.it/astronom/spettri/neb_planen.htm

Φάσματα από περιοχές HII



<https://www.eso.org/public/images/eso0834a/>

Στις περιοχές ιονισμένου υδρογόνου, HII, δημιουργούνται νέοι αστέρες → χημική σύσταση του ISM τώρα

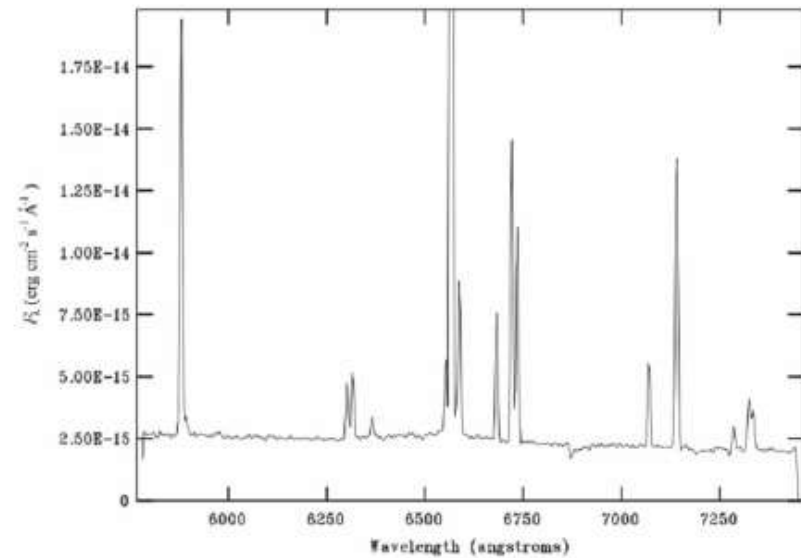


Figure 1. Blue and red spectra for region A of NGC 346 obtained at CTIO with the 4 m telescope and the R-C spectrograph. The figures have been taken from Peimbert et al. (2000). © AAS. Reproduced with permission.

Peimbert et al. 2017 PASP, 129:082001

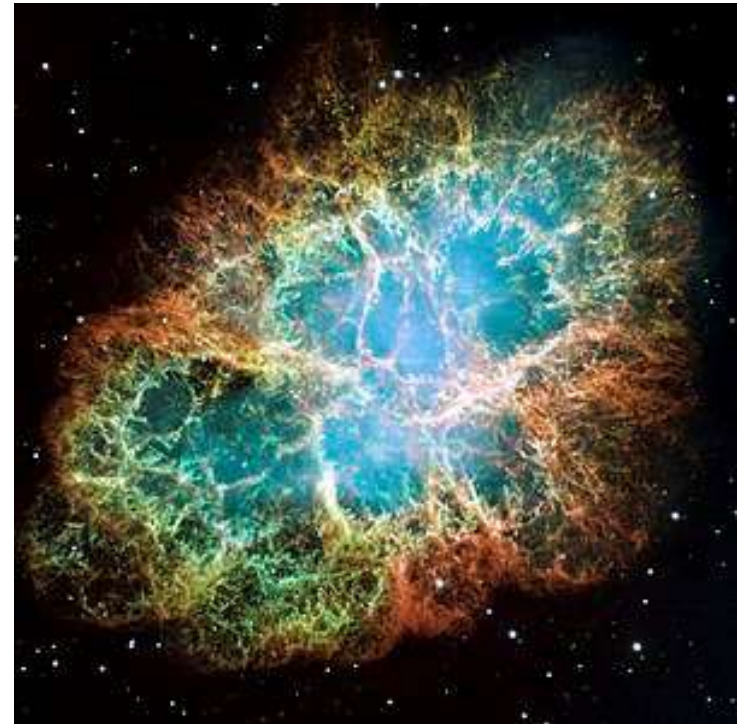
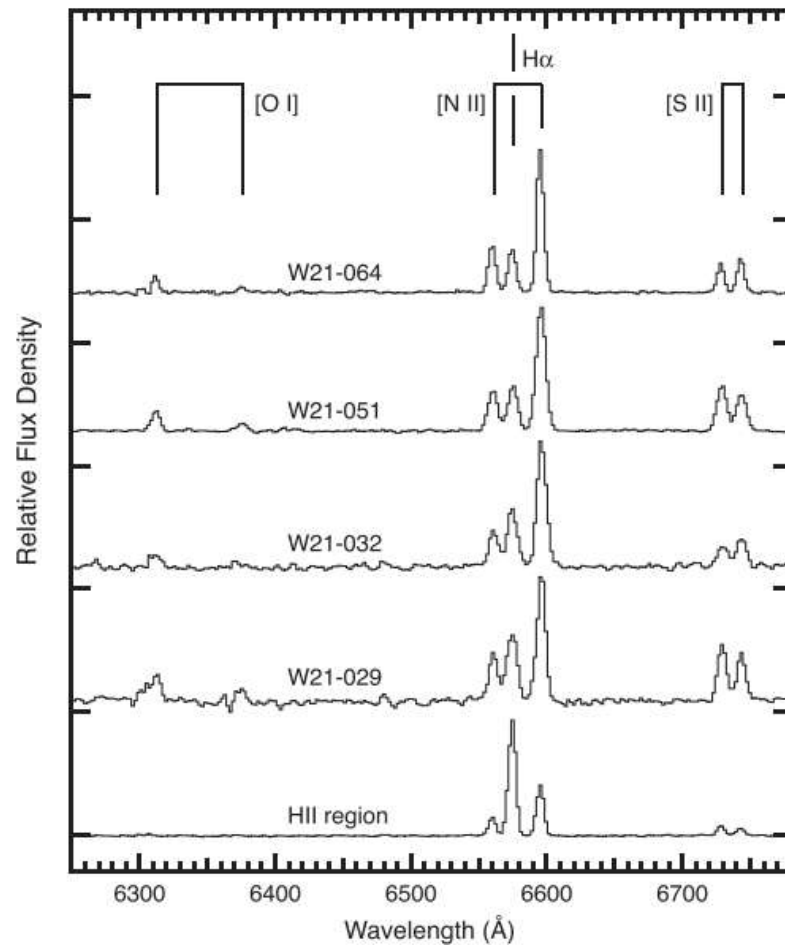
Ασθενής συνεχής ακτινοβολία + ισχυρή γραμμική εκπομπή.

Συνεχές: bound-free, free-free, two photon emission, dust scattered light

Γραμμές εκπομπής: οι ισχυρότερες προκύπτουν από διέγερση λόγω συγκρούσεων (+ επανασύνδεση, φωτοδιέγερση).

Φάσματα από υπολείμματα υπερκαινοφανών (SNR)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 908:80 (22pp), 2021 February 10



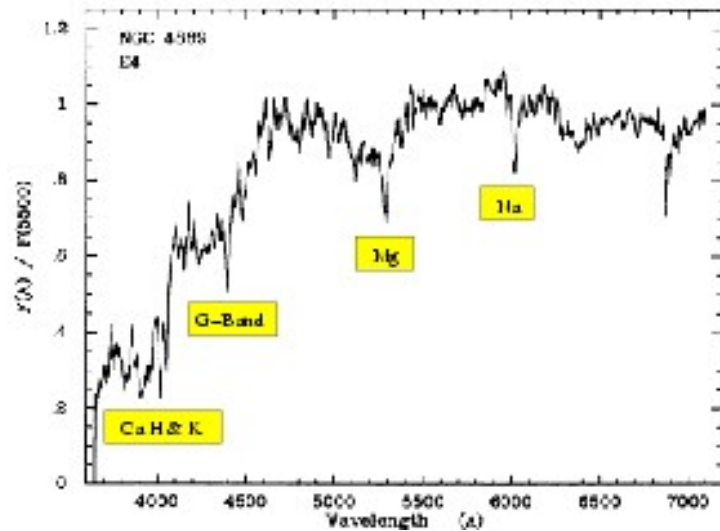
Crab nebula

https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova_remnant

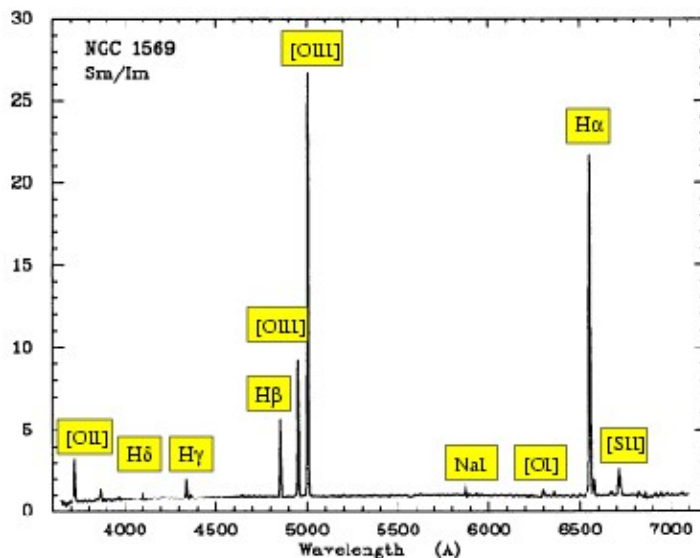
Οπτικά φάσματα (HST) SNRs στον M51, Winkler et al. 2021 ApJ 908:80

Ολοκληρωμένα φάσματα γαλαξιών στο ορατό

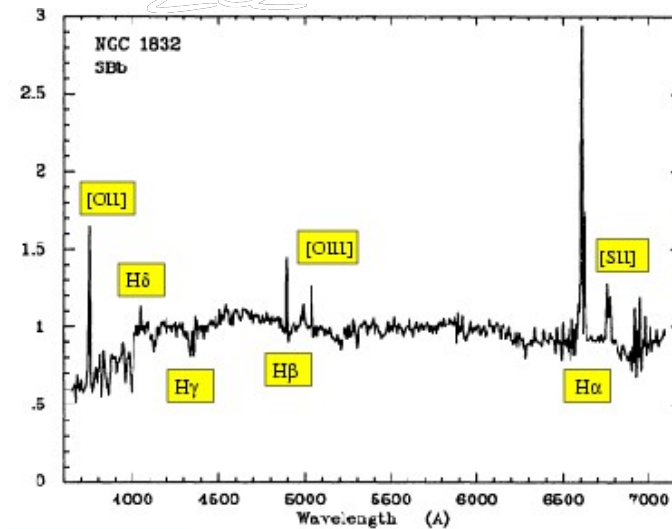
Ελλειπτικοί γαλαξίες



Ακανόνιστοι γαλαξίες



Σπειροειδείς γαλαξίες



R.C. Kennicutt

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992ApJS...79..255K/abstract>

SDSS DR17 sdss.org

Φάσματα quasars

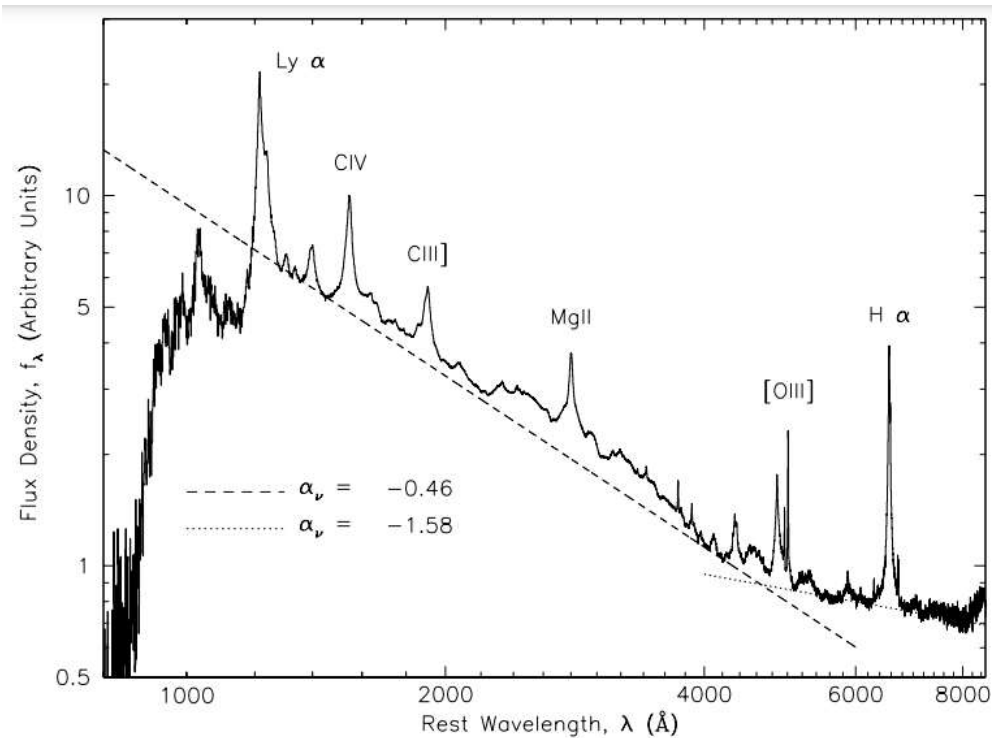
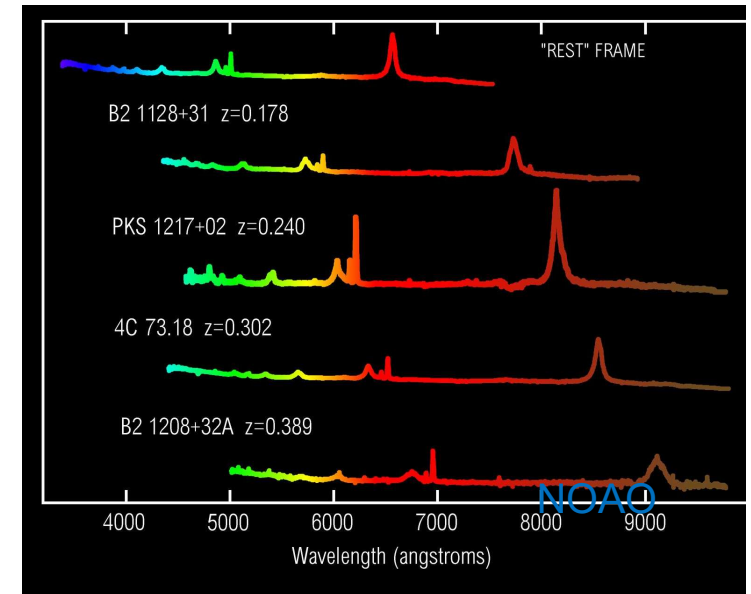


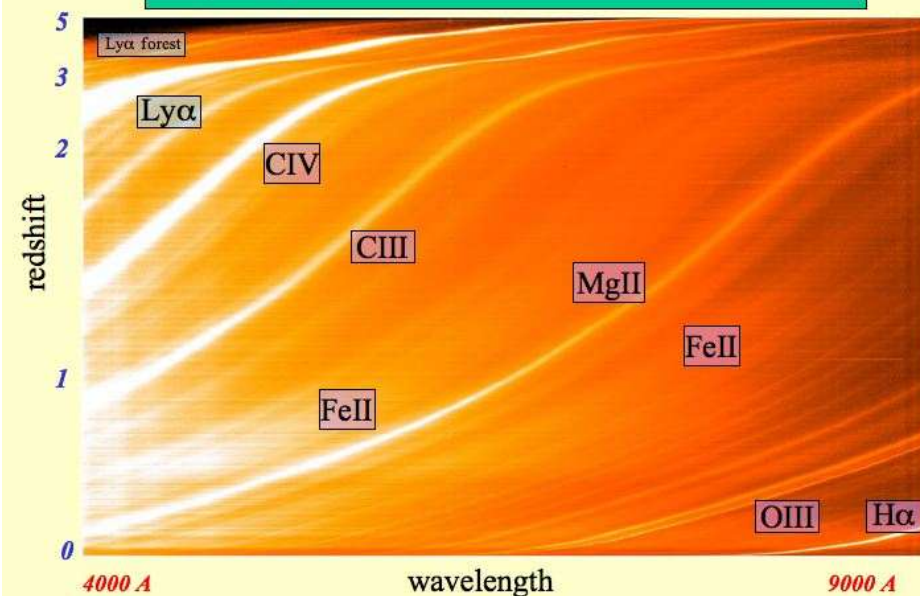
FIG. 3.—Composite quasar spectrum using median combining. Power-law fits to the estimated continuum flux are shown. The resolution of the input spectra is ≈ 1800 , which gives a wavelength resolution of about $1 \text{ \AA}$

Van den Berk et al. 2001, AJ, 122, 549



<https://www.sdss.org/science/>

46,420 Quasars from the SDSS Data Release Three

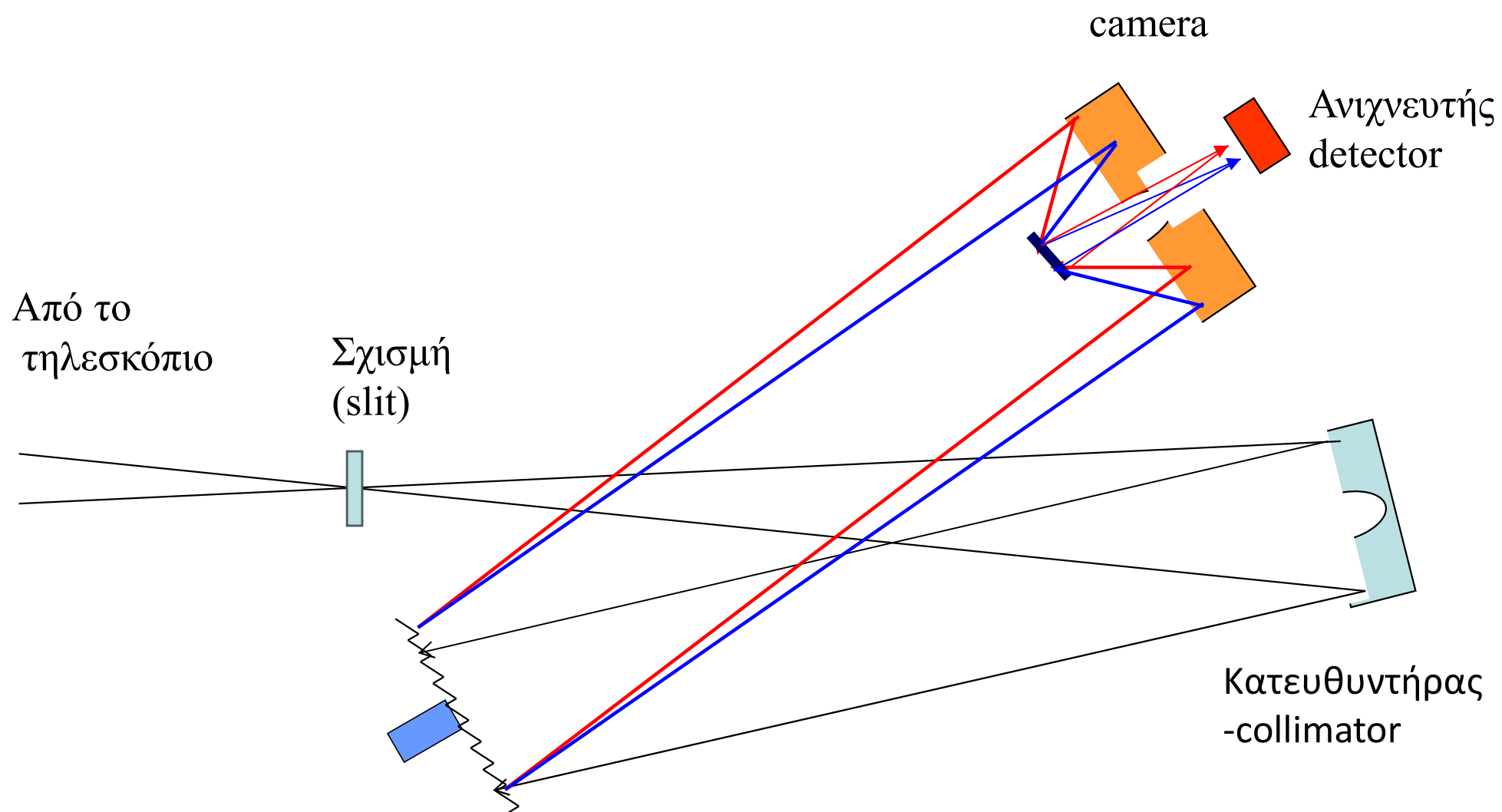


Οργανολογία - Φασματογράφοι

Οι βασικές συνιστώσες ενός φασματογράφου

- Ένα μέσο για 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

Βασικό σχέδιο φασματογράφου



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 να επιτρέπει να τις διαχωρίσουμε μεταξύ τους.

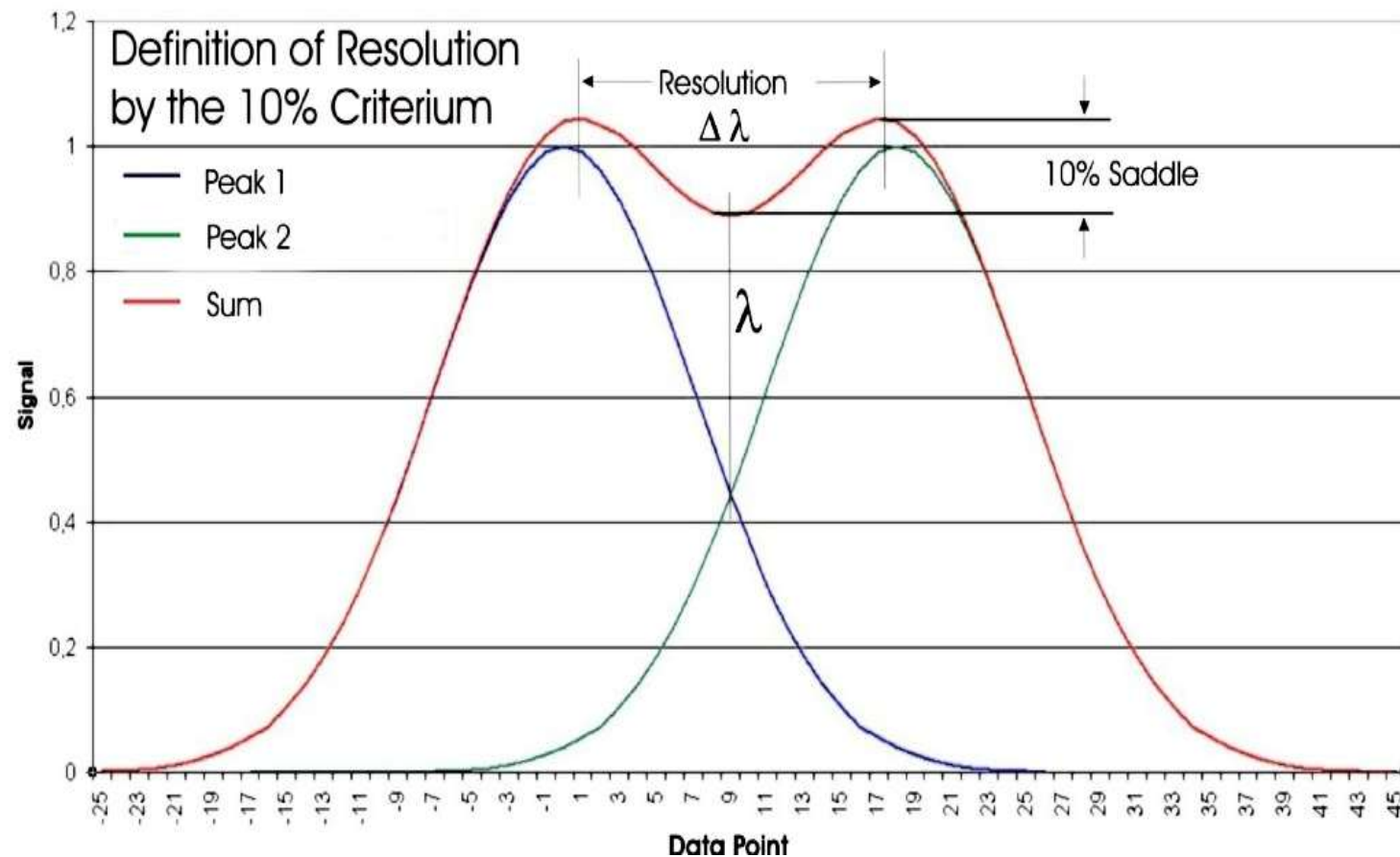
$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

ή

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

Διακριτική ισχύς
Resolving power RP

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



Η διακριτική ισχύς που απαιτείται εξαρτάται από τους επιστημονικούς στόχους

1. Ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες, Quasars, (αμυδρά) αντικείμενα σε μεγάλη ερυθρομετατόπιση

$$RP = 500 - 1000$$

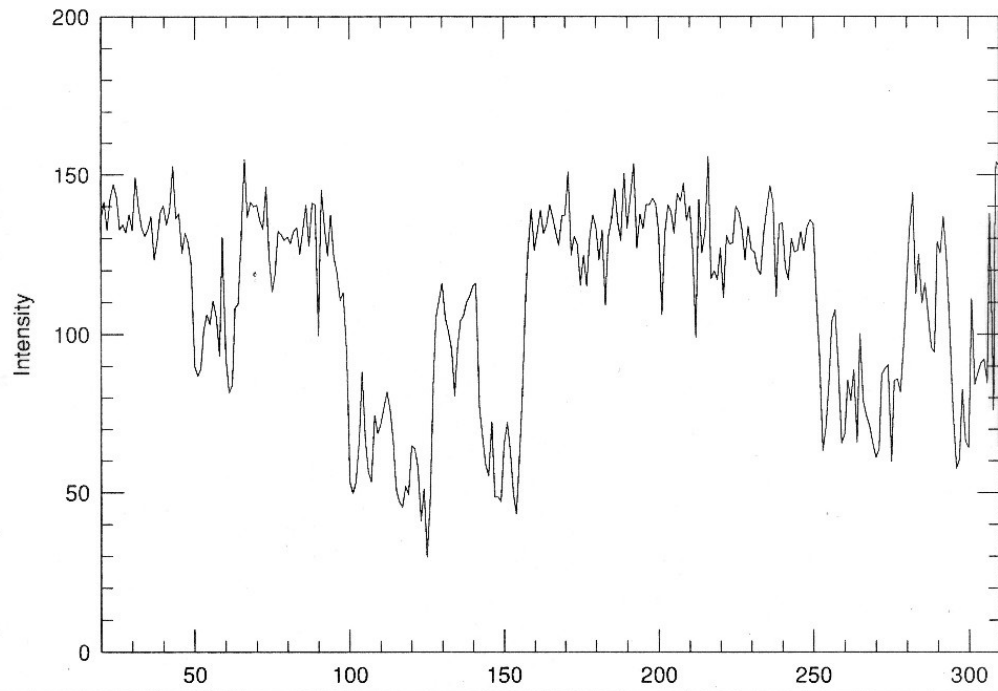
2. Εκρήξεις SN:

Ταχύτητες διαστολής $\sim 3000 \text{ km/s}$

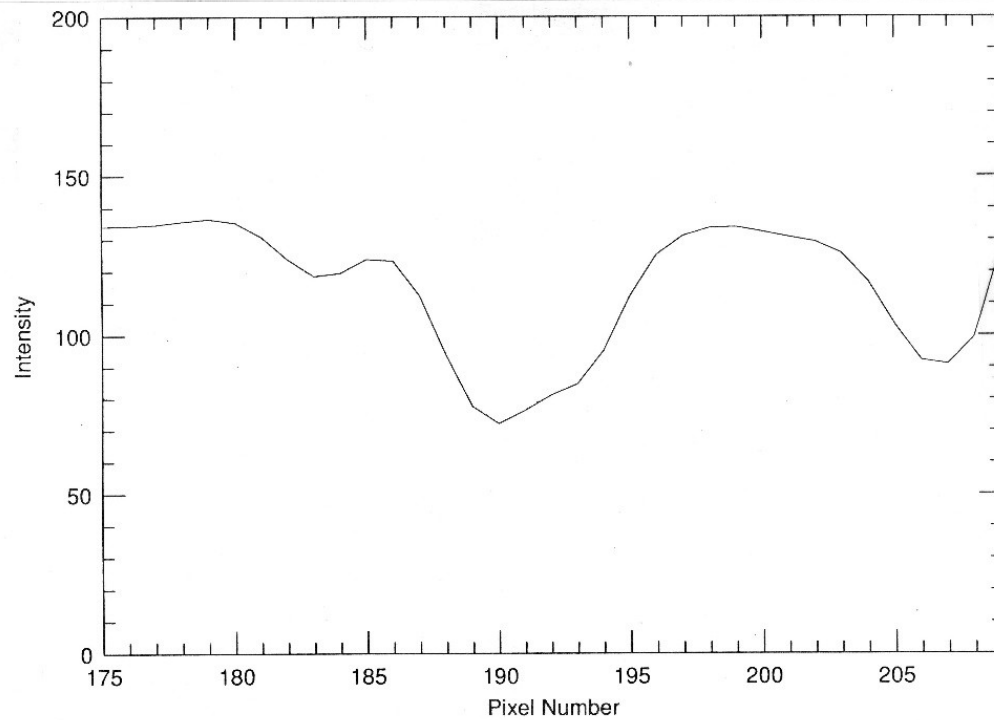
$$dl/l = v/c = 3000/3 \times 10^5 = 0.01$$

$$RP > 100$$

QSO 1331+170



$R = 30.000$



$R = 3.000$

3. 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

4. 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 resolving element, no other broadening

5. Περιεκτικότητα χημικών στοιχείων:

Θερμά άστρα: $RP = 30.000$

Ψυχρά άστρα: $RP = 60.000 - 100.000$

- Διάκριση πολλών κοντινών φασματικών γραμμών
- Ακριβής καθορισμός του συνεχούς

6. Μετατοπίσεις γραμμών ισοτόπων:

π.χ.:

Li^7 : 6707.76

Li^6 : 6707.92

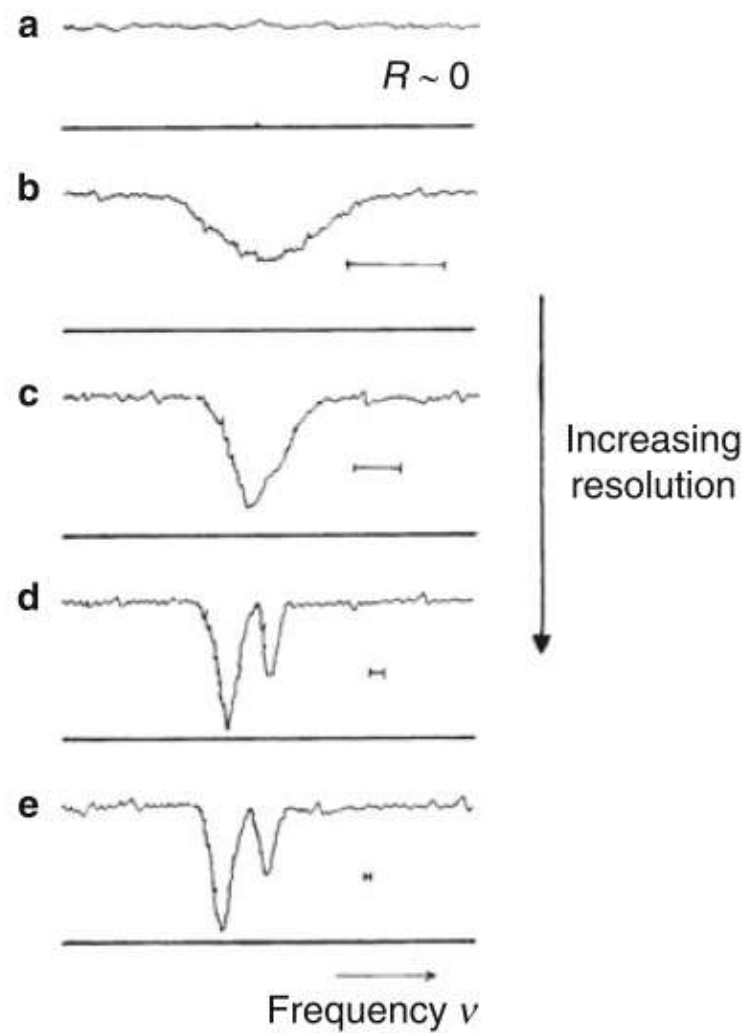
R> 200.000

7. Προφιλ γραμμών (pulsations, spots, convection):

$R=100.000 - 200.000$

→ Απαιτείται η εύρεση αμυδρών παραμορφώσεων στα προφιλ των φασματικών γραμμών

Η επίδραση της διακριτικής ισχύος σε μια γραμμή απορρόφησης



Διασπορά (dispersion)

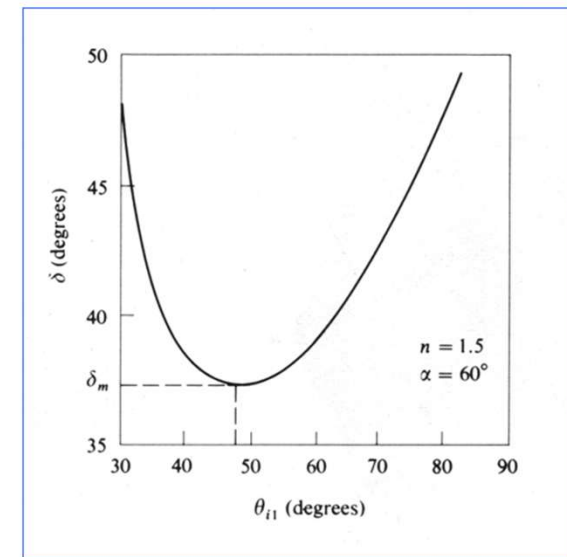
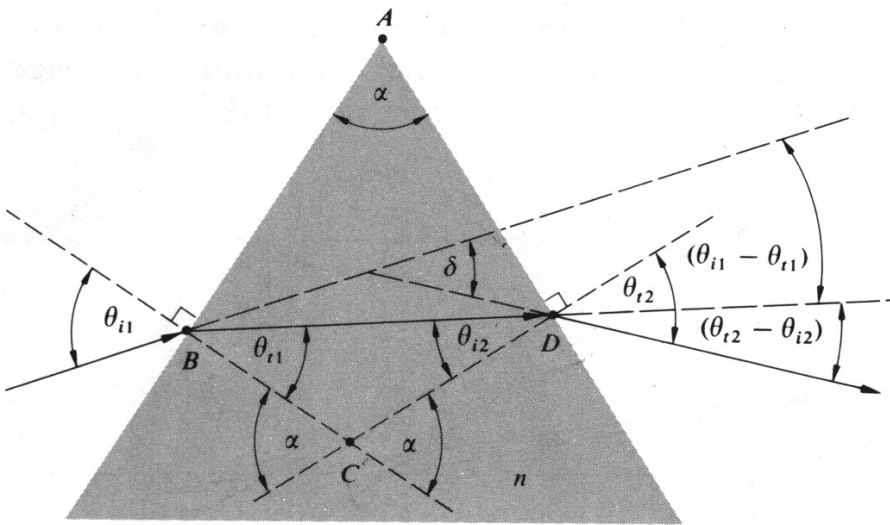
Μπορεί να επιτευχθεί με:

- Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος (πρίσμα)
- Φαινόμενα συμβολής

Φασματογράφοι πρίσματος:

βασίζονται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος

Η ελάχιστη δυνατή τιμή της γωνιακής εκτροπής έχει ιδιαίτερη σημασία για πρακτικούς σκοπούς



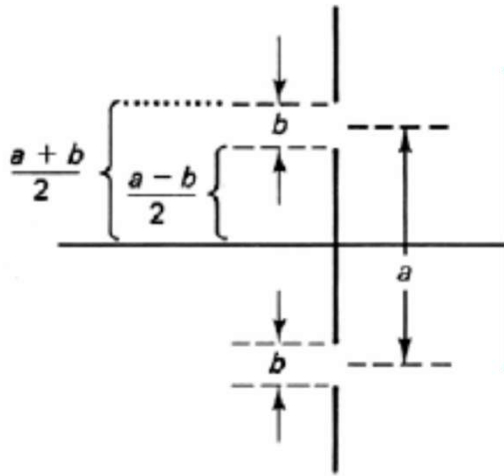
$$d\delta/d\theta_{i1}=0 \longrightarrow$$

$$n = \frac{\sin[(\delta_m + \alpha) / 2]}{\sin \alpha/2}$$

Τότε, η **διασπορά**, που ορίζεται ως $dn/d\lambda$, δίνεται κατά προσέγγιση, από τη σχέση

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3}$$

Φράγμα περίθλασης



$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2$$

$$\beta \equiv \frac{1}{2}kb \sin \theta$$

$$\alpha \equiv \frac{1}{2}ka \sin \theta$$

Ο παράγων β αντιστοιχεί στη γνωστή πια περίθλαση.

Ο όρος $(\sin N\alpha / \sin \alpha)^2$ καθορίζει την συμβολή μεταξύ των κυμάτων που προέρχονται από τις N σχισμές. Για $\alpha=0$ ή κάποιο πολλαπλάσιο του π , η έκφραση γίνεται απροσδιόριστη. Εφαρμόζοντας τον κανόνα του L' Hospital για $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ έχουμε

$$\lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} = \lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{N \cos N\alpha}{\cos \alpha} = \pm N \quad (22a)$$

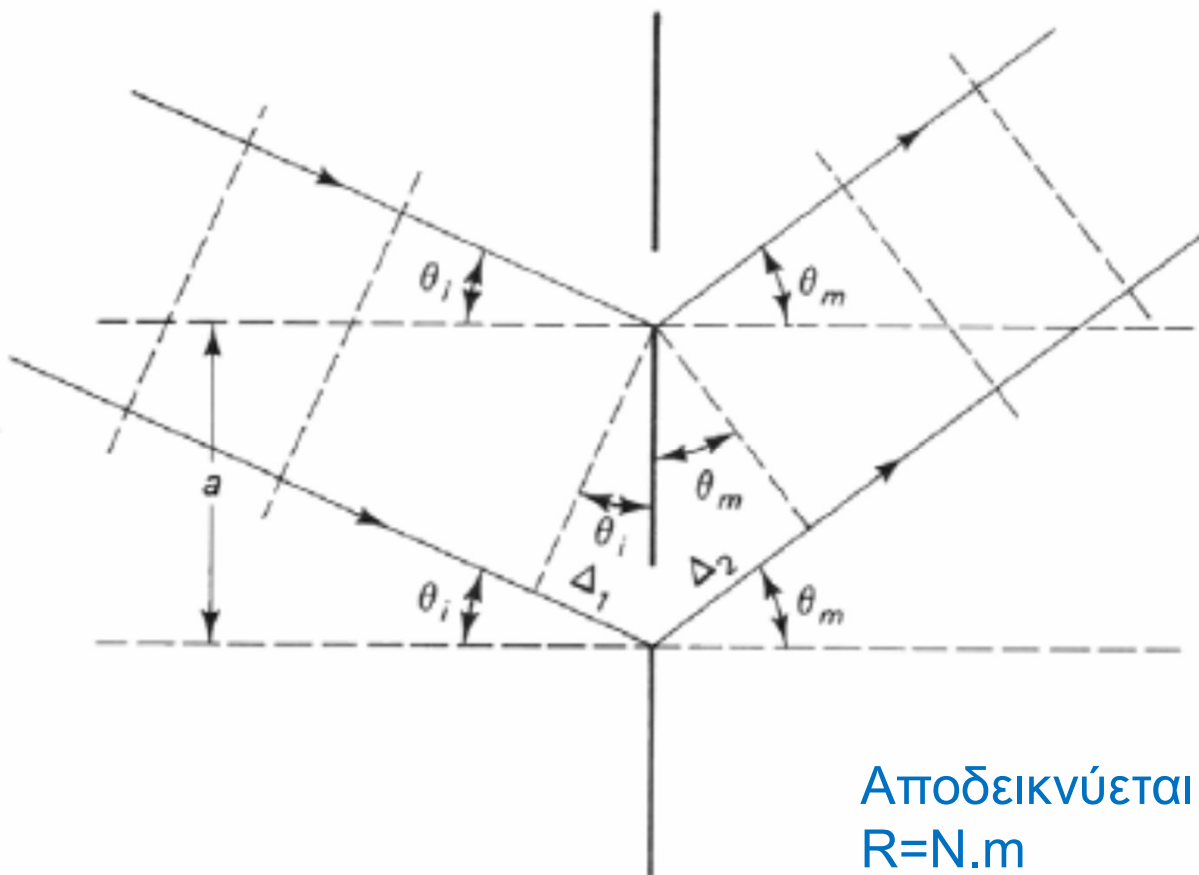
οπότε τα κύρια μέγιστα της συμβολής έχουν ένταση ανάλογη του N^2

$$\alpha = \frac{p\pi}{N}, \text{ ή, } a \sin \theta = \frac{p\lambda}{N}, \quad p=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Κύρια μέγιστα έχουμε για $p=0, \pm N, \pm 2N, \dots$

Φράγμα περίθλασης

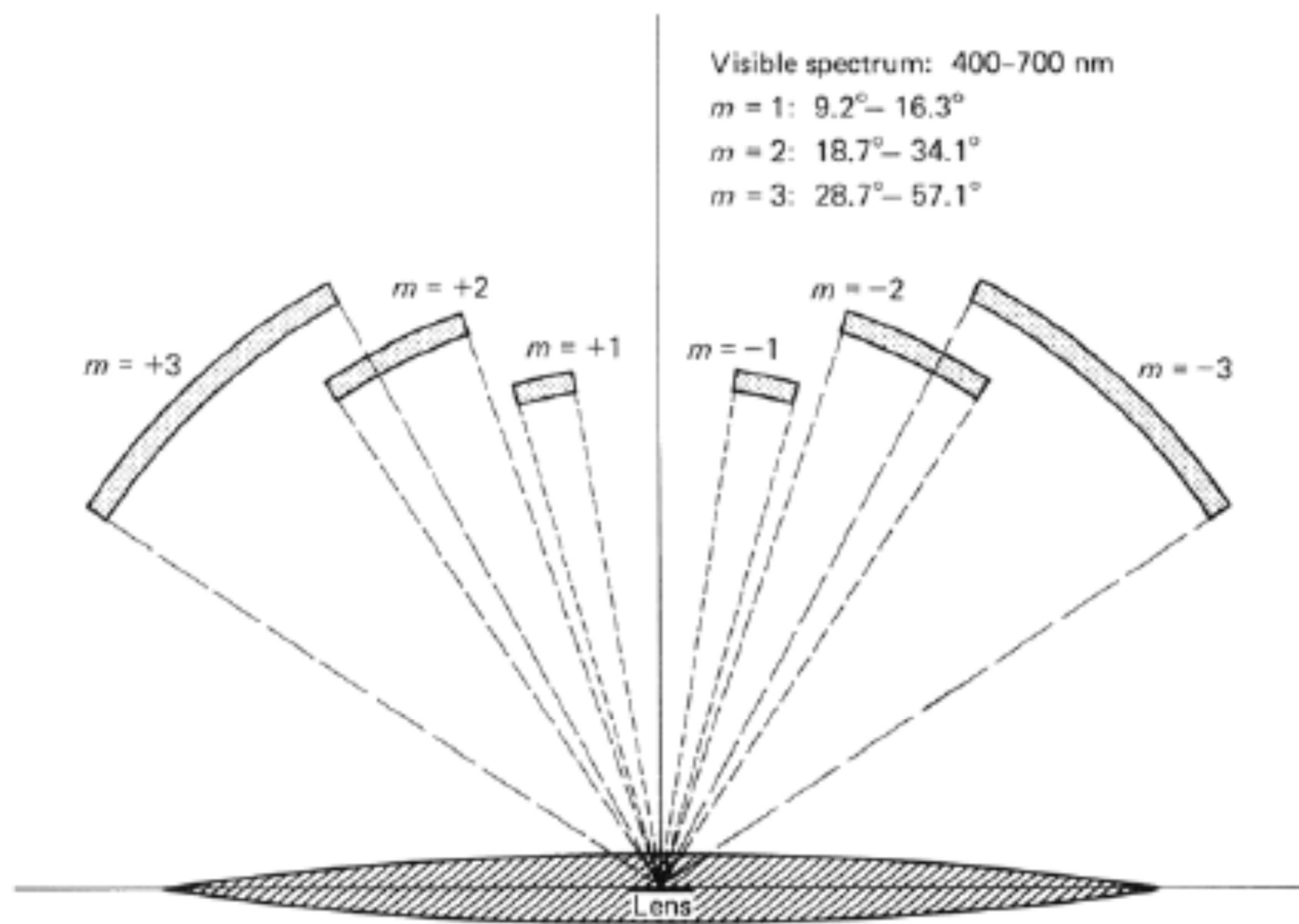
Γενίκευση για τυχαία πρόσπτωση



Αποδεικνύεται ότι η διακριτική ισχύς είναι
 $R=N.m$

όταν η διαφορά δρόμων $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = m\lambda$, όπου m ακέραιος, τότε όλα τα περιθλώμενα κύματα είναι σε φάση και η εξίσωση φράγματος γράφεται σαν:

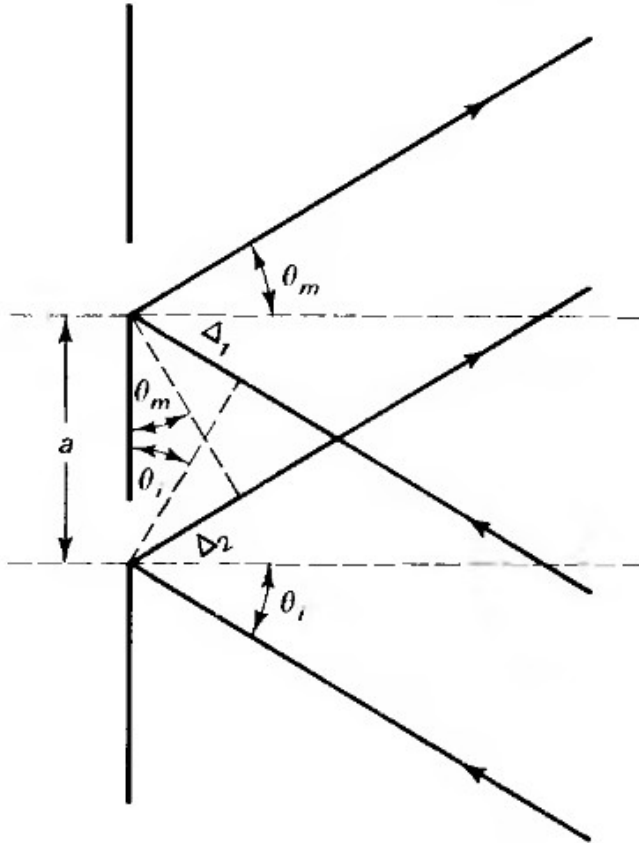
$$a(\sin\theta_i + \sin\theta_m) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Είδη φασματογράφων

- Φασματογράφοι απλής σχισμής (long slit spectrographs)
- Φασματογράφοι με φράγματα διασποράς
- Φασματογράφοι με ανακλαστικά φράγματα
- Φασματογράφοι echelle
- Φασματογράφοι πολλαπλών αντικειμένων
- Integrated field units

Reflection gratings



$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = a \sin \theta_i - a \sin \theta_m$$

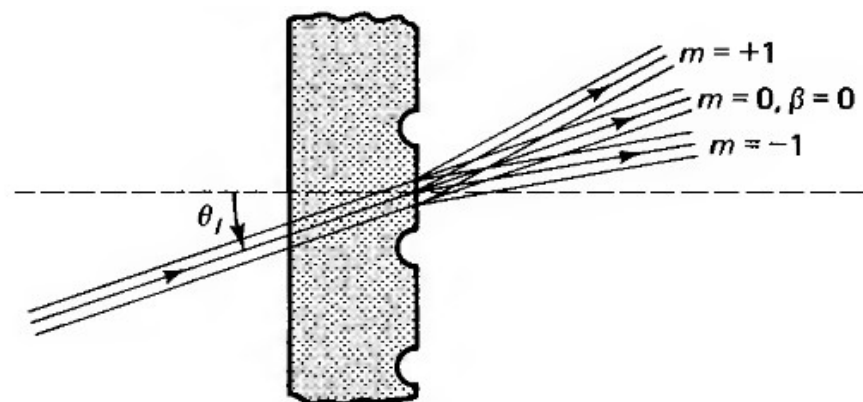
$\Delta = m\lambda$ an interference principal maximum

grating equation

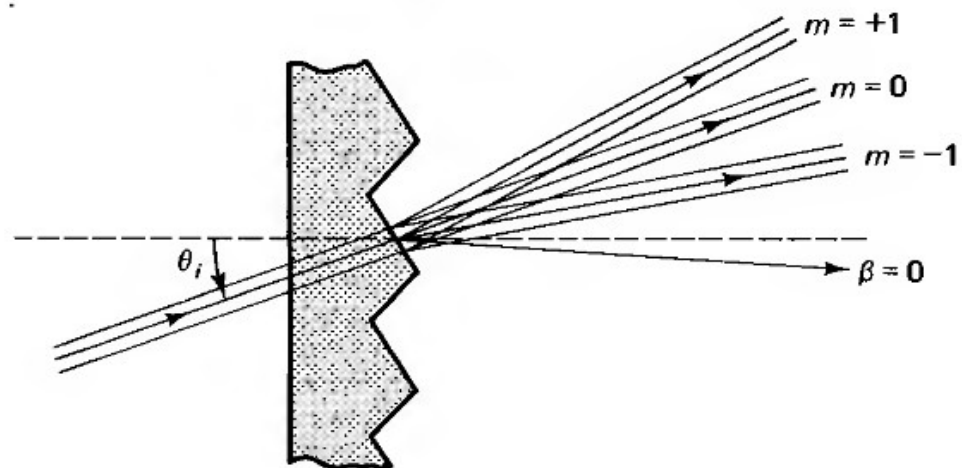
$$m\lambda = a(\sin \theta_i + \sin \theta_m)$$

Blazed gratings

- **absolute efficiency of a grating in given λ -region = diffracted light energy/incident light energy**
- **Light energy throughput increases with N**
- **Zeroth order diffraction principal maximum carries a lot of energy but no information – energy loss**
- **Blazing: shifting the principal maximum to a higher order**



(a)



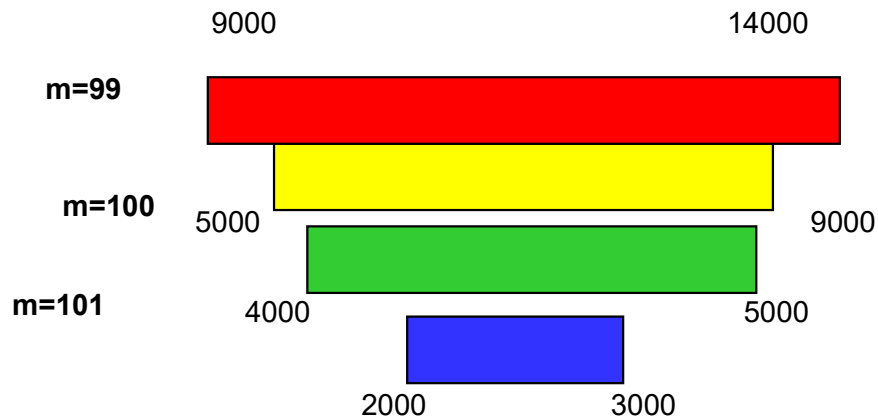
(b)

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:

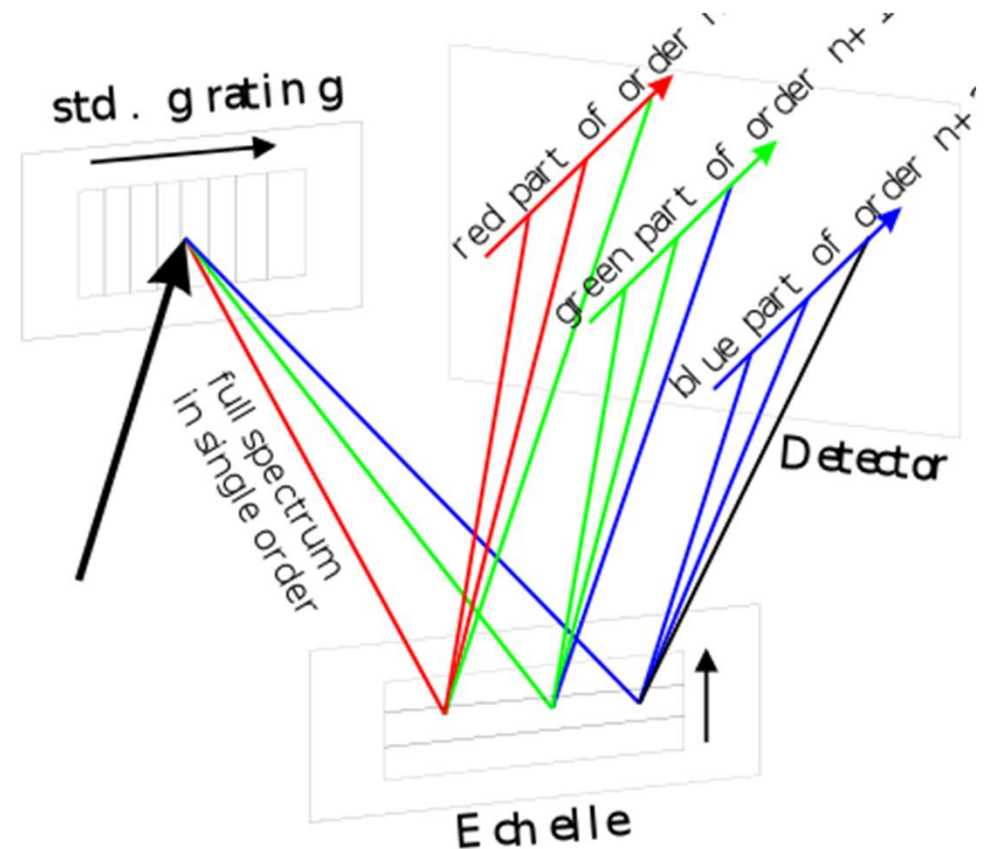


Λύση 1: φίλτρα συμβολής (interference filters)

Λύση 2: cross-disperser → φασματογράφος echelle

Φασματογράφοι Echelle - Cross disperser

- Για να διαχωρίσουμε τις επικαλυπτόμενες τάξεις χρησιμοποιούμε ένα δεύτερο στοιχείο διασποράς (φράγμα ή πρίσμα) – **cross-disperser** – με κατεύθυνση διασποράς κάθετα ως προς το πρώτο στοιχείο διασποράς.
- Το φάσμα αποτελείται από ζώνες διαφορετικών μηκών κύματος με μικρή επικάλυψη





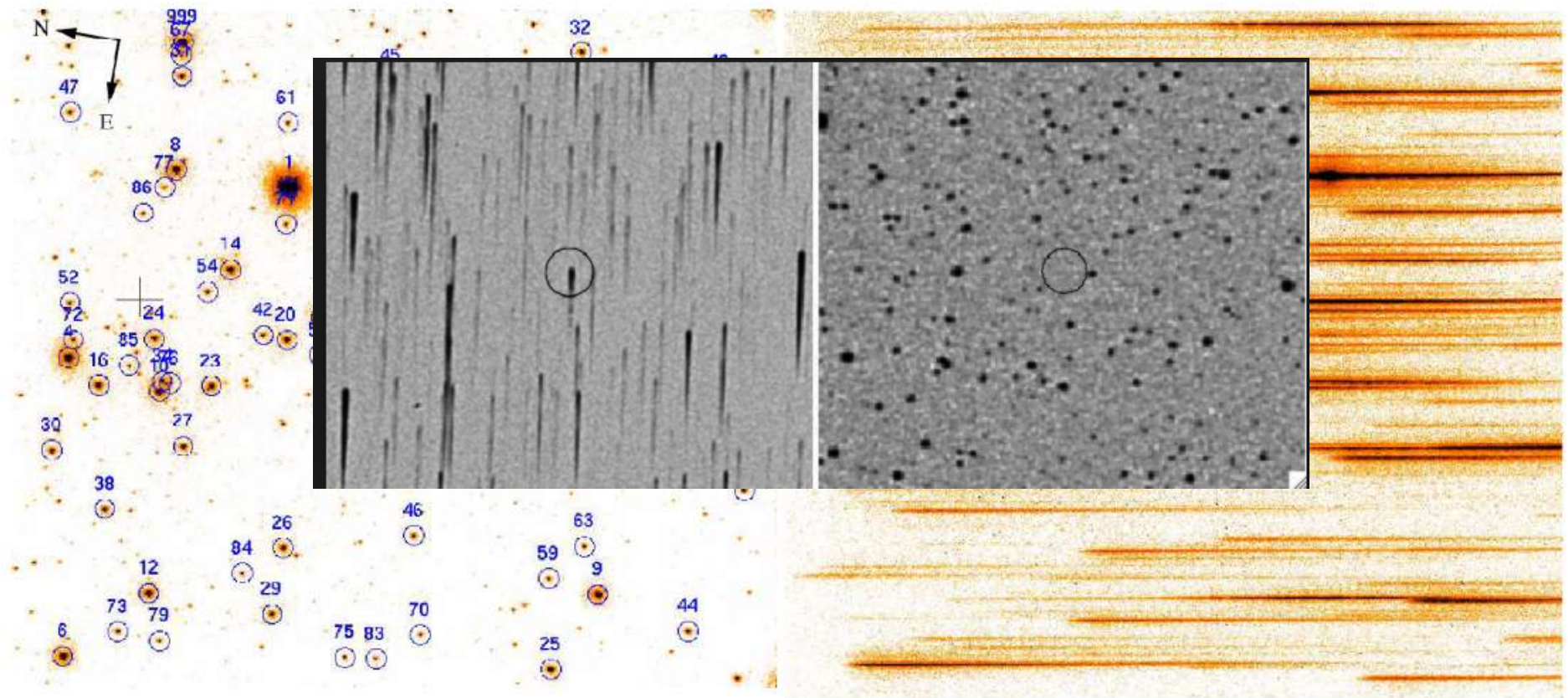
Φασματογράφοι πολλαπλών αντικειμένων

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

Φασματοσκοπία πολλών αντικειμένων χωρίς σχισμή (slitless spectroscopy)

Slitless spectrograph: όταν το στοιχείο διασποράς τοποθετείται ΠΡΙΝ το εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου.



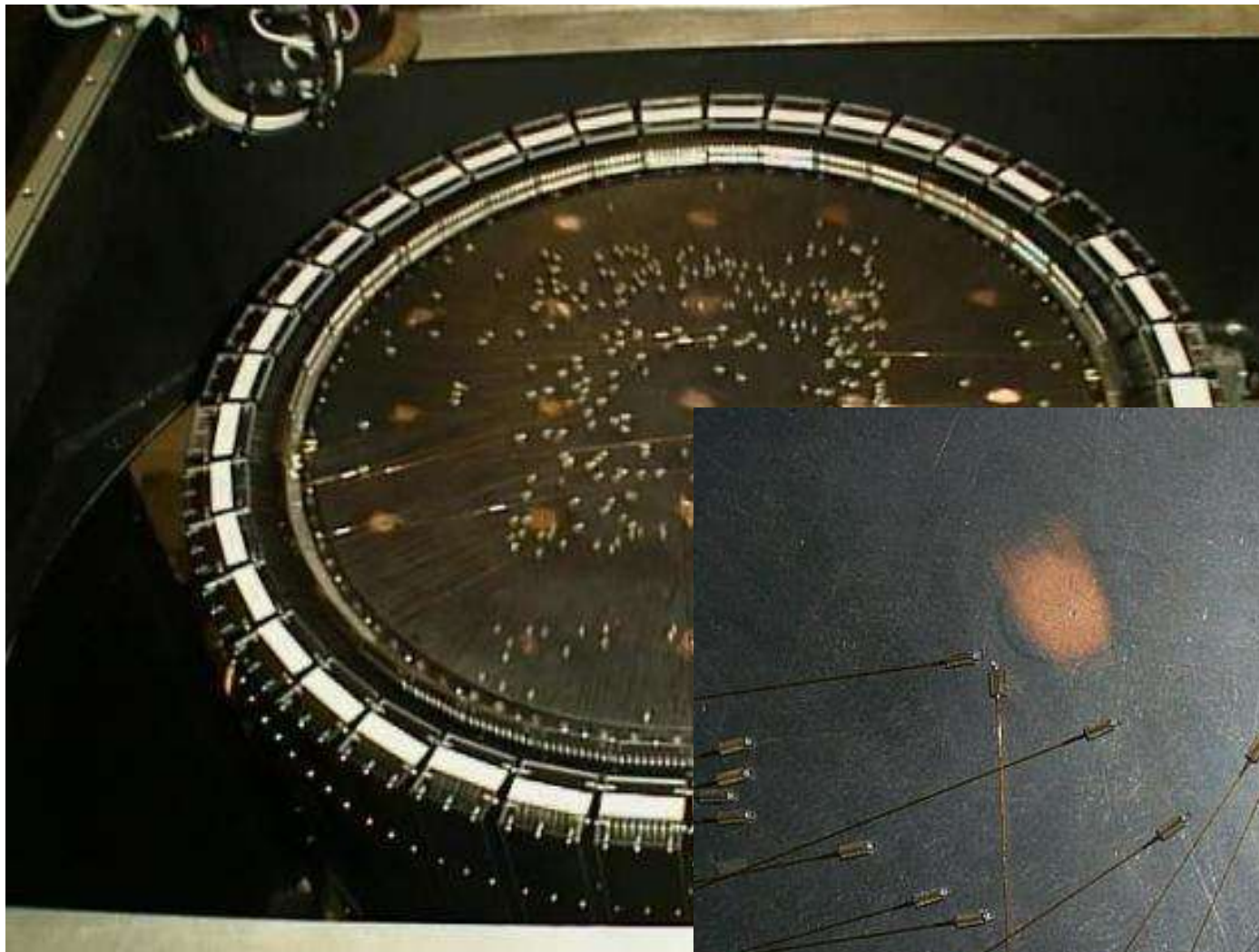
Κατά :

- δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε τη διακριτική ικανότητα μεταβάλλοντας το πάχος της σχισμής
- Μεγάλη επικάλυψη των φασμάτων

Φασματοσκοπία πολλαπλών οπτικών ινών

- Μια άλλη μέθοδος ταυτόχρονης λήψης φασμάτων πολλών αντικειμένων έγκειται στην καθοδήγηση φωτός από το είδωλο του αντικειμένου πάνω στο εστιακό επίπεδο, προς μία «ψευδο»-σχισμή (γραμμική παράταξη των άκρων των ο.ι.)
- Κατάλληλα για οπτικά μήκη κύματος, και μέχρι $1.6\mu\text{m}$ στο κοντινό υπέρυθρο. Κοντά στα $2\mu\text{m}$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο.ι. από πιο εξωτικά υλικά όπως από οξείδιο του ζirkονίου (θέλουν ψύξη και είναι πολύ εύθραυστες)

Ρομποτική τοποθέτηση των ο.ι.



2dF – 4m AAT



Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)



Figure1 shows the focal plane with 4000 fiber positioning units

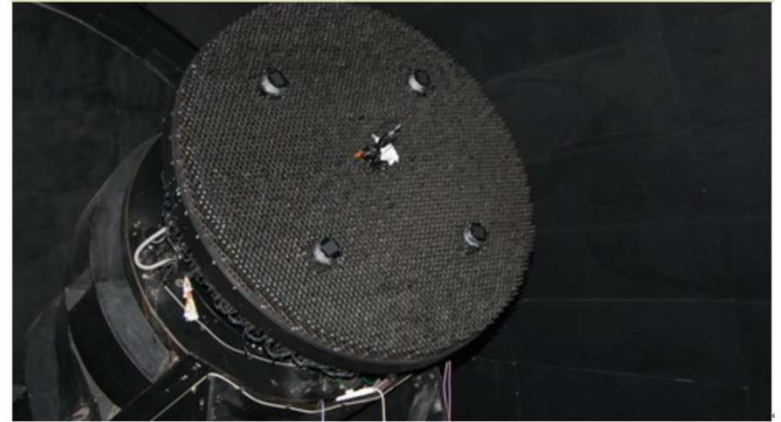
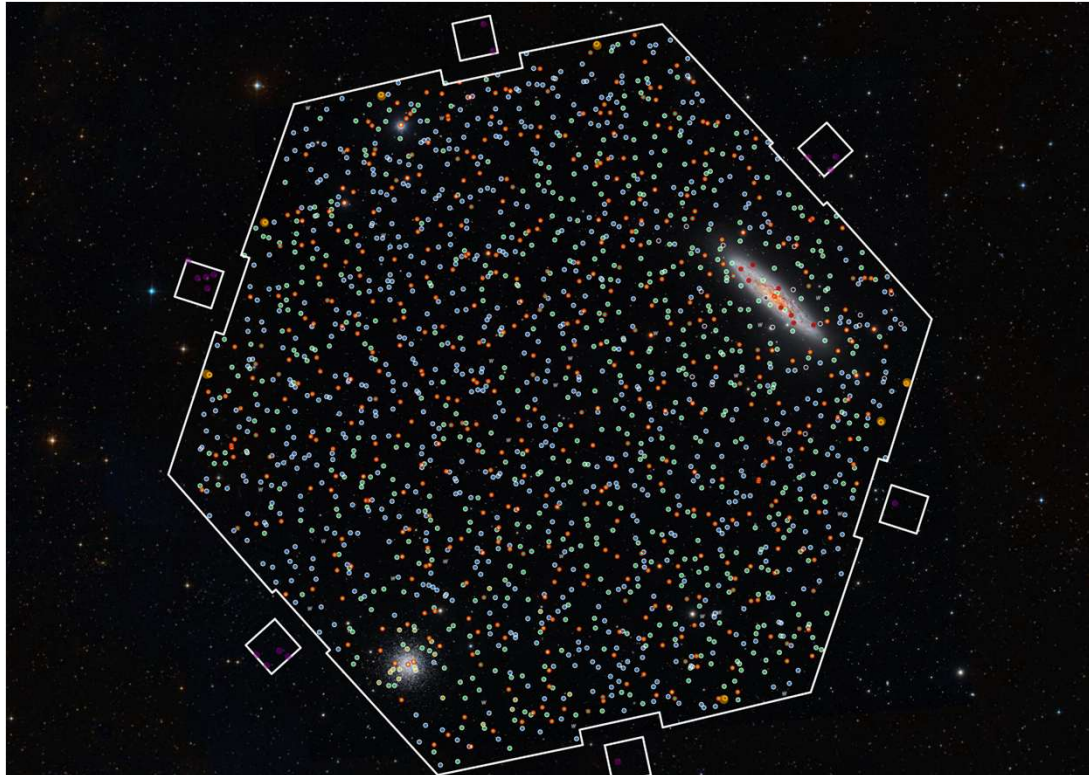


Figure 2 shows the fiber positioning units

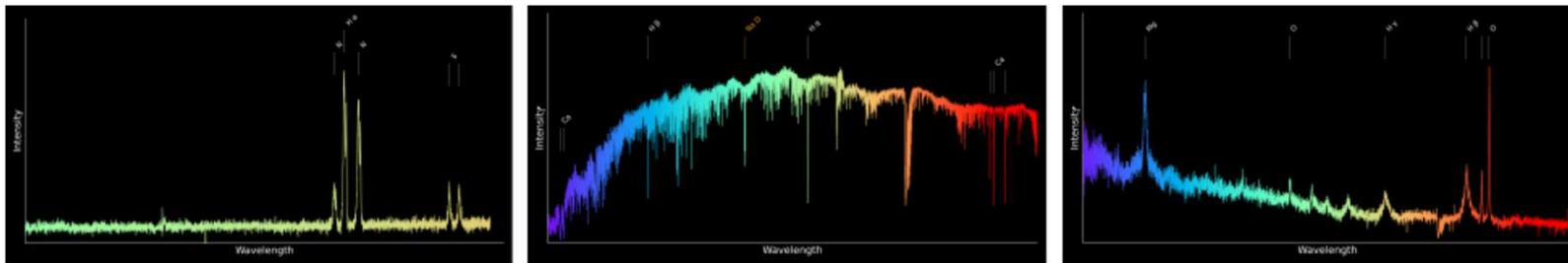


4MOST (4m VISTA – ESO)



2400 αντικείμενα ταυτόχρονα
– RP 4000-7700

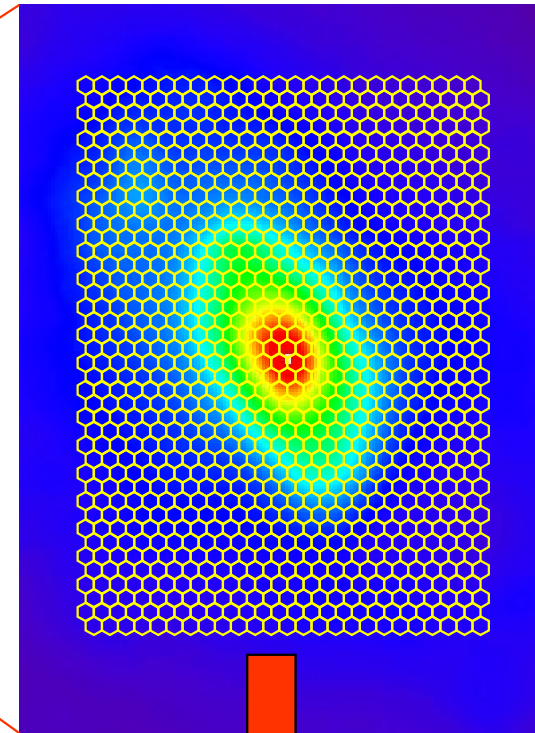
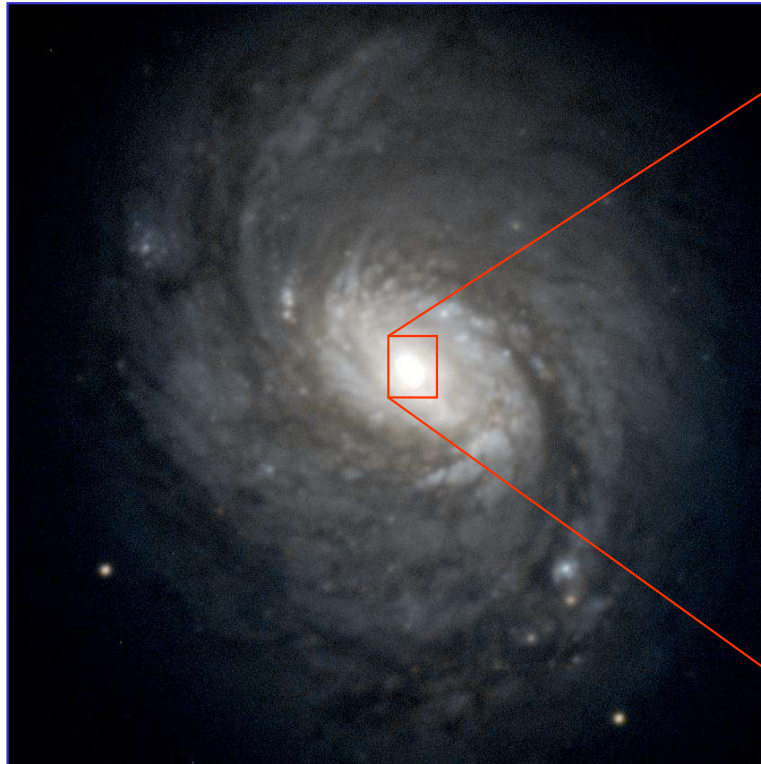
4.2 deg²



Left: This spectrum is of the nucleus of the Sculptor Galaxy. Center: Spectrum of a star in the globular cluster NGC288. Right: This spectrum of a distant galaxy shows signs of an active nucleus surrounding its central massive black hole. (Credit: AIP/R. de Jong, CRAL/J.-K. Krogager)

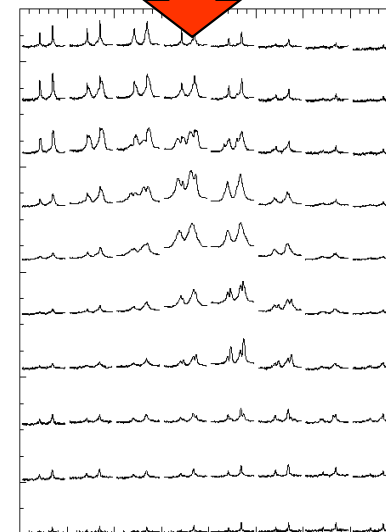
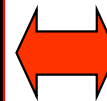
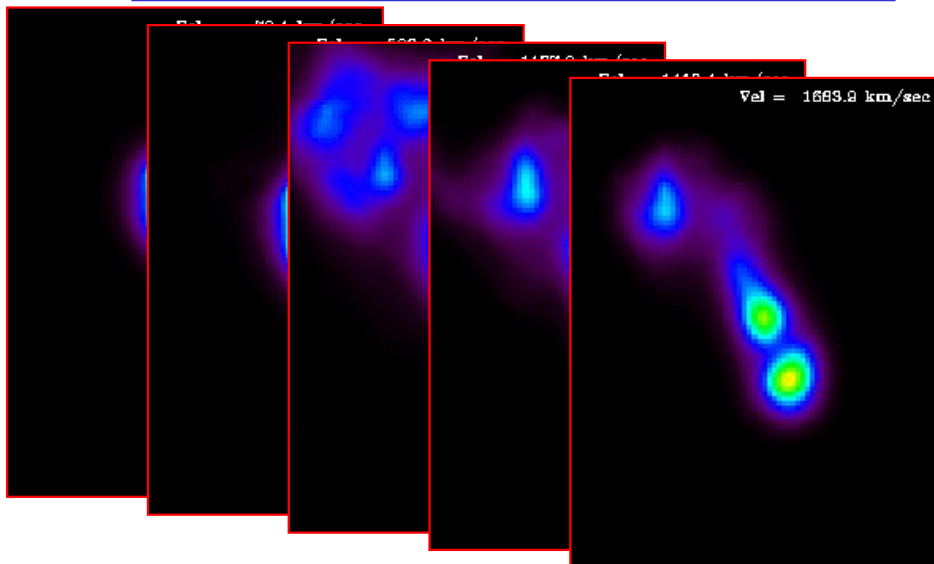
GMOS integral field unit observes NGC1068

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)

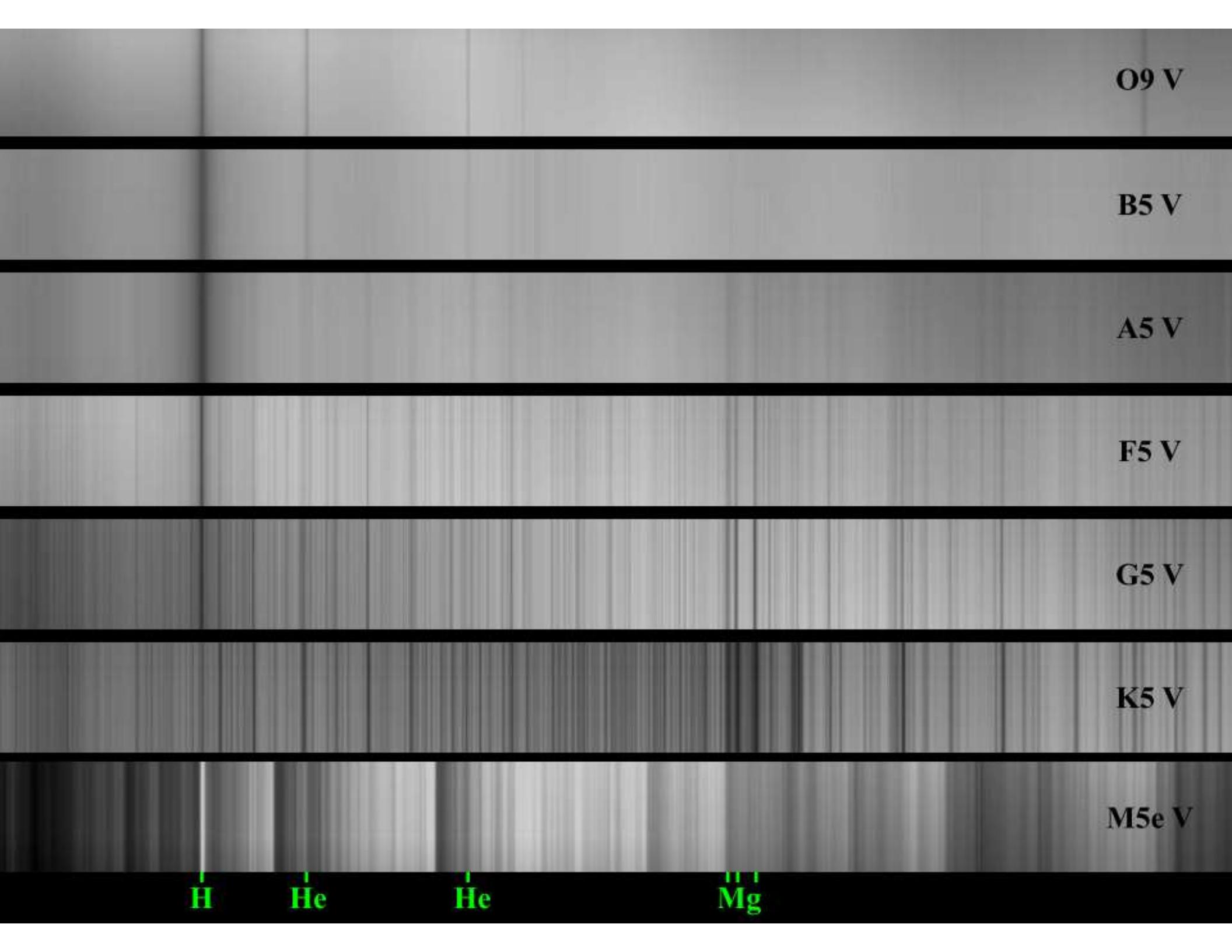


One spectrum
for each
element
(only 4%
shown)

Η άσκηση σήμερα

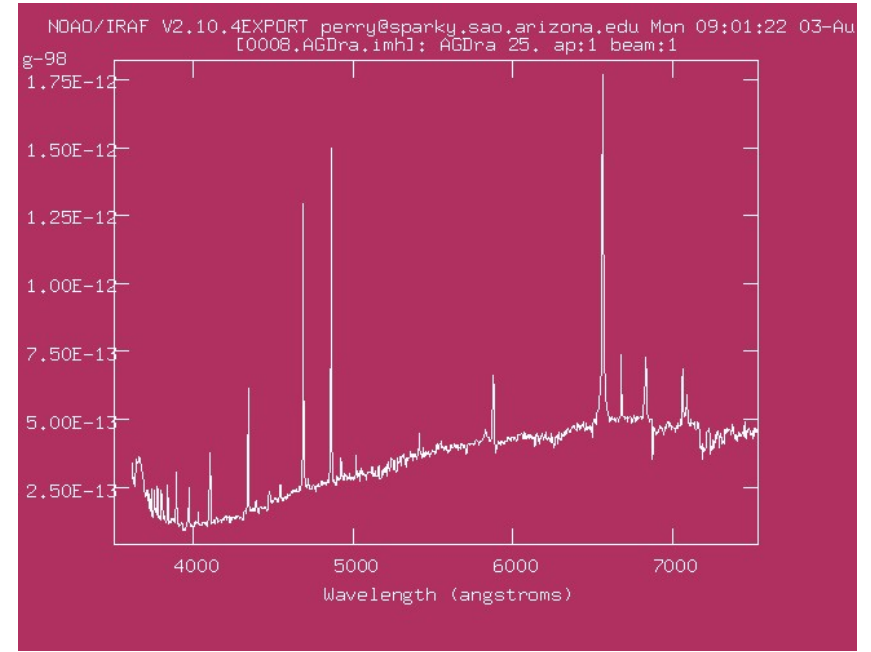
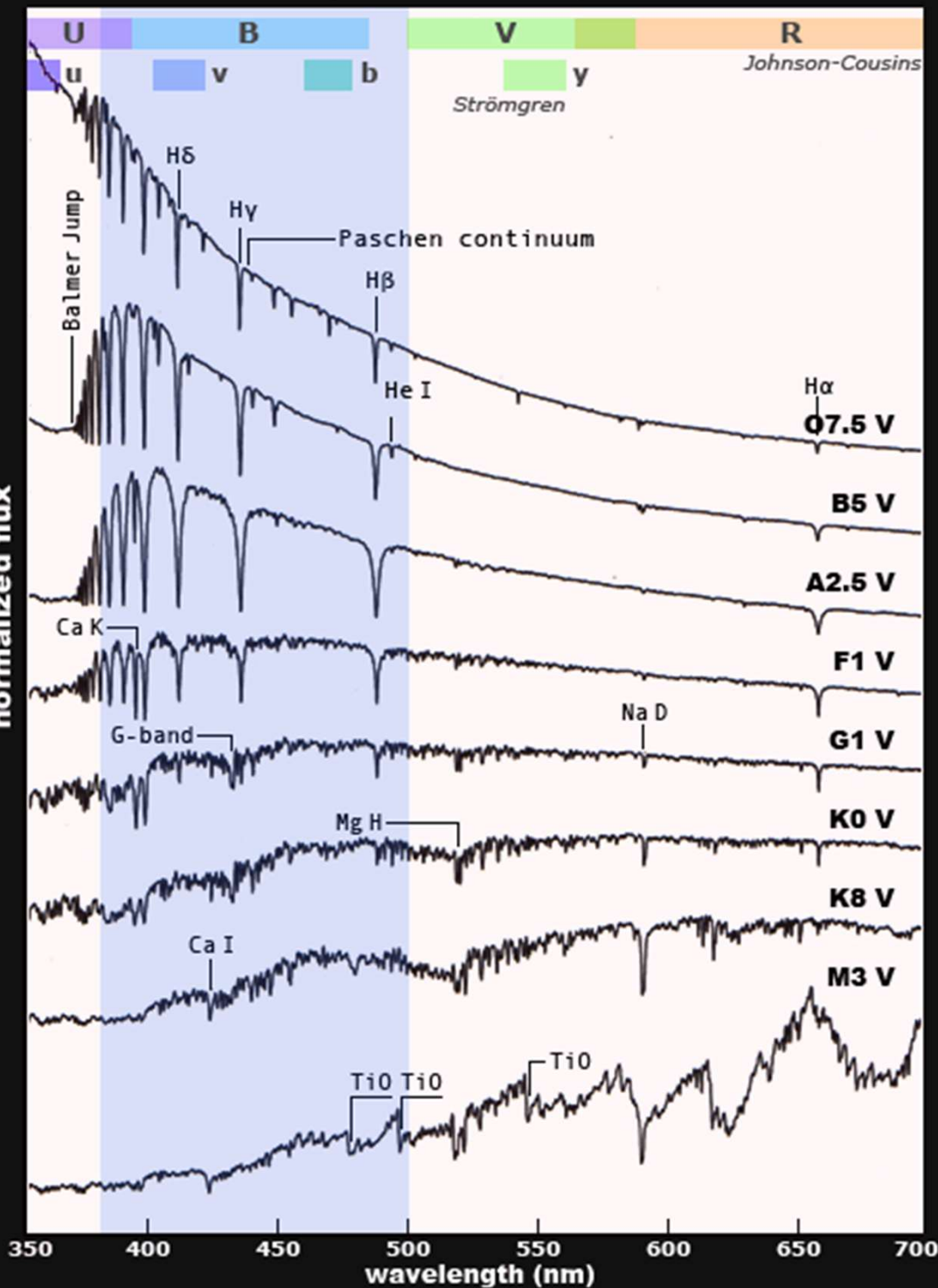
Με τα εργαλεία που θα μελετήσουμε σήμερα μπορούμε να απαντήσουμε σε ερωτήματα όπως:

- **Φασματική ταξινόμηση**
- Επίδραση της θερμοκρασίας και της μεταλλικότητας στα φάσματα
- **Μέτρηση του ισοδύναμου πλάτος γραμμών απορρόφησης Balmer**
- **Πως μεταβάλλεται το ισοδύναμο πλάτος των γραμμών Balmer με τον φασματικό τύπο**
- **Εργασία για το σπίτι**
 - (i) Σύντομη περιγραφή της άσκησης που κάνατε στο εργαστήριο και των συμπερασμάτων σας. Εξηγείστε.
 - (ii) Χρησιμοποιείτε μία γραμμή Balmer του υδρογόνου και μία γραμμή Paschen (ίδιου n_i) και βρείτε τη θερμοκρασία διέγερσης. Συγκρίνετε με τη θερμοκρασία του άστρου που περιμένετε με βάση τον φασματικό τύπο. Σχολιάστε.



a sequence of stellar flux profiles

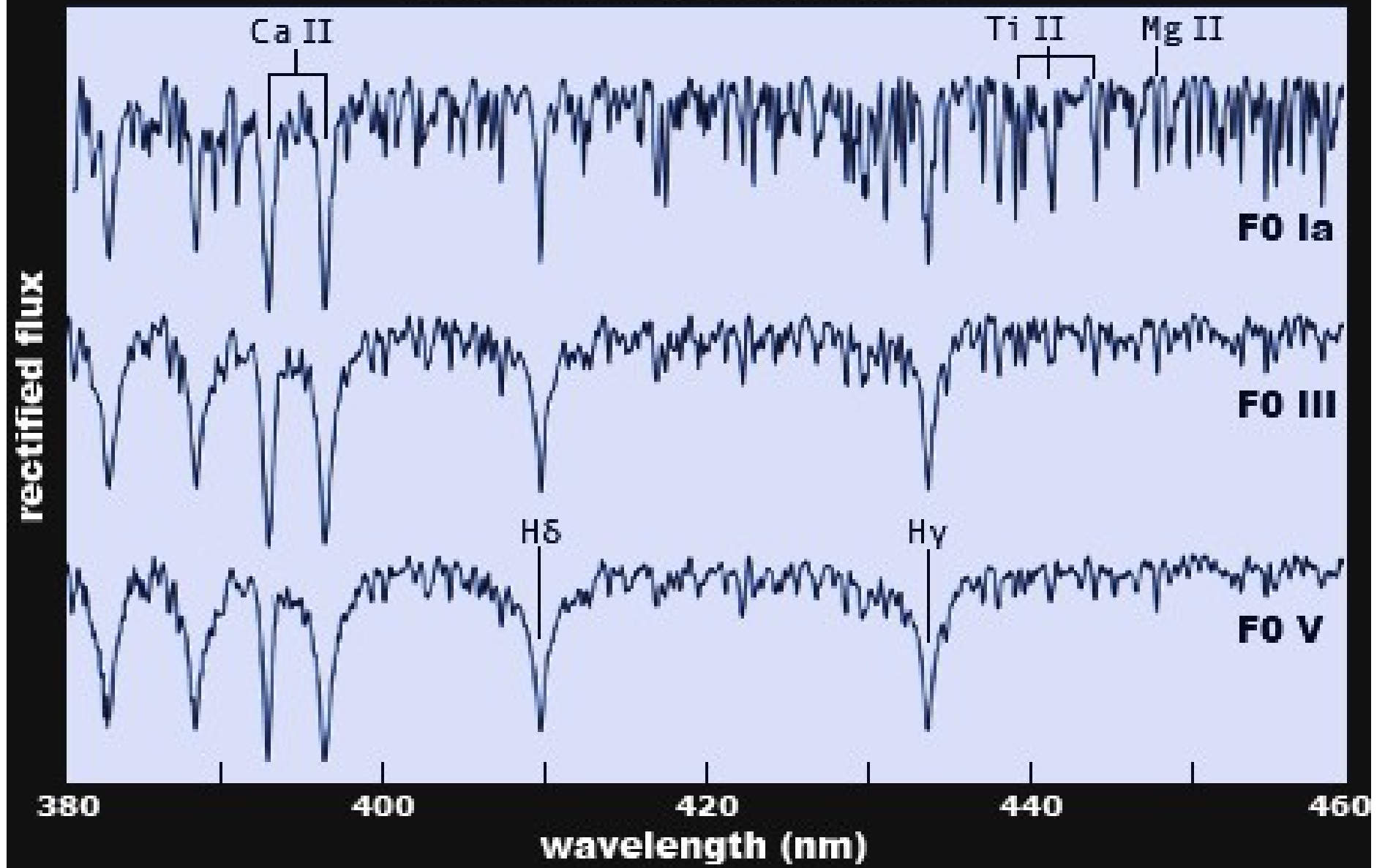
normalized flux



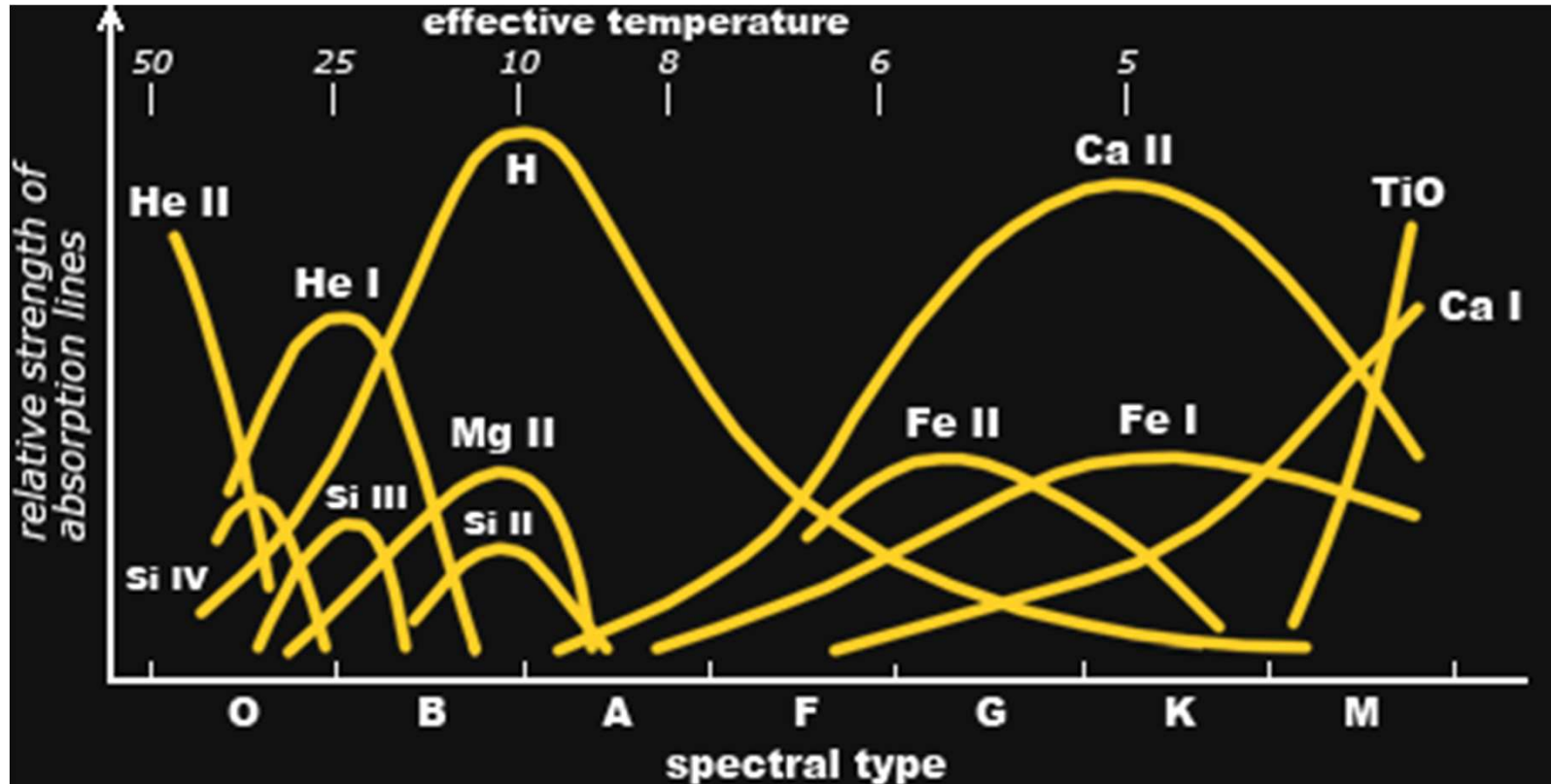
<https://lweb.cfa.harvard.edu/>

<https://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html>

luminosity (gravitational) effects



Εξάρτηση της έντασης γραμμών απορρόφησης από την ενεργό θερμοκρασία



<https://www.handprint.com/ASTRO/speccla ss.html>