

**Εργαστήριο Κατεύθυνσης Αστροφυσικής**

**Αστρονομική  
φασματοσκοπία**

**Θεωρητική εισαγωγή**

# Φασματοσκοπία

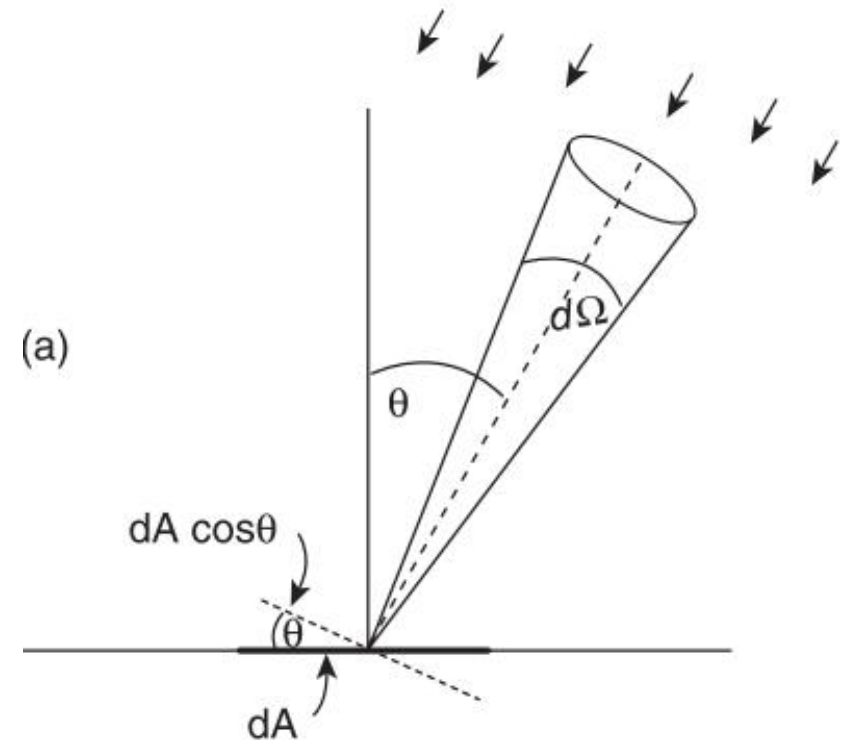
- Φάσμα = η ροή (ή η ένταση) ακτινοβολίας σαν συνάρτηση του μήκους κύματος (ή της συχνότητας)
- Στη φωτομετρία ολοκληρώνουμε σε μία περιοχή μηκών κύματος (που αντιστοιχεί στο φίλτρο που χρησιμοποιούμε) ενώ στη φασματοσκοπία έχουμε «συνεχή» δειγματοληψία ( $\Delta\nu \ll \nu$ ) σε μήκος κύματος ή συχνότητα
- 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  $\nu$  και σε γωνία παρατήρησης  $\theta$  (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 το εσωτερικό των άστρων, τις αστρικές ατμόσφαιρες, το μεσοαστρικό αέριο, τα μοριακά νέφη 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  $\nu$  σε μία στενή περιοχή συχνοτήτων (ή μήκους κύματος)  $\Delta\nu \ll \nu$ .  
π.χ. φάσμα απορρόφησης αστέρων, φάσματα εκπομπής νεφελωμάτων

Continuous Spectrum



Emission Lines

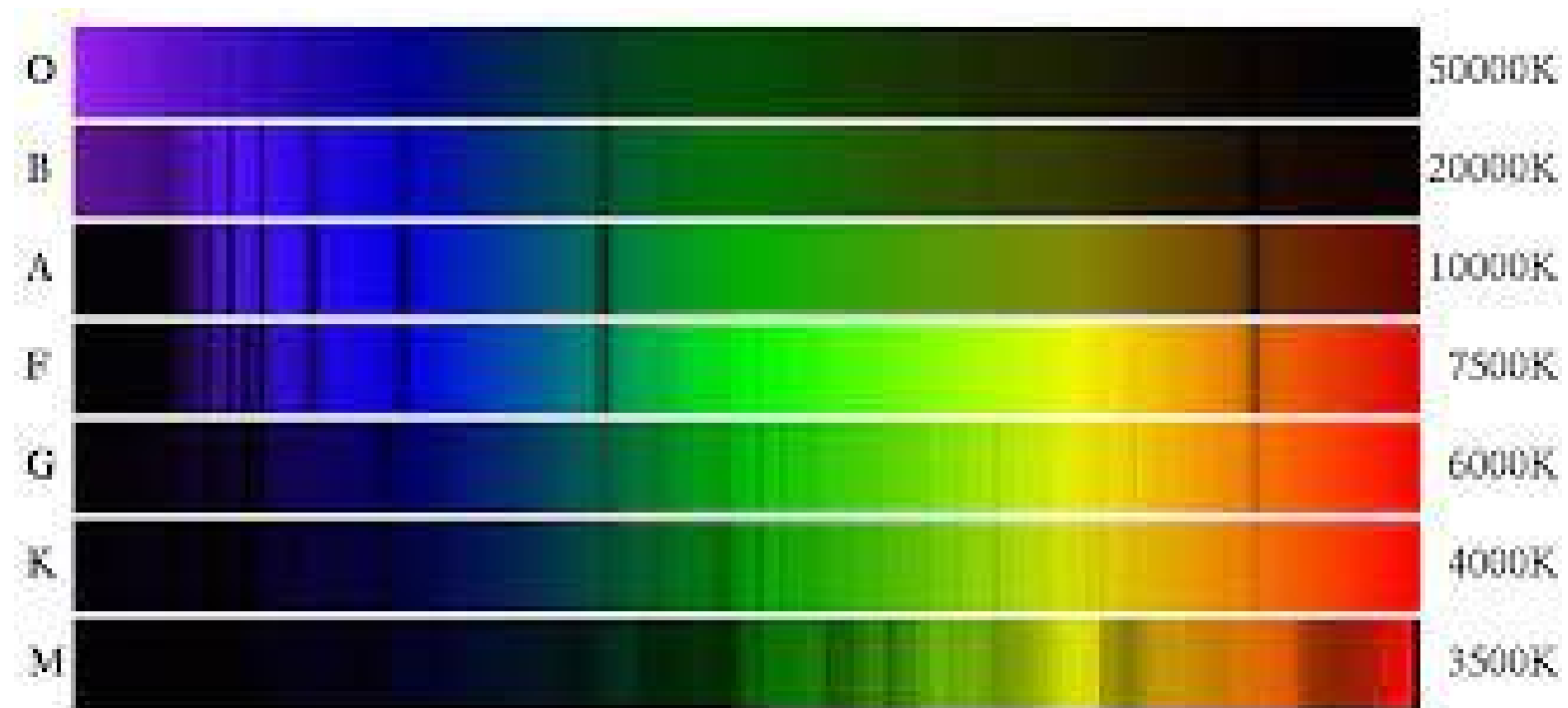


Absorption Lines



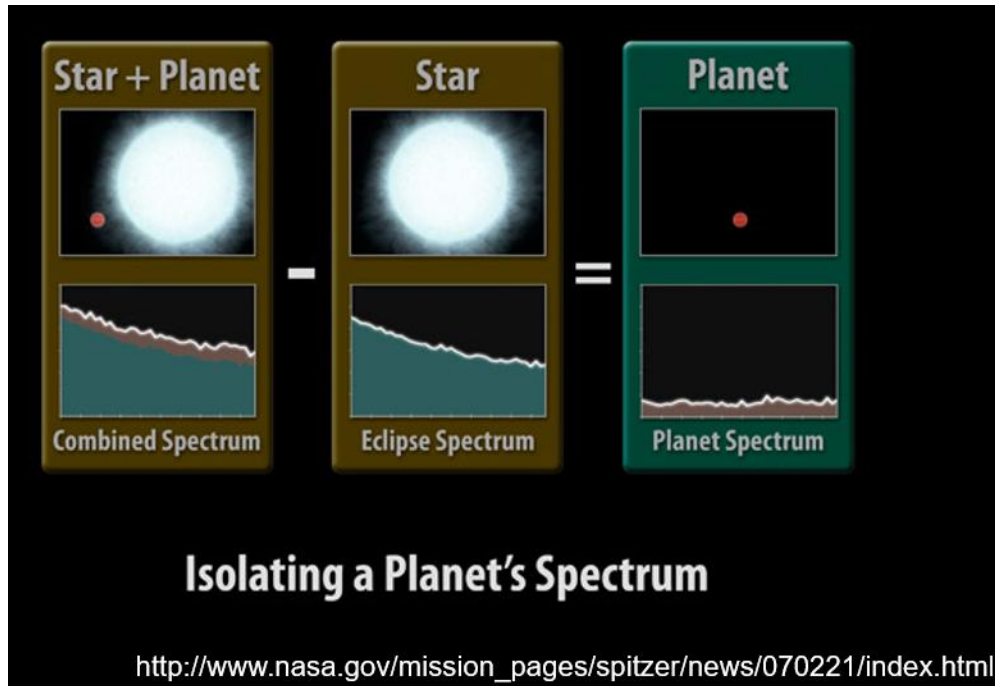
# Μεγάλη ποικιλία αστροφυσικών φασμάτων

## 1. Αστρικά Φάσματα – Φασματικοί τύποι

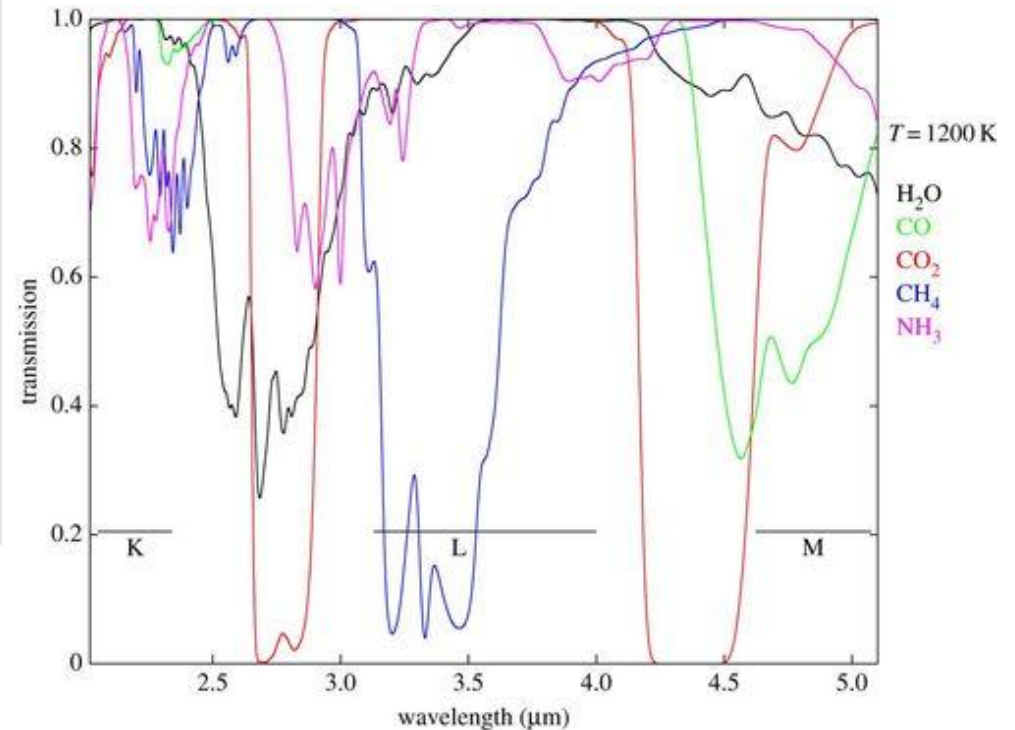


[https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/spectra\\_a\\_astro\\_types.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/spectra_a_astro_types.html)

# Φάσματα ατμοσφαιρών πλανητών



- Infrared transit spectroscopy of exoplanets
- Ανίχνευση μορίων



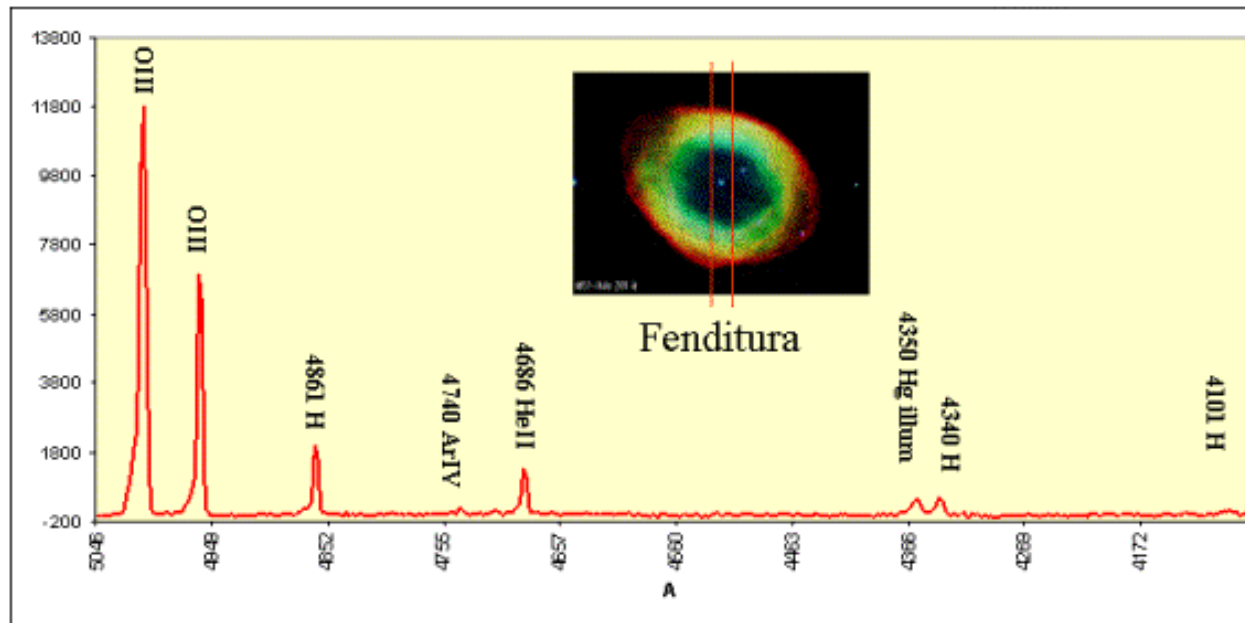
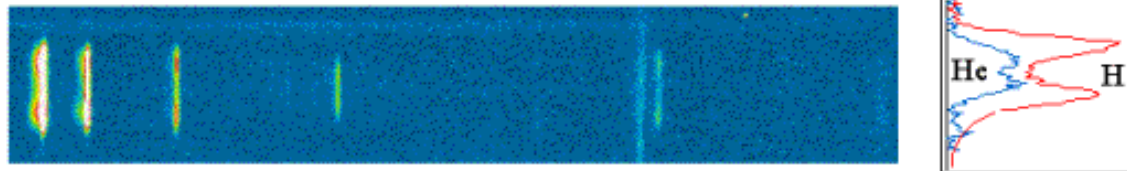
T. Encrenaz 2014

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



# Φάσματα πλανητικών νεφελωμάτων

M 57 visible spectrum



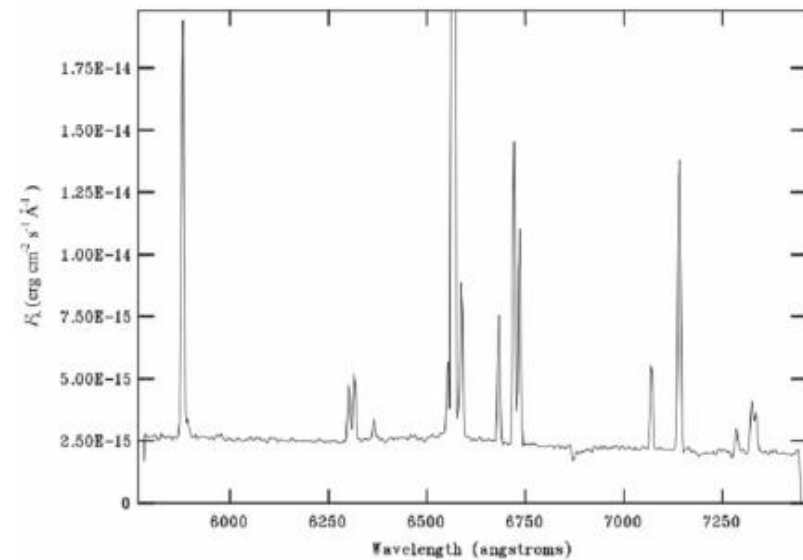
[https://www.astrogeo.va.it/astronom/spettri/neb\\_planen.htm](https://www.astrogeo.va.it/astronom/spettri/neb_planen.htm)

# HII regions



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

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



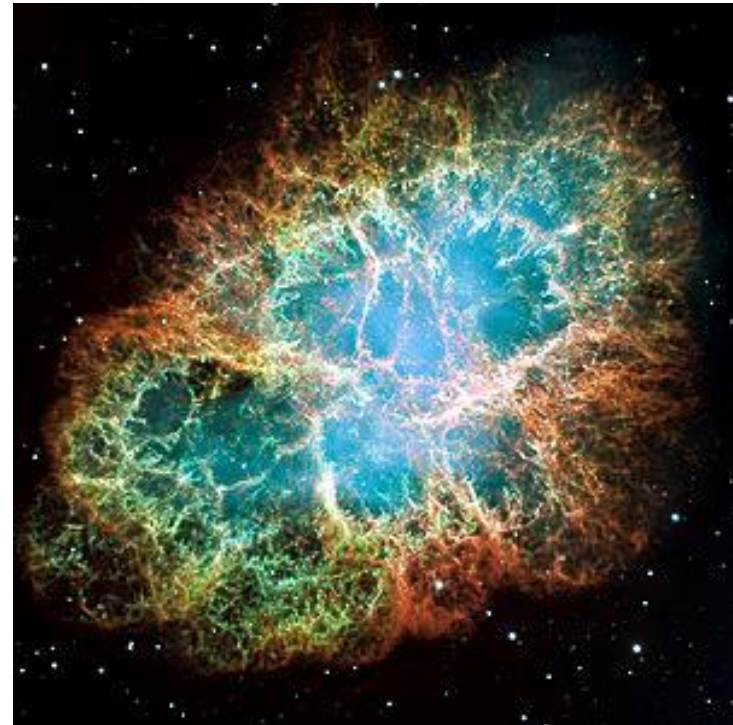
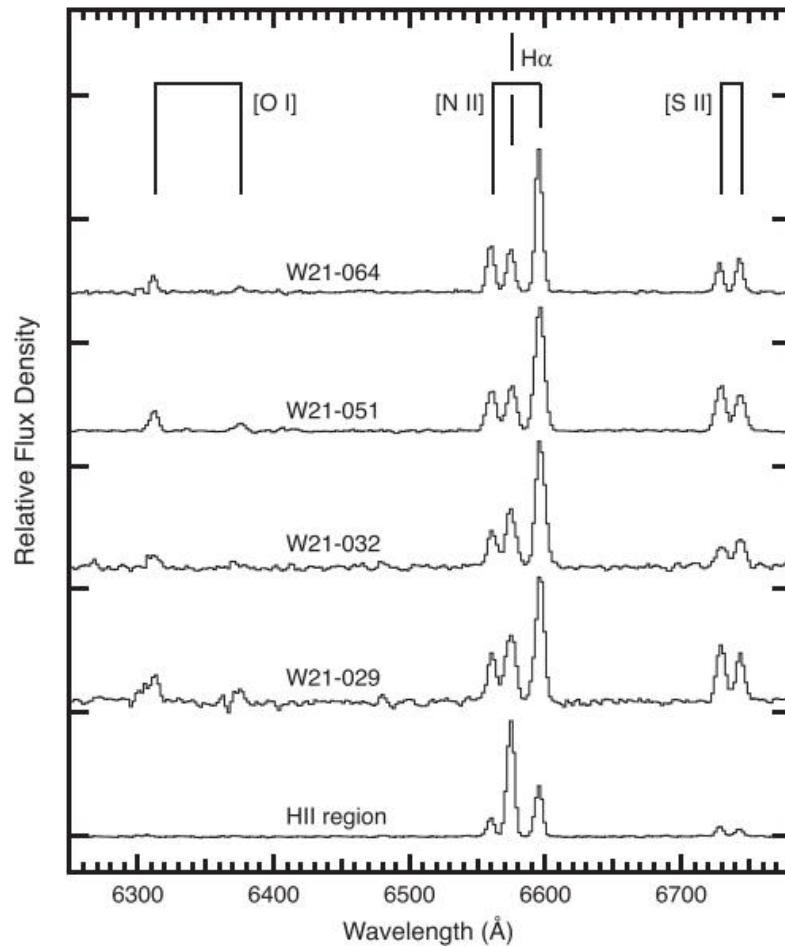
**Figure 1.** Blue and red spectra for region A of NGC 346 obtained at CTIO with the 4 m telescope and the R-C spectrograph. The figures have been taken from Peimbert et al. (2000). © AAS. Reproduced with permission.

Peimbert et al. 2017 PASP, 129:082001

Ασθενής συνεχής ακτινοβολία + ισχυρή γραμμική εκπομπή.  
Συνεχές: boundfree, free–free, two photon emission, dust scattered light  
Γραμμές εκπομπής: οι ισχυρότερες προκύπτουν από διέγερση λόγω συγκρούσεων (+ επανασύνδεση, φωτοδιέγερση).

# SN Remnants

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



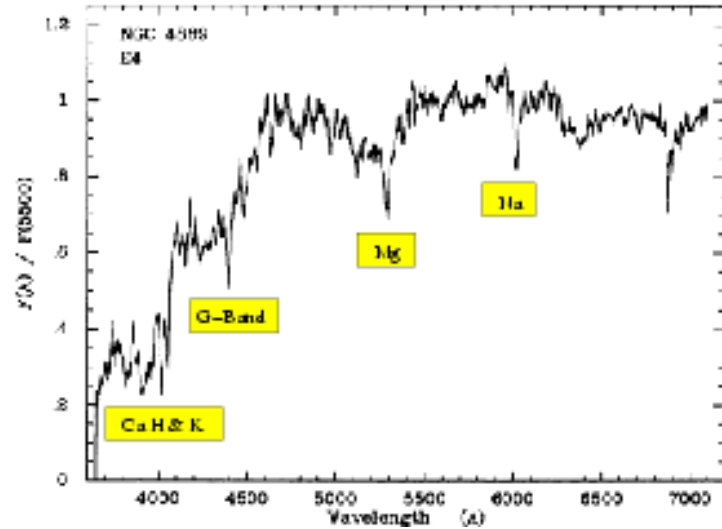
Crab nebula

[https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova\\_remnant](https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova_remnant)

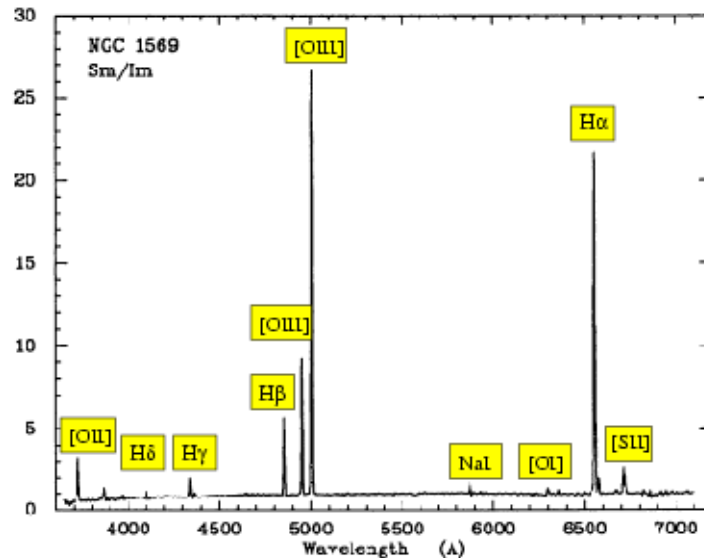
Οπτικά φάσματα (HST) SNRs στον M51, Winkler et al. 2021 ApJ 908:80

# Ολοκληρωμένα φάσματα γαλαξιών στο ορατό

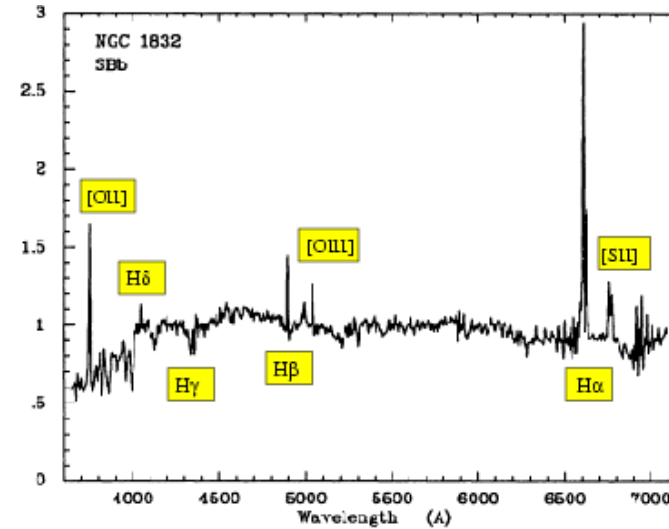
## Ελλειπτικοί γαλαξίες



## Ακανόνιστοι γαλαξίες



## Σπειροειδείς γαλαξίες



R.C. Kennicutt

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

SDSS DR17 [sdss.org](http://sdss.org)



# Φάσματα quasars

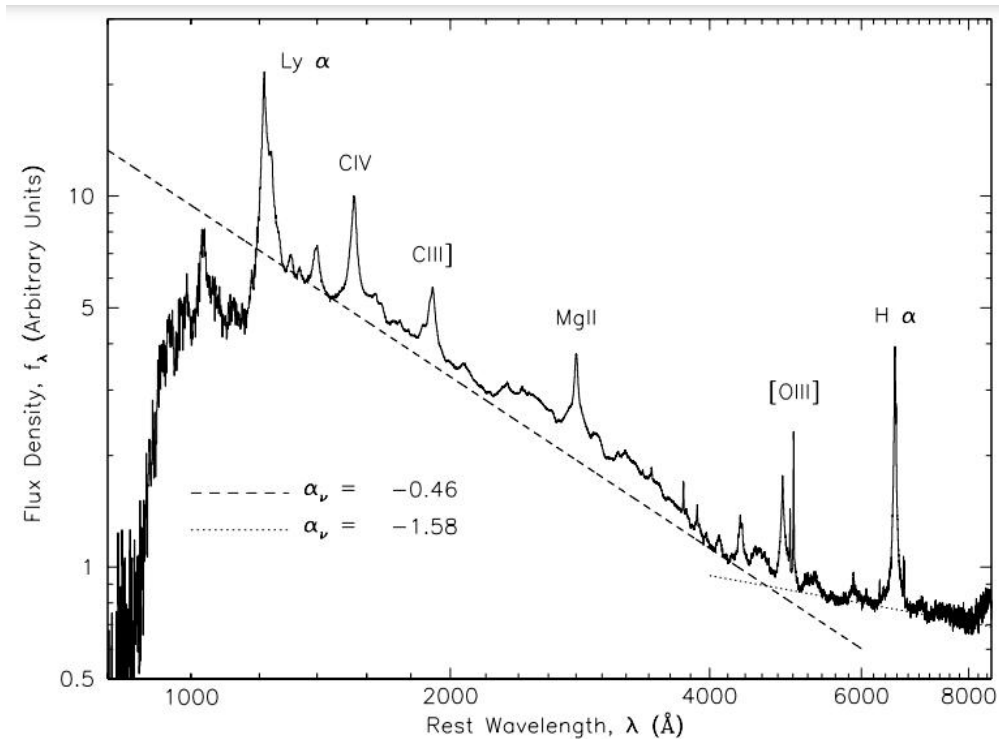
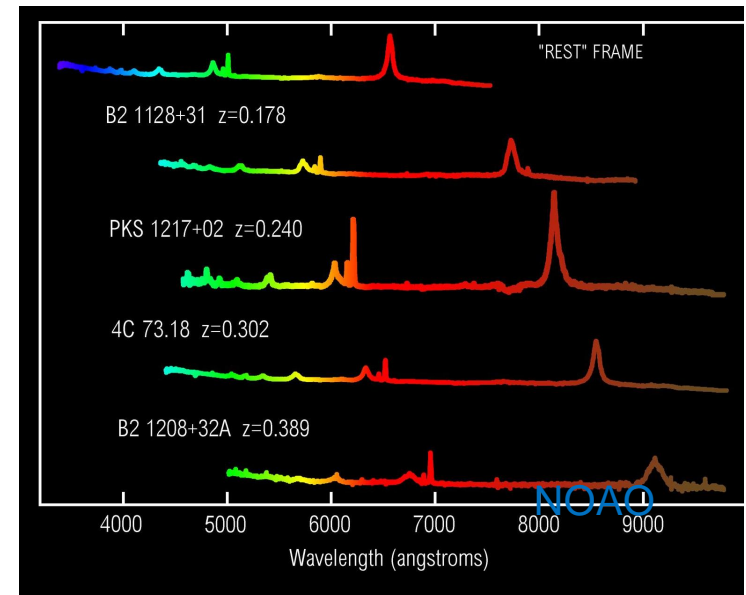


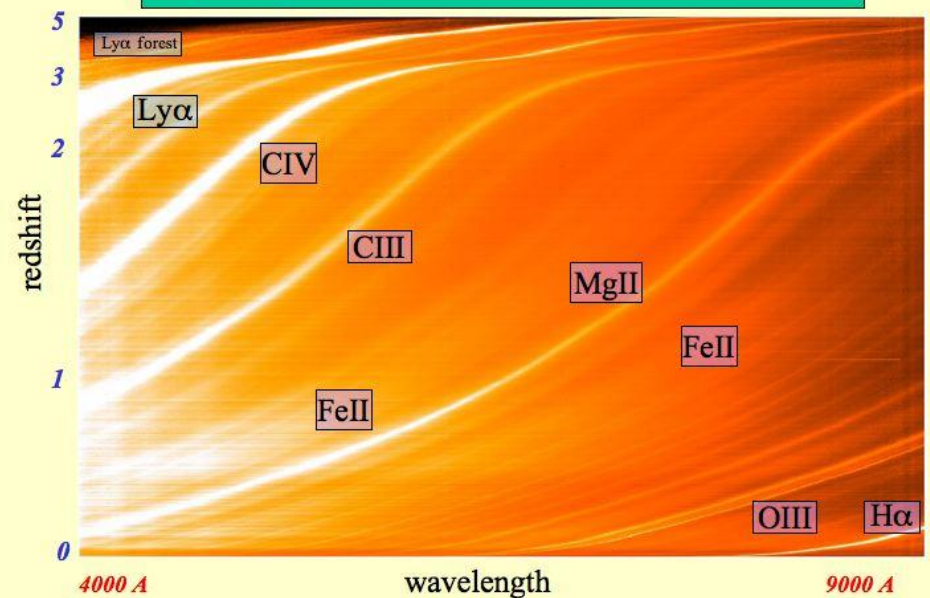
FIG. 3.—Composite quasar spectrum using median combining. Power-law fits to the estimated continuum flux are shown. The resolution of the input spectra is  $\approx 1800$ , which gives a wavelength resolution of about  $1 \text{ \AA}$

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



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

46,420 Quasars from the SDSS Data Release Three



# Οι κυριότερες φασματικές μεταβάσεις και οι αντίστοιχες συχνότητες

- Η ποσοτική περιγραφή υλικών συστημάτων , αποδίδει διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις/ενεργειακά επίπεδα,  $E_i$  στα συστήματα αυτά → 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 <sub>2</sub> 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                   | <sup>12</sup> C line at 15.11 keV   |
| Annihilations                                       | $\approx 10^4$        | γ rays                         | Positronium line at 511 keV   |

# Ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός φάσματος

Ένα φάσμα περιλαμβάνει μία συνεχή συνιστώσα  $I_c$ , που μεταβάλλεται αργά με το  $\nu$  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:

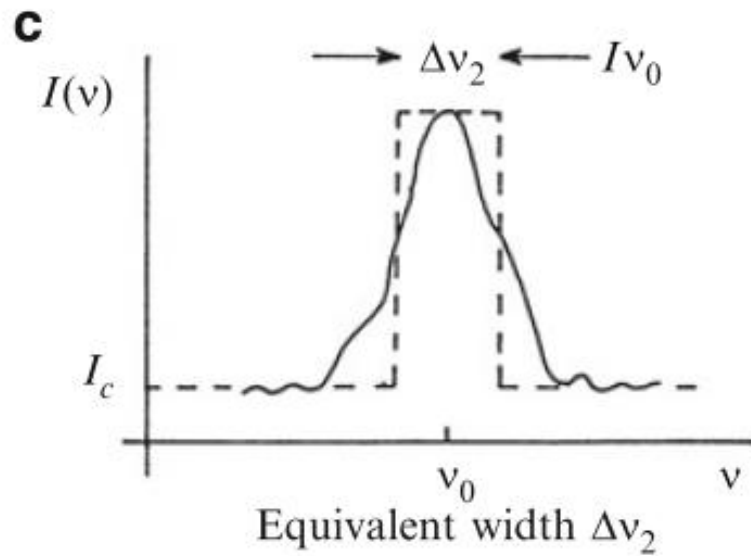
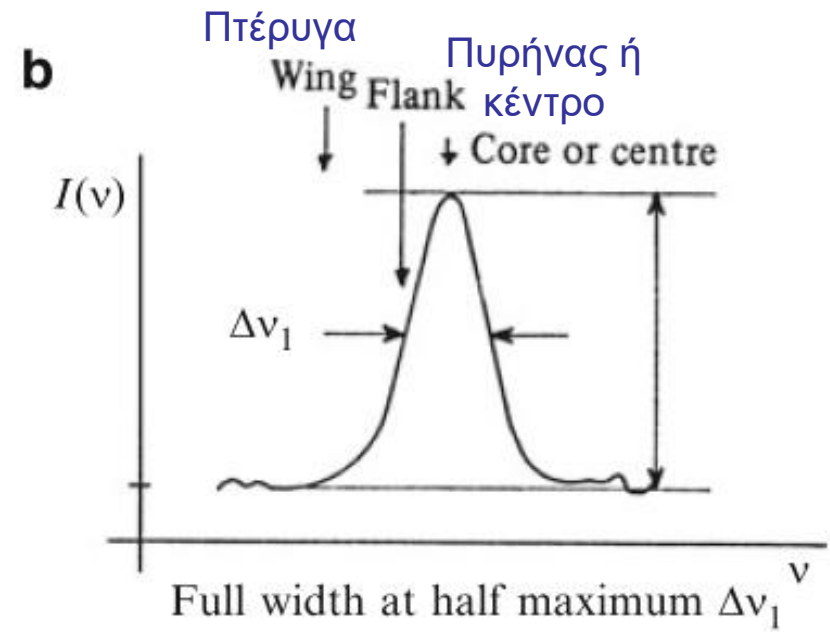
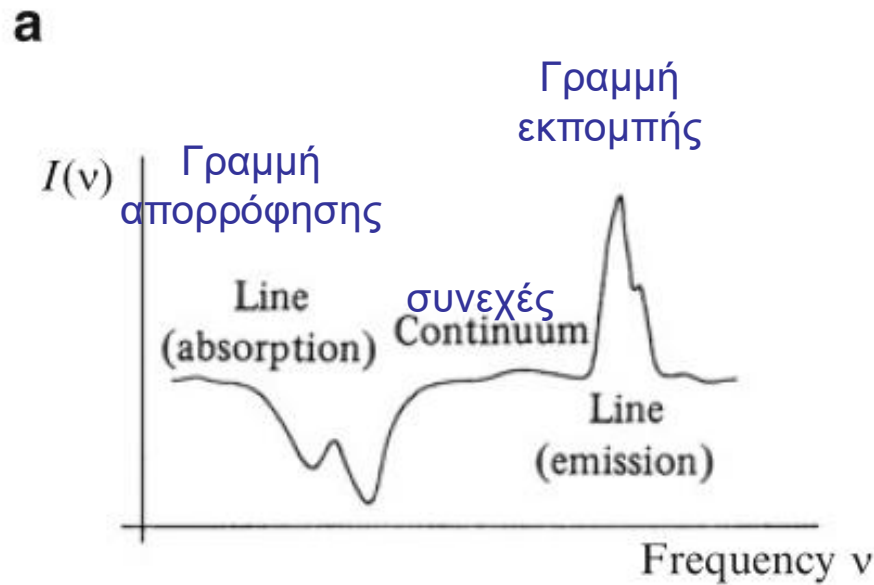
- το συνολικό πλάτος στο μισό του μεγίστου (full width at half maximum)
- το ισοδύναμο πλάτος (equivalent width),
- η σχετική ένταση (relative intensity)

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

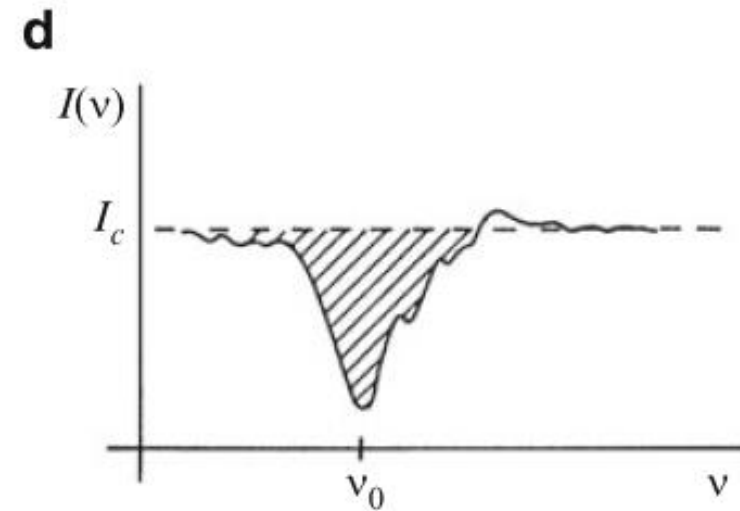
- **Ένταση γραμμής (line intensity)**. Η συνολική ισχύς που περιλαμβάνεται στη γραμμή, αφαιρώντας τη συμμετοχή από το συνεχές. Η σχετική ένταση συγκρίνει τη γραμμή με το συνεχές.
- **Θέση γραμμής (line position)** Δίνει τη θέση του μεγίστου του  $I(\nu)$  για γραμμή εκπομπής και του ελάχιστου για γραμμή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





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

Ισοδύναμο πλάτος



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

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

Σχετική ένταση

# 1. Θέση (του κέντρου) της γραμμής

- Η θέση  $\nu_0$  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**

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

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

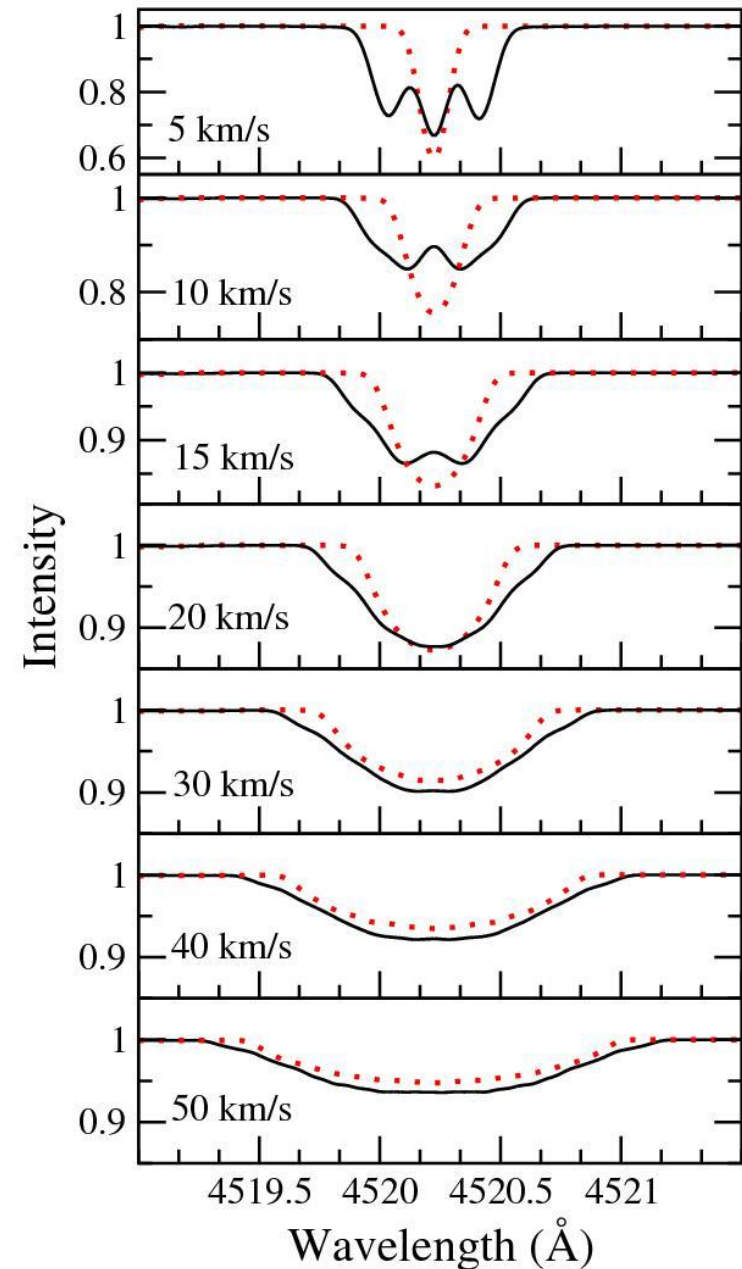
Όταν η γραμμή στη συχνότητα  $\nu_0$  παράγεται με παρουσία μαγνητικού πεδίου, εμφανίζονται τα υποεπίπεδα Zeeman και αντίστοιχες συστάδες γραμμών με διαφορετικές συχνότητες και πολώσεις.

Π.χ. Για το ομαλό φαινόμενο Zeeman, εμφανίζονται 3 συνιστώσες,  $\nu_0$ , και  $\nu_0 \pm \Delta\nu$  με

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

(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  $\nu_0$  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  $\nu_0$

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

- 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 lines** 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  $\sigma$  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  $\tau$  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

---

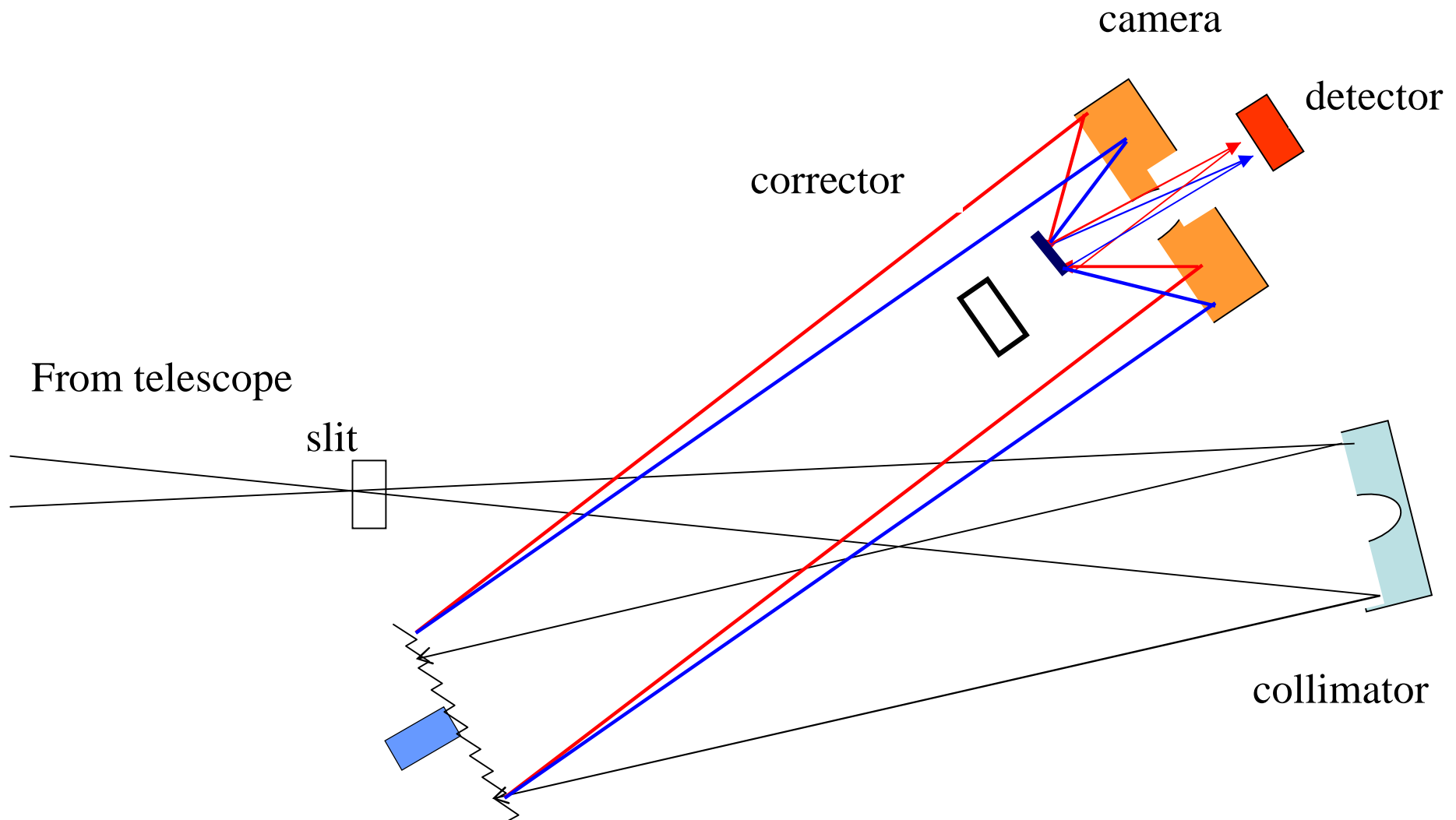
Zeeman components, polarisation

# Φασματογράφοι

# 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

# Spectrographs



# 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.

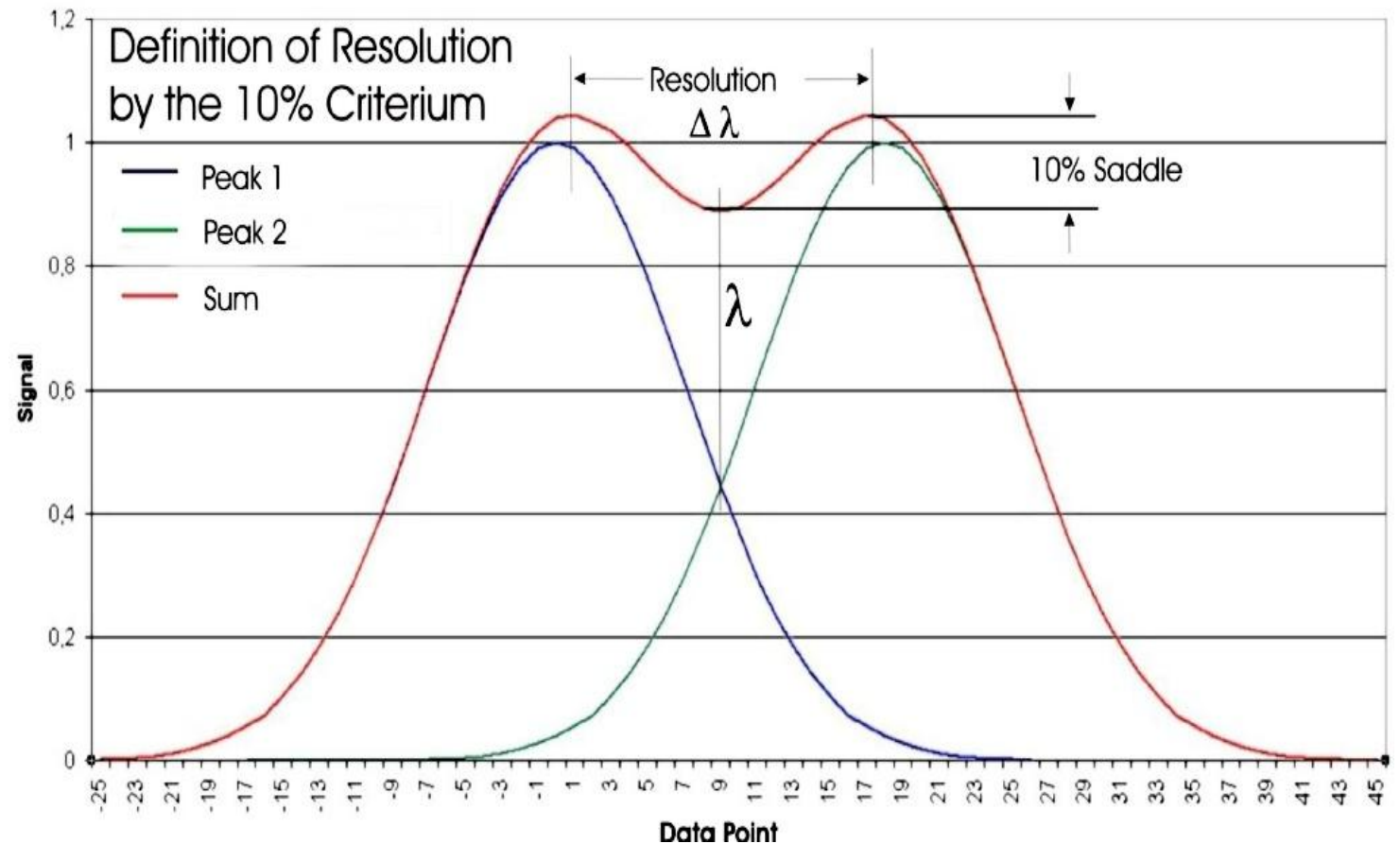
$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

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

$$R/I = 500 - 1000$$

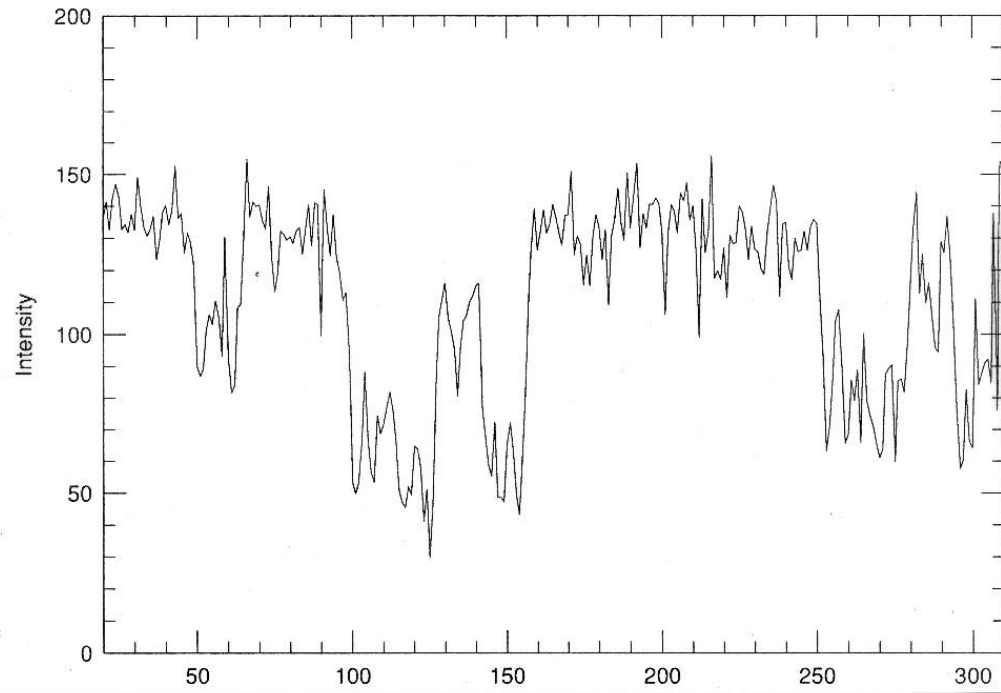
2. Εκρήξεις SN:

Ταχύτητες διαστολής  $\sim 3000$  km/s

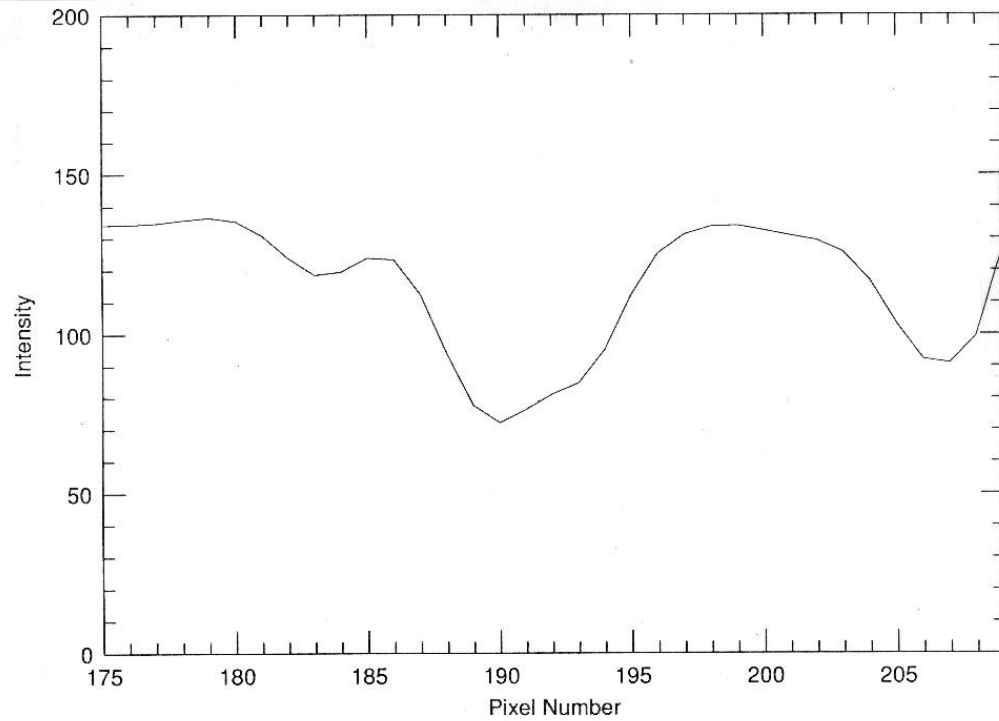
$$d\lambda/\lambda = v/c = 3000/3 \times 10^5 = 0.01$$

$$R/P > 100$$

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 <sup>1</sup> |
|--------|-------------------|-----------------|
| A0     | 150               | 2000            |
| F0     | 80                | 3750            |
| F5     | 25                | 12000           |
| G0     | 3                 | 100000          |
| K      | 1                 | 300000          |

<sup>1</sup> 2 pixel resolution, 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.:

$\text{Li}^7$  : 6707.76

$\text{Li}^6$  : 6707.92

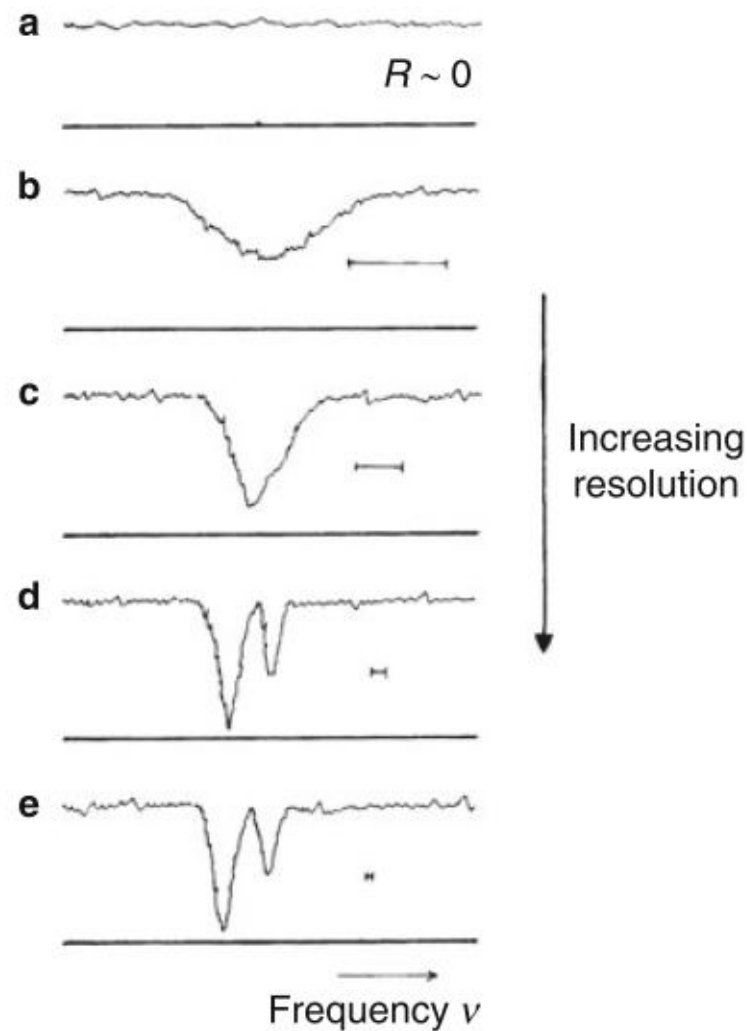
R > 200.000

7 Προφίλ γραμμών (pulsations, spots, convection):

$R=100.000 - 200.000$

→ Απαιτείται η εύρεση αμυδρών παραμορφώσεων στα προφίλ των φασματικών γραμμών

# Η επιδραση της διακριτικής ισχύος The effect of resolution on an absorption line



# Τυπικές τιμές διακριτικής ισχύος για διάφορα είδη φασματογράφων

| Spectrometer            | Region            | Typical resolution |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| Interference filter     | Visible, IR       | $10^2-10^3$        |
| Grating                 | IR, visible, UV   | $10^3-10^6$        |
| Bragg crystal           | X ray             | $10^3$             |
| Atomic resonance        | Visible, UV       | $10^7$             |
| Fabry–Pérot             | Visible, IR       | $10^4-10^6$        |
| Fourier transform       | Visible, IR       | $10^4-10^6$        |
| Heterodyne              | Radiofrequencies  | $> 10^6$           |
|                         | IR, submillimetre | $> 10^5$           |
| Bolometer (detector)    | X ray             | $10^2$             |
| Scintillator (detector) | $\gamma$ ray      | $10^3$             |

# Διασπορά (dispersion)

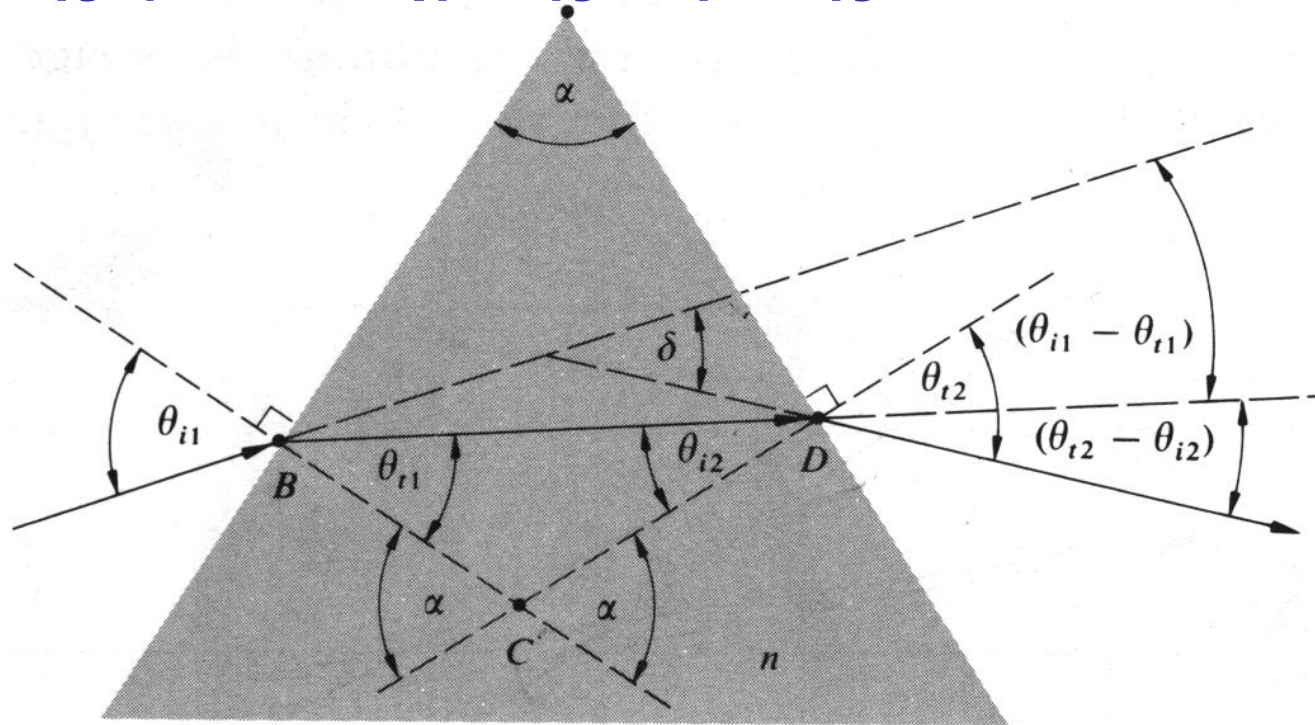
Μπορεί να επιτευχθεί με:

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



**Φασματογράφοι πρίσματος:**  
 βασίζονται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος

**Γωνία εκτροπής, γωνία ελάχιστης εκτροπής**



Εκτροπή στη πρώτη επιφάνεια

$$\theta_{i1} - \theta_{r1}$$

Εκτροπή στην δεύτερη διαχωριστική επιφάνεια

$$\theta_{t2} - \theta_{i2}$$

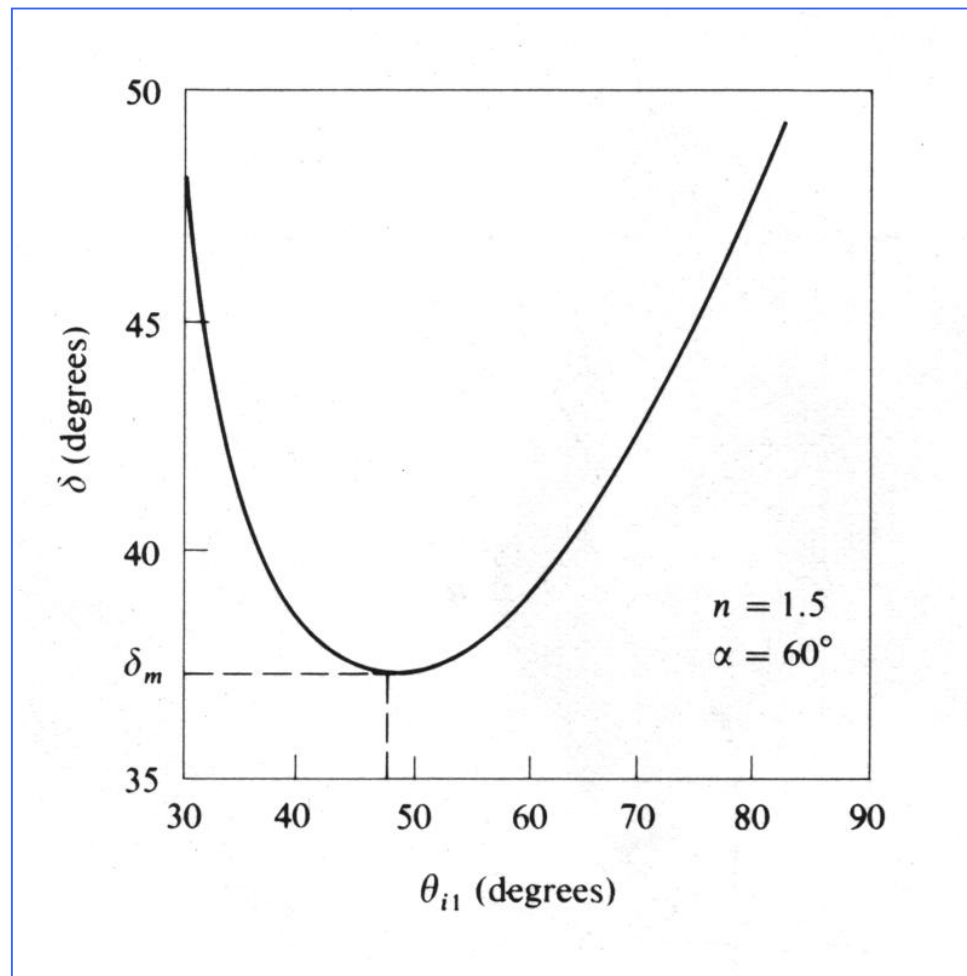
Συνολική γωνιακή εκτροπή

$$\delta = (\theta_{i1} - \theta_{r1}) + (\theta_{t2} - \theta_{i2})$$

ABCD περιέχει δύο ορθές γωνίες άρα  $\widehat{BCD} + a = 180^\circ$

Εξωτ.γων.  $\alpha = \theta_{t1} + \theta_{i2}$  άρα  $\delta = \theta_{i1} + \theta_{t2} - \alpha$

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



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

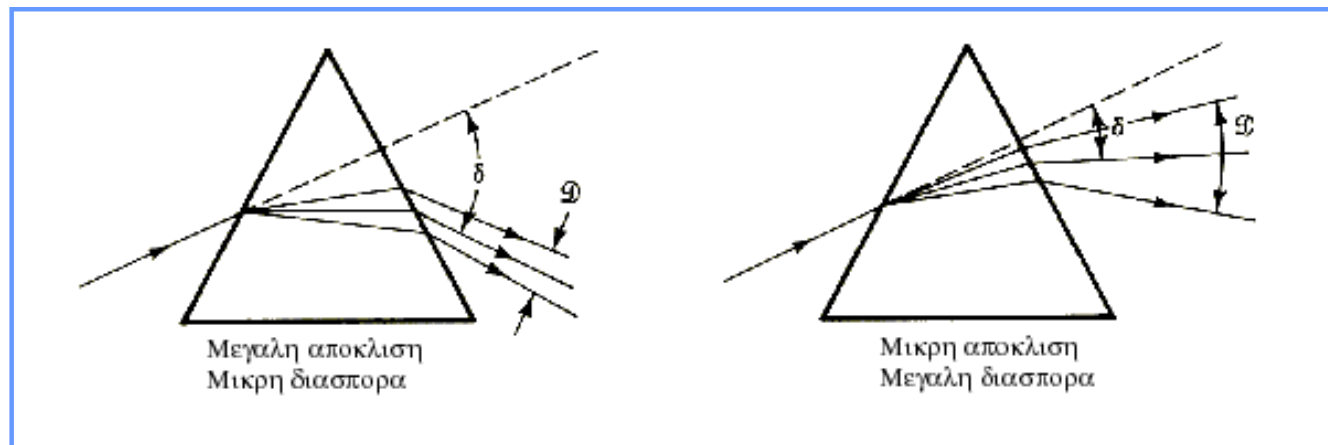
$$n = \frac{\sin[(\delta_m + \alpha) / 2]}{\sin \alpha/2}$$

Συνήθως, χρησιμοποιούνται μόνο οι δύο πρώτοι όροι του αναπτύγματος.

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

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

### διαφορά μεταξύ διασποράς και εκτροπής



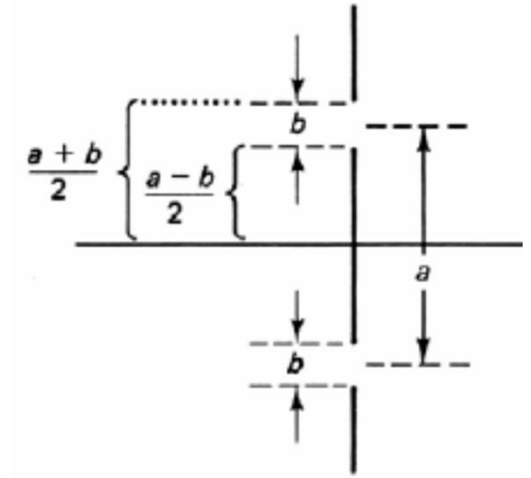
Μπορεί πρίσμα από υλικό με μεγάλο  $n$  να προκαλέσει μεγάλη εκτροπή σε δεδομένο μήκος κύματος, χωρίς ο διαχωρισμός μεταξύ γειτονικών μηκών κύματος να είναι μεγάλος

# Φράγμα περίθλασης

## Περίθλαση από πολλές σχισμές

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

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



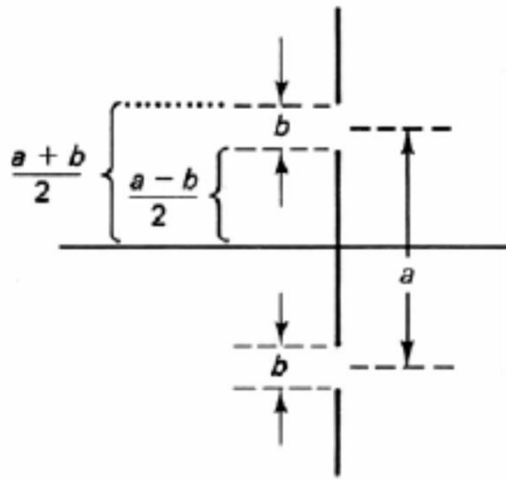
$$E_R = \frac{E_L}{r_o} \sum_{j=1}^{N/2} \left\{ \int_{[-(2j-1)a-b]/2}^{[-(2j-1)a+b]/2} e^{isk \sin \theta} ds + \int_{[(2j-1)a-b]/2}^{[(2j-1)a+b]/2} e^{isk \sin \theta} ds \right\}$$

Καθώς το  $j$  αυξάνεται ένα ζεύγος σχισμών τίθεται κάτω από την αρχή του άξονα και επάνω (πρώτο και δεύτερο ολοκλήρωμα). Όταν  $j=N/2$  όλες οι σχισμές έχουν υπολογισθεί.

$$K = \frac{1}{ik \sin \theta} \left\{ e^{-ik \sin \theta [(2j-1)a-b]/2} - e^{-ik \sin \theta [(2j-1)a+b]/2} \right\} + \frac{1}{ik \sin \theta} \left\{ e^{ik \sin \theta [(2j-1)a+b]/2} - e^{ik \sin \theta [(2j-1)a-b]/2} \right\}$$

$$K = \frac{b}{2i\beta} \left[ e^{-i(2j-1)\alpha} (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) + e^{i(2j-1)\alpha} (e^{i\beta} - e^{-i\beta}) \right]$$

# 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 παράγον  $\beta$  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  $\pi$ , η έκφραση γίνεται απροσδιόριστη. Εφαρμόζοντας τον κανόνα του L' Hospital για  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  έχουμε

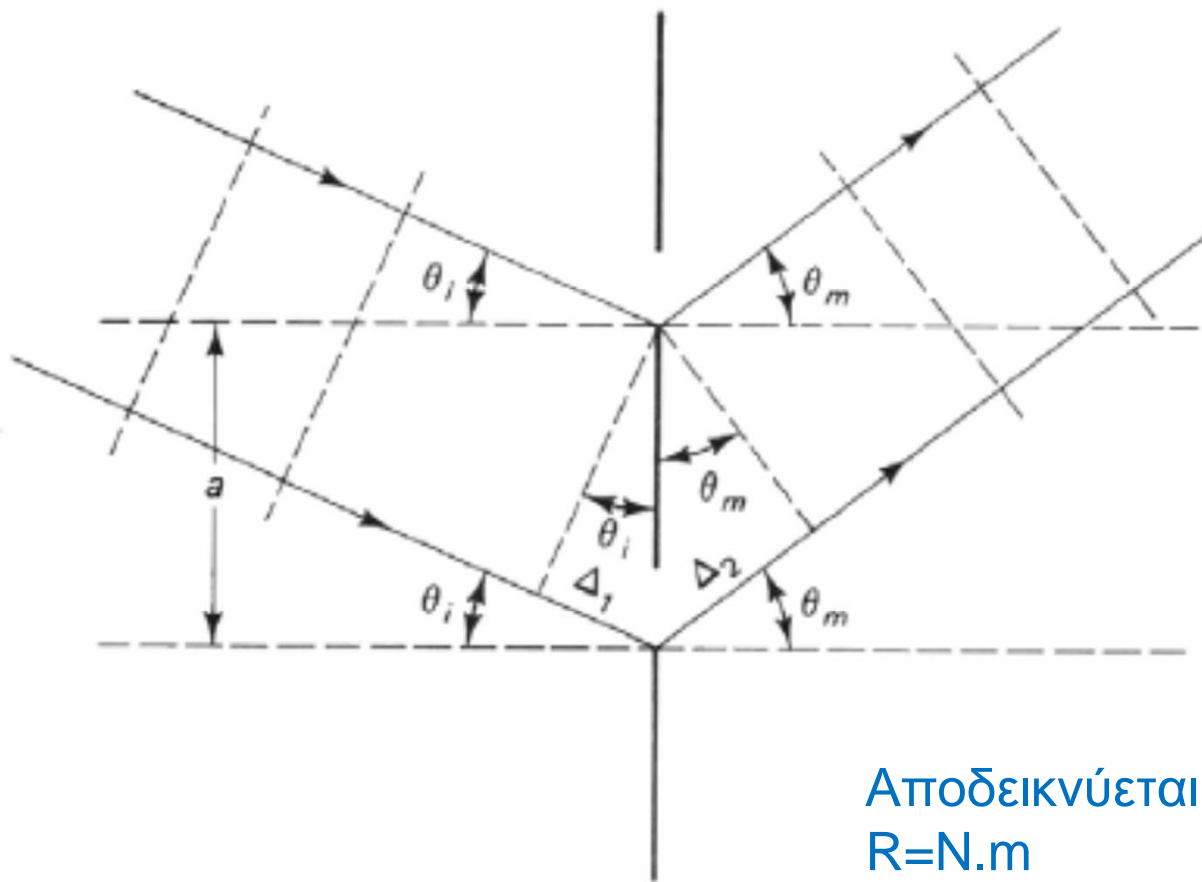
$$\lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} = \lim_{\alpha \rightarrow m\pi} \frac{N \cos N\alpha}{\cos \alpha} = \pm N$$

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  $p=0, \pm N, \pm 2N, \dots$

# 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:

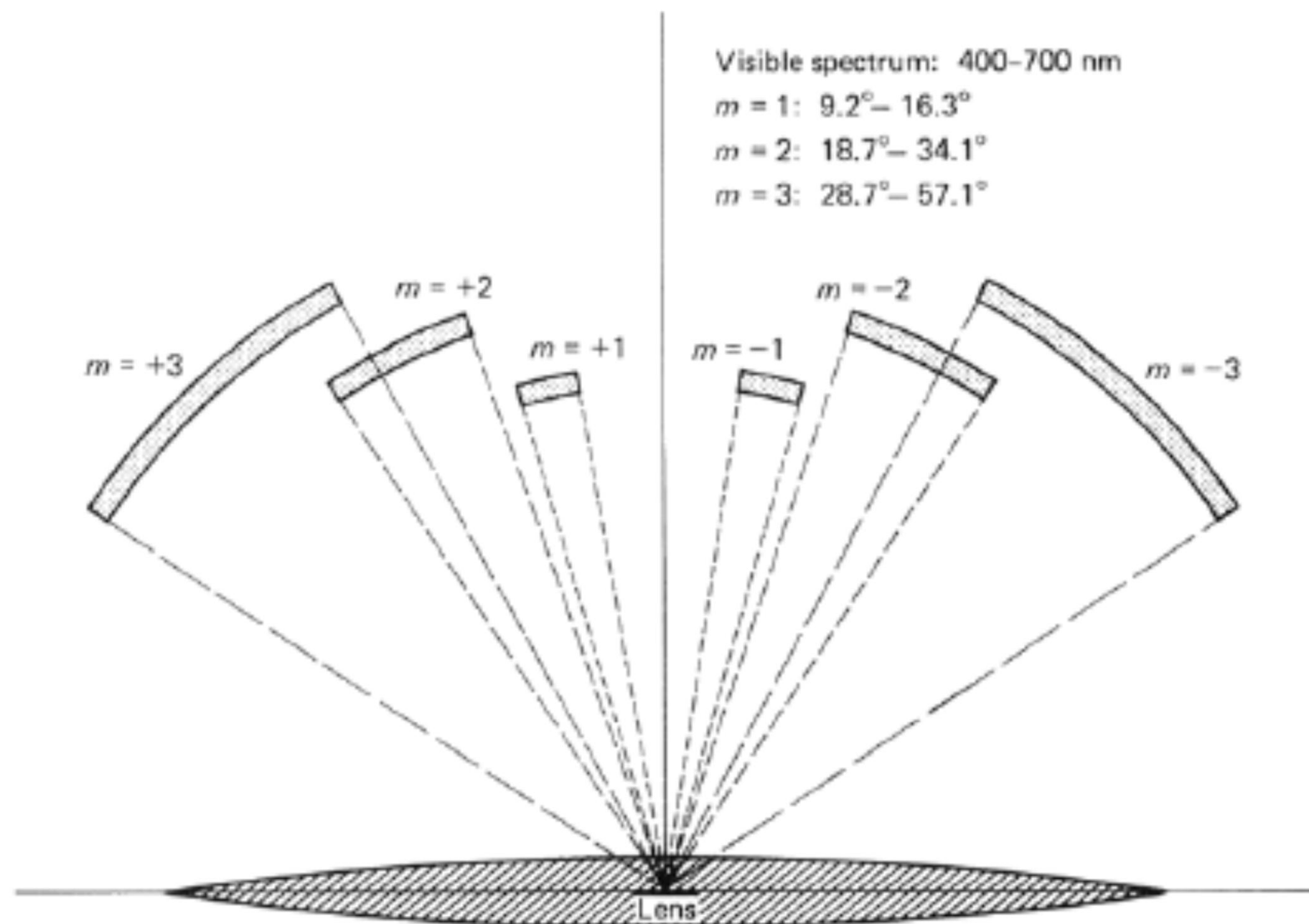
$$a(\sin\theta_i + \sin\theta_m) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Visible spectrum: 400–700 nm

$m = 1$ :  $9.2^\circ - 16.3^\circ$

$m = 2$ :  $18.7^\circ - 34.1^\circ$

$m = 3$ :  $28.7^\circ - 57.1^\circ$



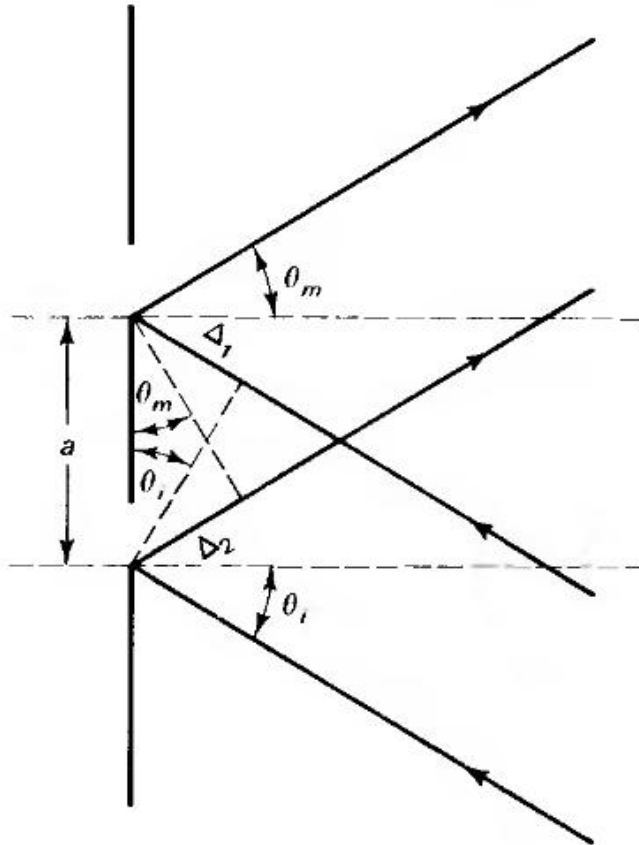
(B)

# Είδη φραγμάτων

- **Transmission gratings**
  - Amplitude grating: periodic transmission by grooves that are the clear sections in a glass blank
  - Phase grating: light transmitted by entire area but phase varies due to varying optical thickness of grooves
- **Reflection gratings**
  - groove faces made of highly reflecting material and the periodic reflection of the incident light operates like the periodic transmission of waves in the transmission grating



# Reflection gratings



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

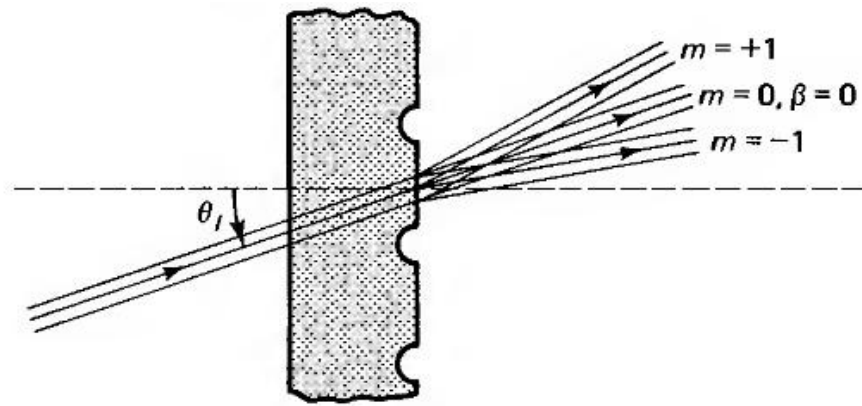
$\Delta = m\lambda$  an interference principal maximum

grating equation

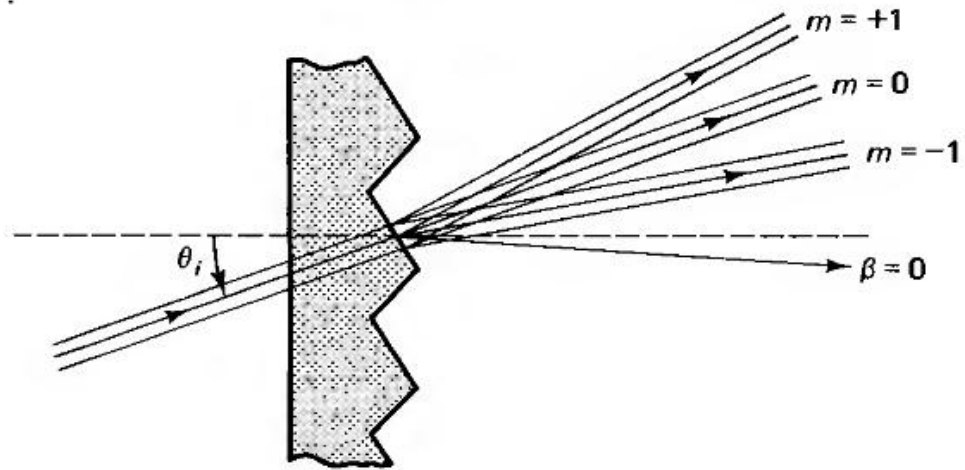
$$m\lambda = a(\sin \theta_i + \sin \theta_m)$$

# Blazed gratings

- **absolute efficiency of a grating in given  $\lambda$ -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

### Συνήθη φράγματα διαποράς:

- 600-1200 γραμμές/mm
- χρησιμοποιούνται σε μικρή blaze angle ( $\sim 10-20^\circ$ )
- τάξη συμβολής  $m=1-3$

### Φράγματα Echelle:

- 32-80 γραμμές/mm
- χρησιμοποιούνται σε μεγάλη blaze angle ( $\sim 65^\circ$ )
- τάξη συμβολής  $m=50-120$

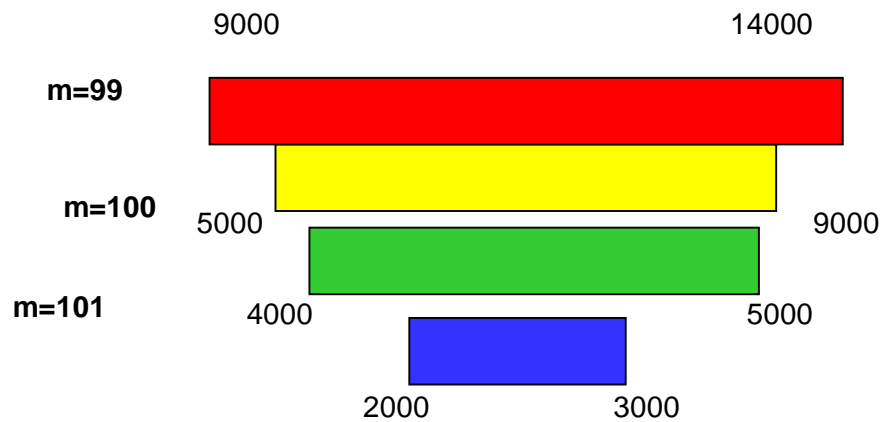
|                     | $m$ | $1/\sigma$ (mm) | $\delta$ ( $^\circ$ ) |
|---------------------|-----|-----------------|-----------------------|
| First-order grating | 1   | 1200            | 17.5                  |
| Echelle             | 45  | 79              | 63.5                  |

$\alpha = \delta + \theta, \quad \beta = \delta - \theta, \quad \theta > 0 \text{ if } \alpha > \beta$

Both satisfy grating equation for  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$

# Φράγμα 79 mm<sup>-1</sup>

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



Στη πραγματικότητα:

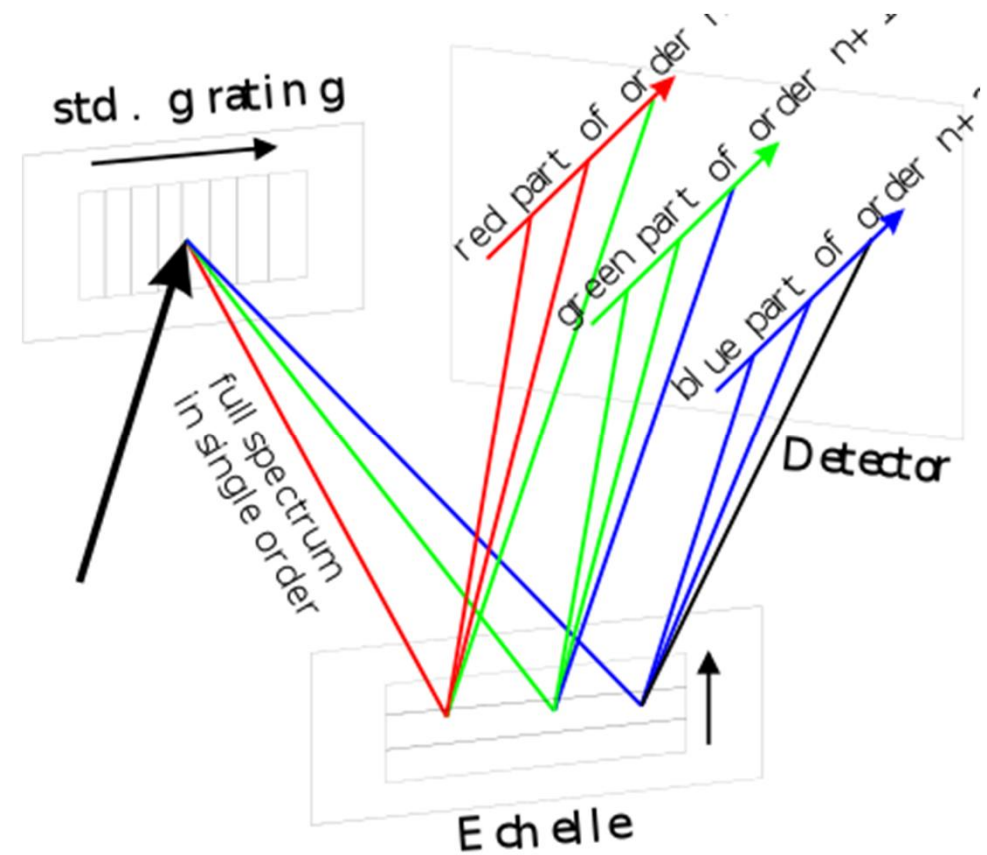


Λύση 1: φίλτρα συμβολής (interference filters)

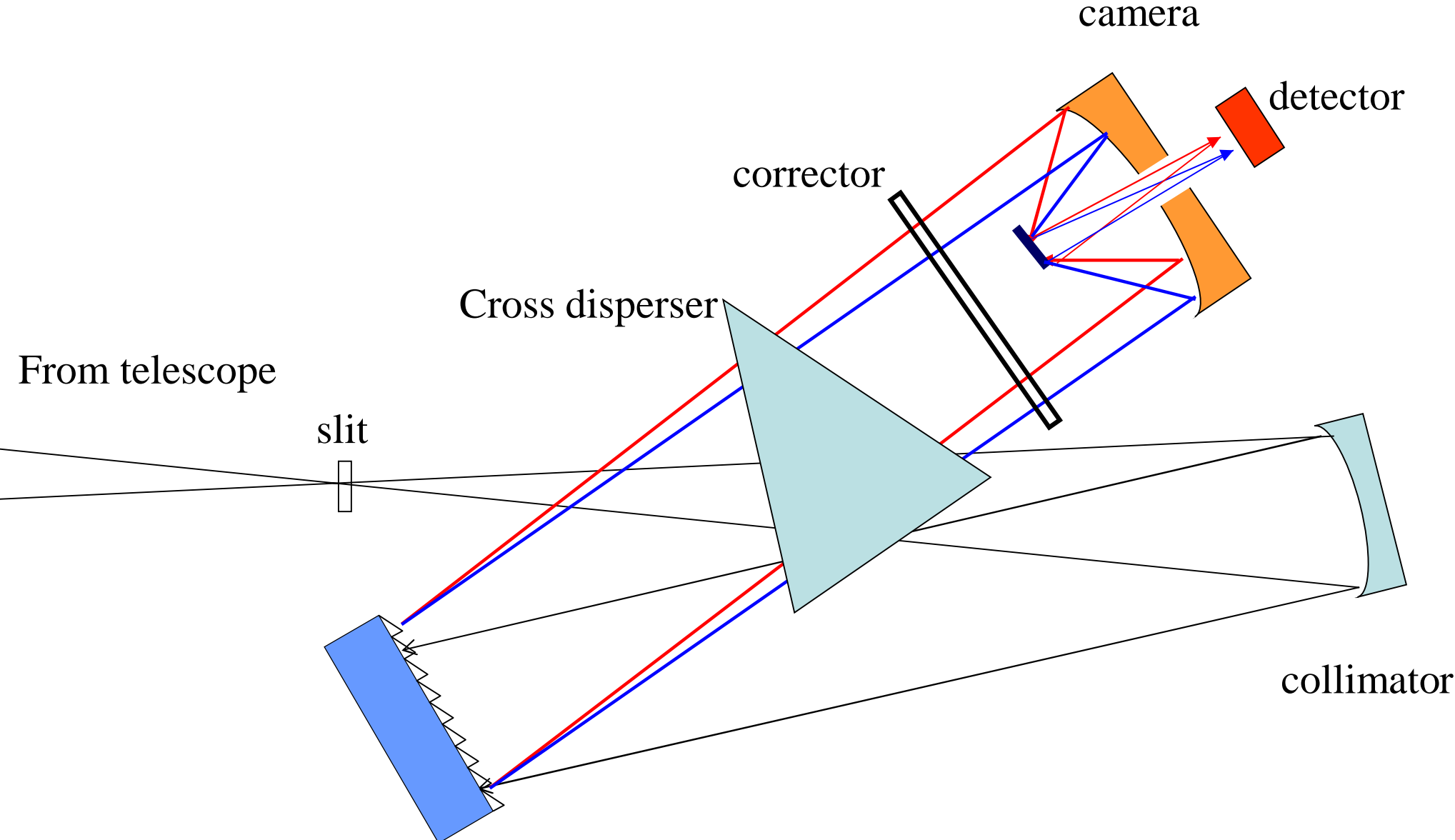
Λύση 2: cross-disperser  φασματογράφος echelle

# 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



# Echelle Spectrographs







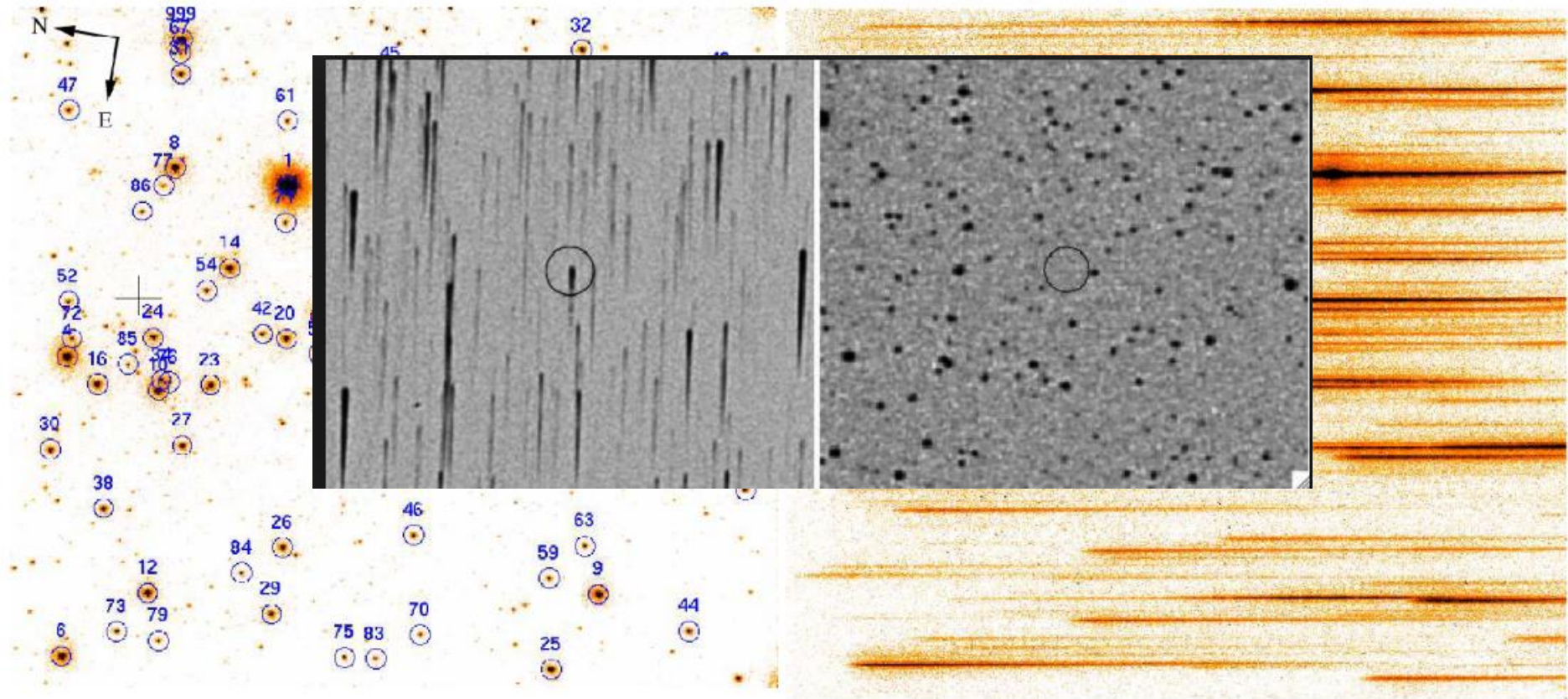
# Φασματογράφοι πολλαπλών αντικειμένων

## 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)

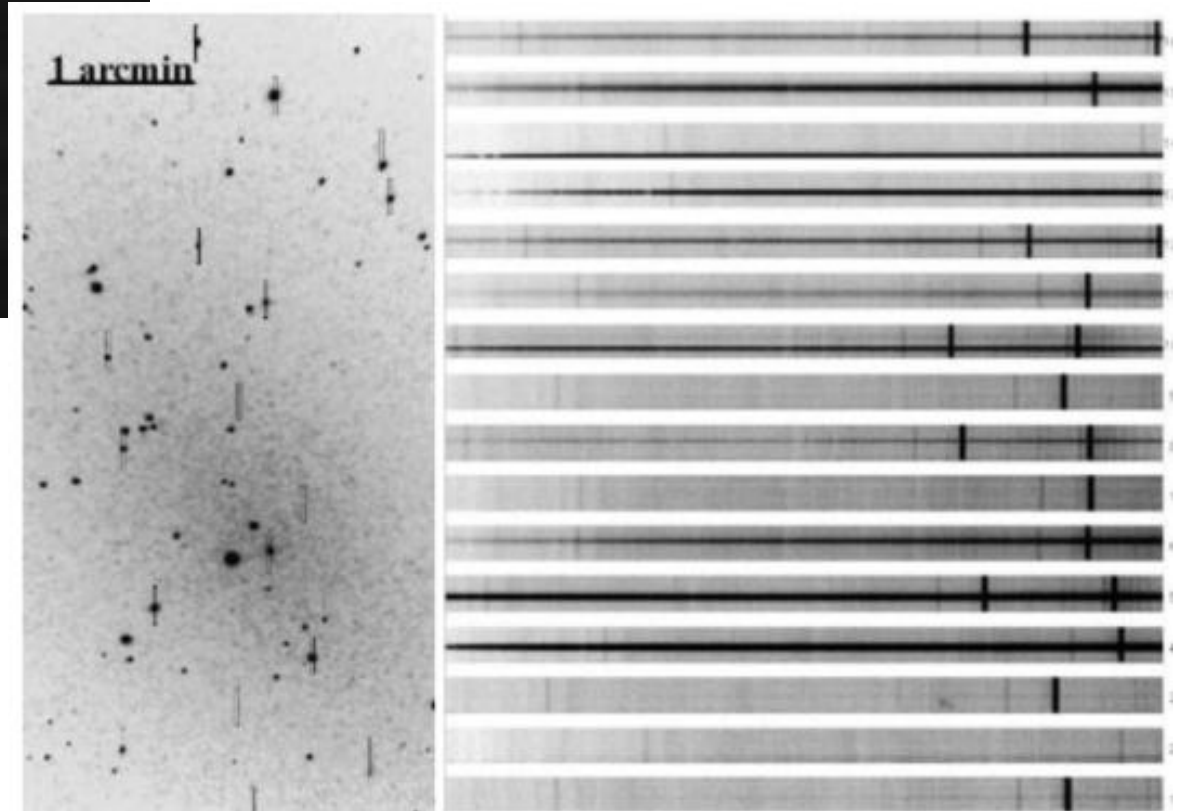
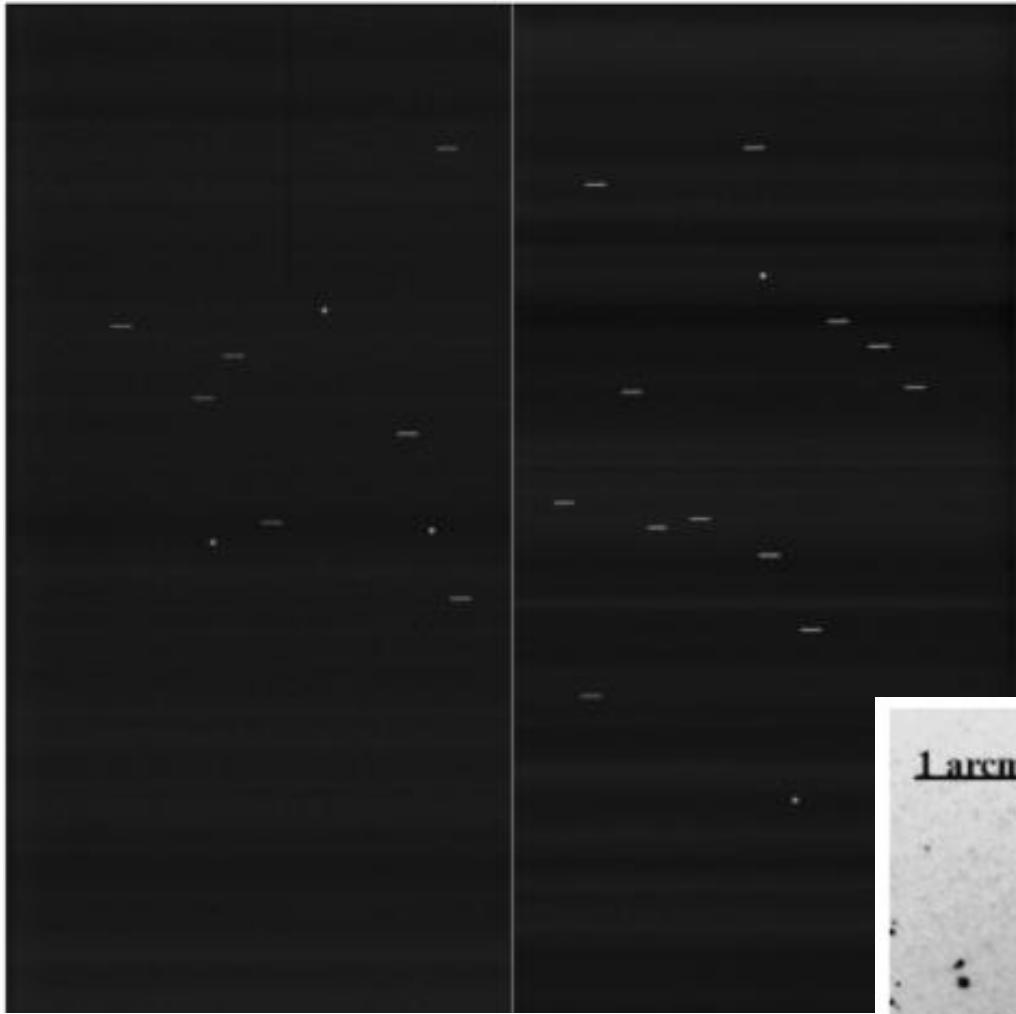
Slitless spectrograph: όταν το στοιχείο διασποράς τοποθετείται ΠΡΙΝ το εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου.



**Κατά :**

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

# Example of slit-mask and spectra FOCAS MOS (Subaru Telescope)



Pre-imaging required  
Measurements of positions  
Design and construction of mask

When observing:  
Fine tuning of telescope alignment  
before final exposure

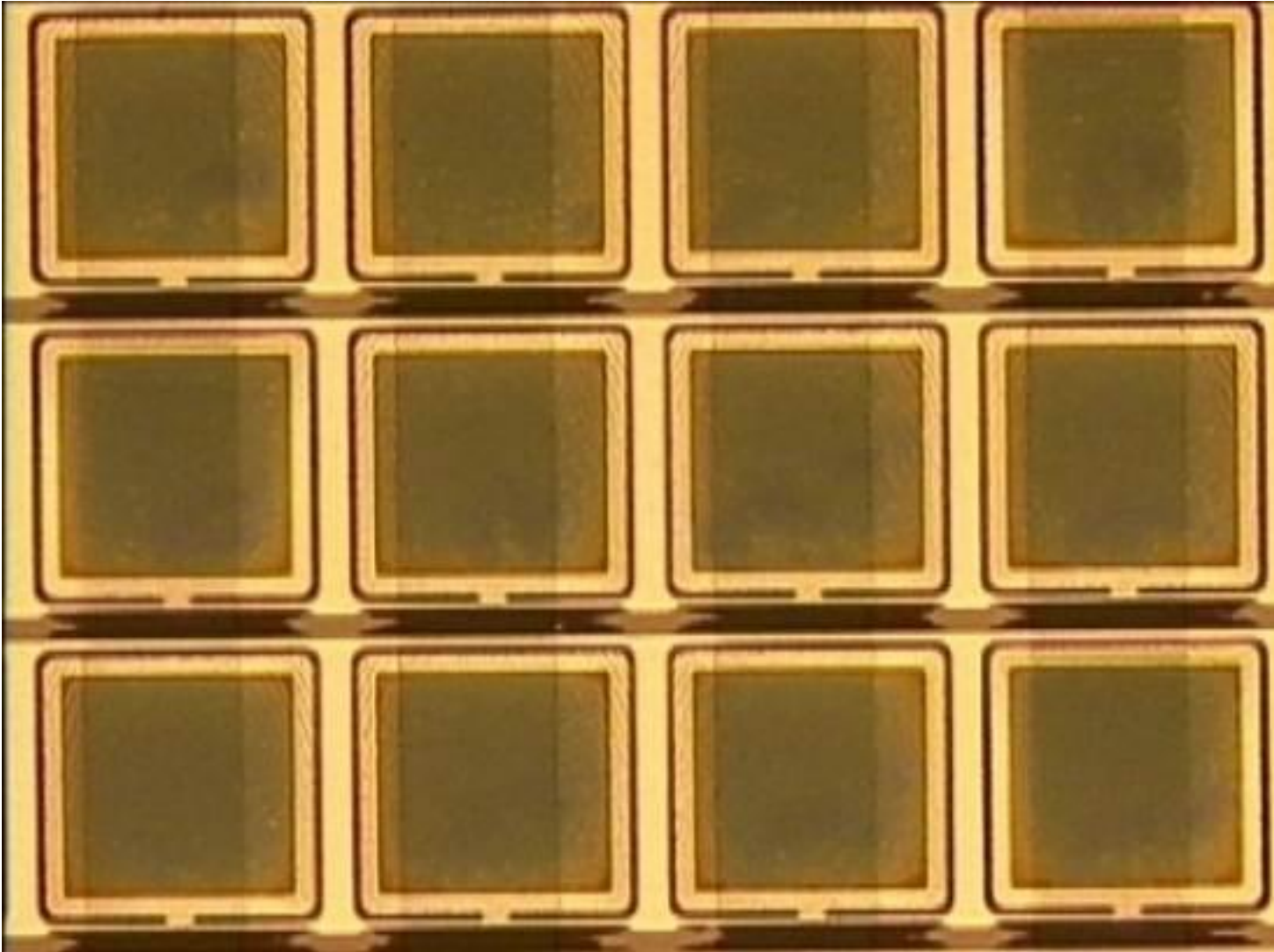


The IMACS slit mask support tooling installed over the work piece. The mechanical clamp



**Installed at  
8m Gemini telescope**

# Micro-shutter array



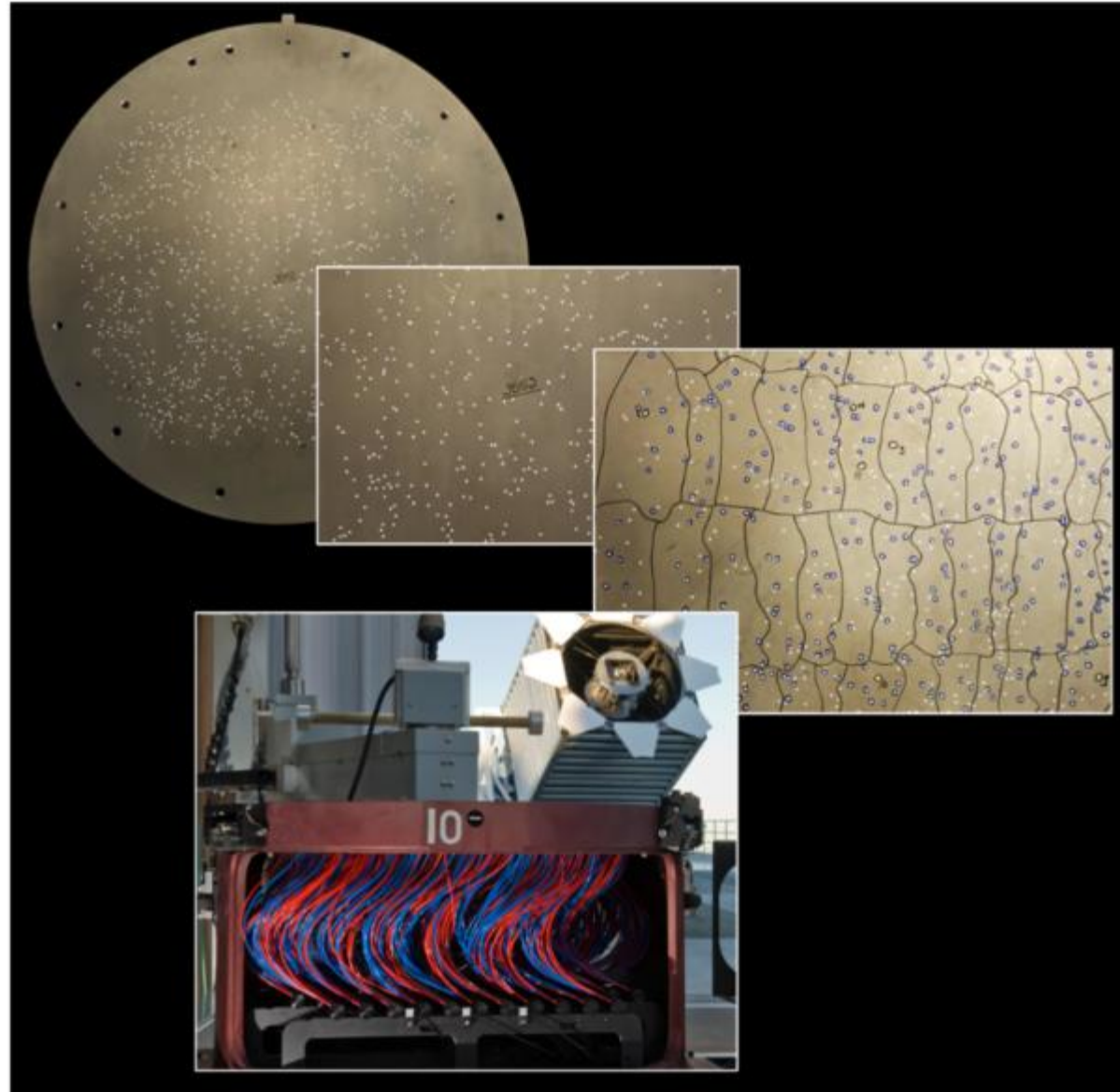
The microshutters are a new technology that was developed for the James Webb Space Telescope mission. They are basically tiny windows with shutters that each measure **100 by 200 microns**. Arrays of these tiny windows are a key component of one of Webb's instruments, the [Near Infrared Spectrograph](#) or NIRSpec.

# Φασματοσκοπία πολλαπλών ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- 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 1.6μm στο κοντινό υπέρυθρο. Κοντά στα 2μm μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο.ι. από πιο εξωτικά υλικά όπως από οξείδιο του ζirkονίου (θέλουν ψύξη και είναι πολύ εύθραυστες)

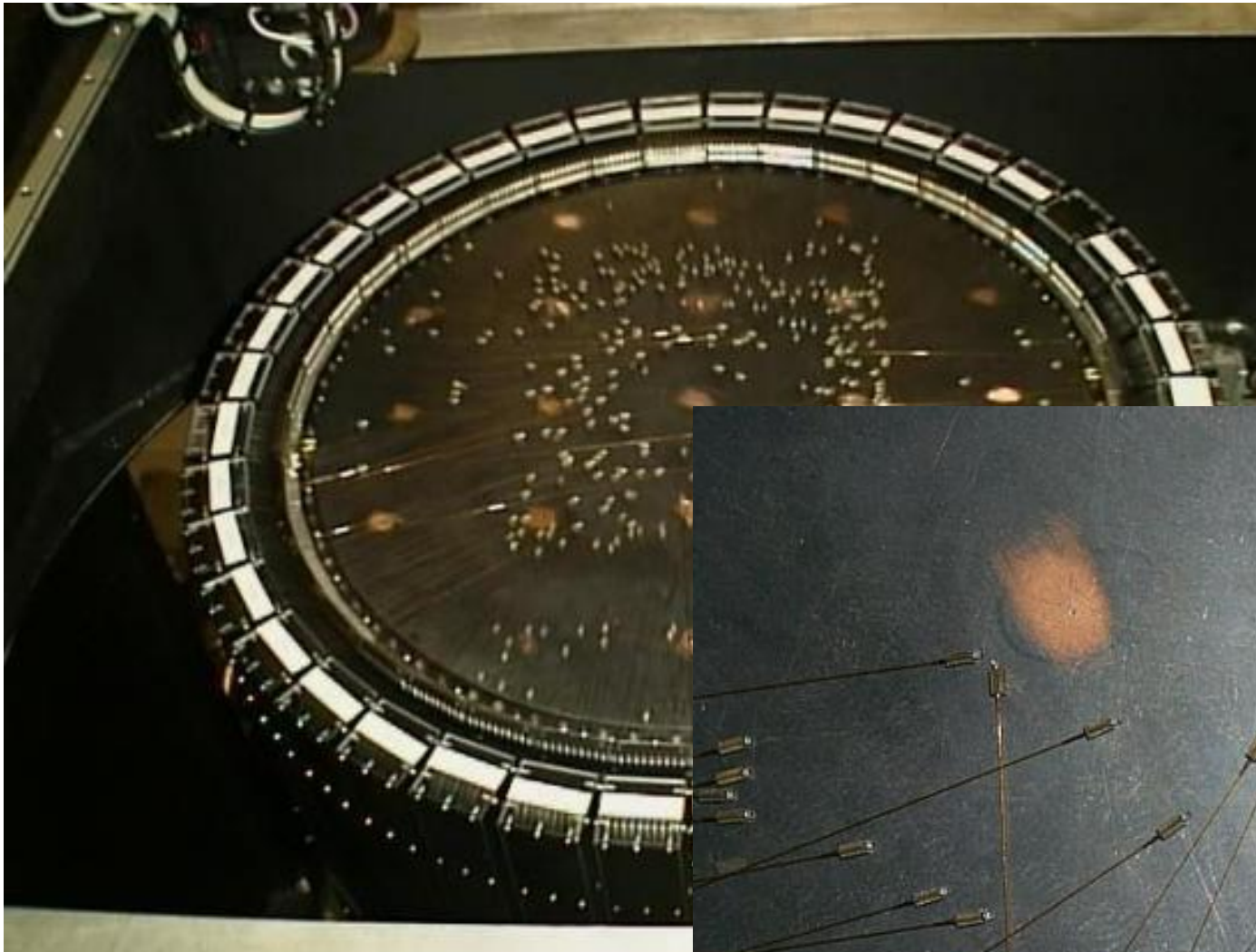


# Τοποθέτηση ο.ι. με το «χέρι» π.χ. Sloan Digital Sky Survey





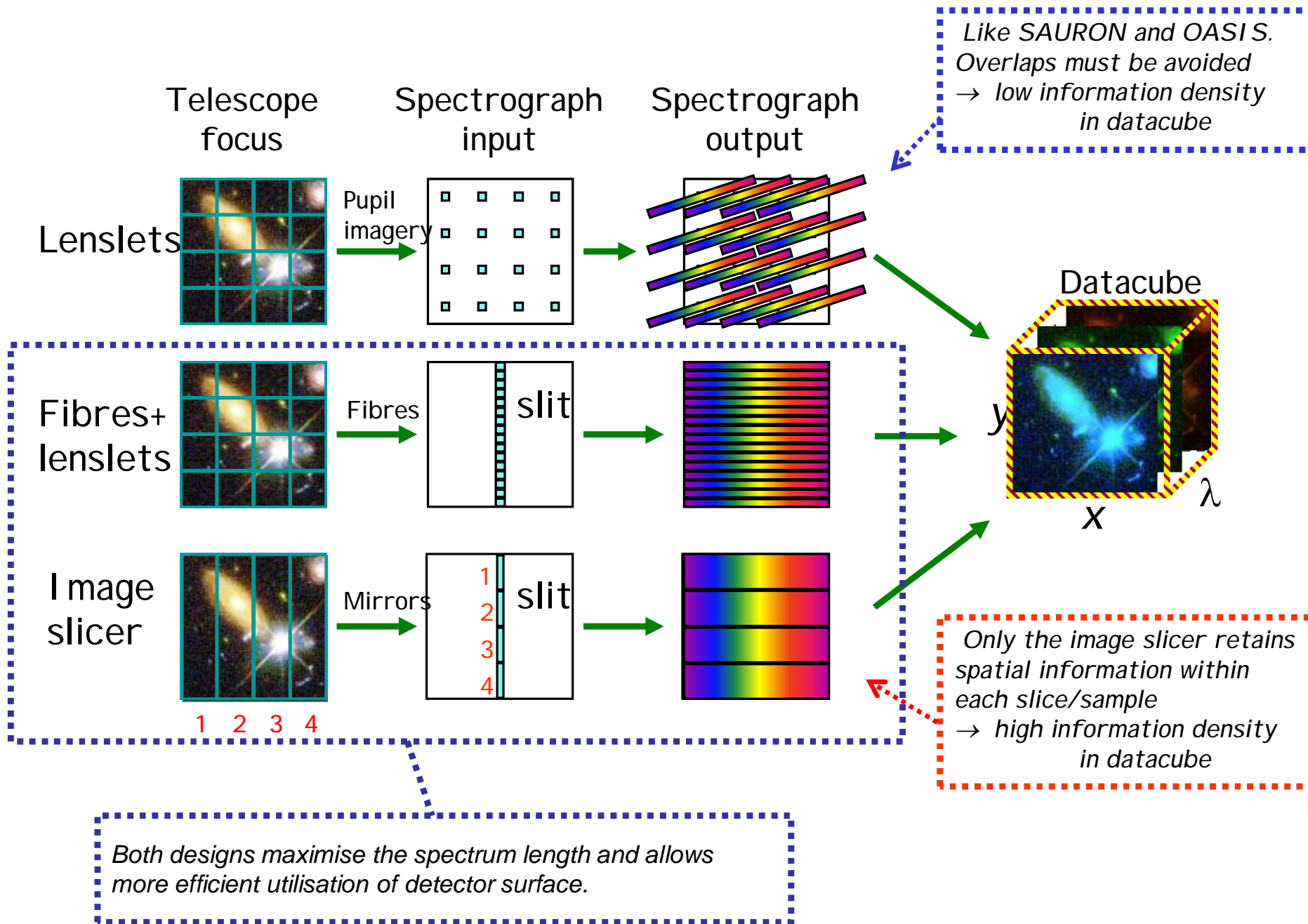
# Ρομποτική τοποθέτηση των ο.ι.



2dF – 4m AAT

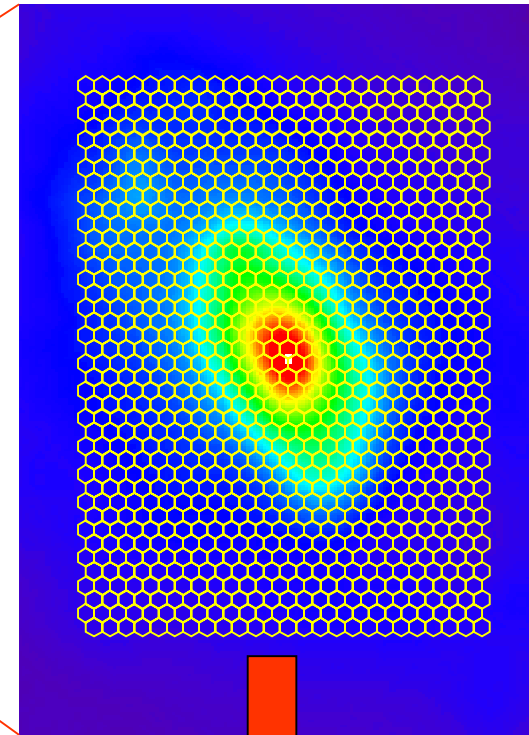
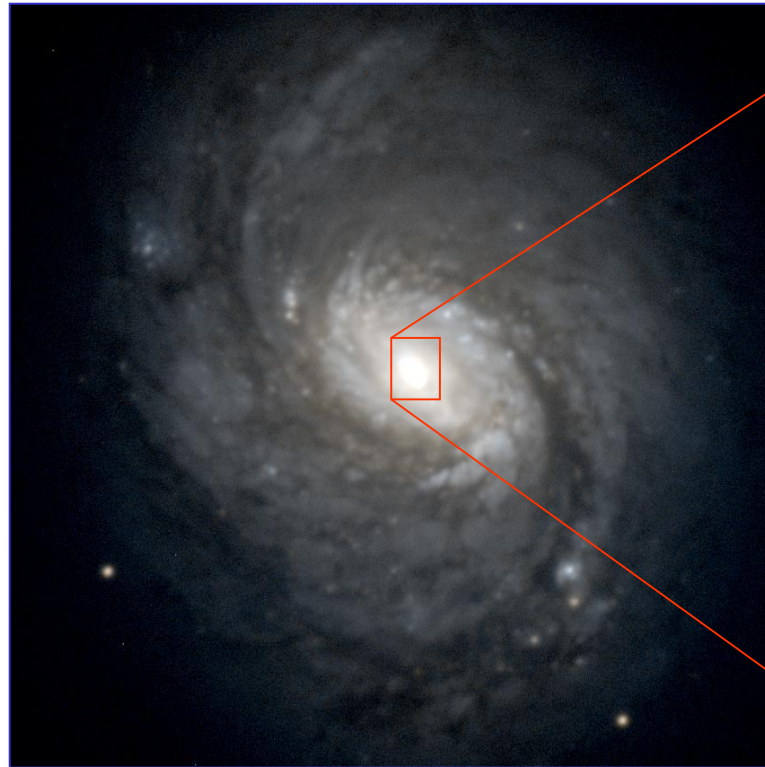
1999/5/22

# Techniques of *IFS*



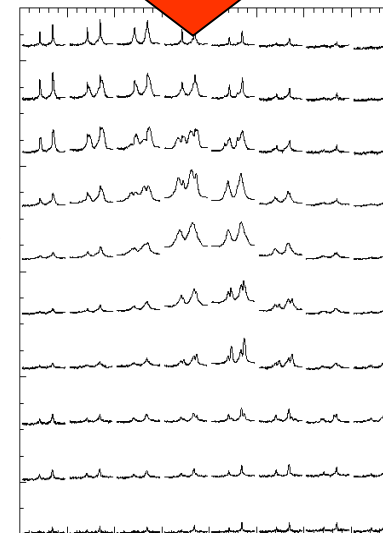
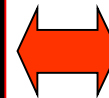
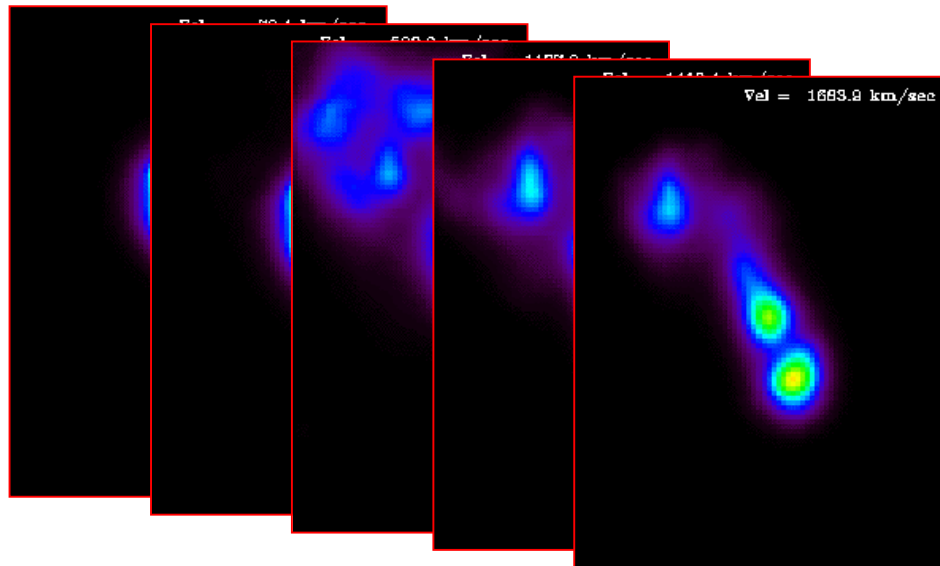
# GMOS integral field unit observes NGC1068

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 πάχους γραμμών απορρόφησης διαφορετικών στοιχείων
- Πως μεταβάλλεται το ισοδύναμο πάχος με τη θερμοκρασία και με τη περιεκτικότητα σε μέταλλα?



O9 V

B5 V

A5 V

F5 V

G5 V

K5 V

M5e V

H

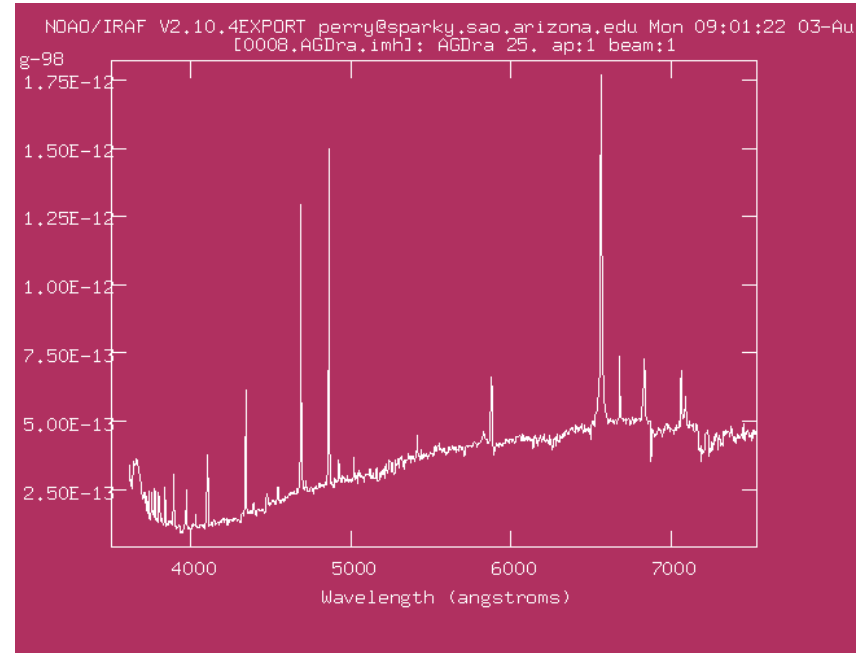
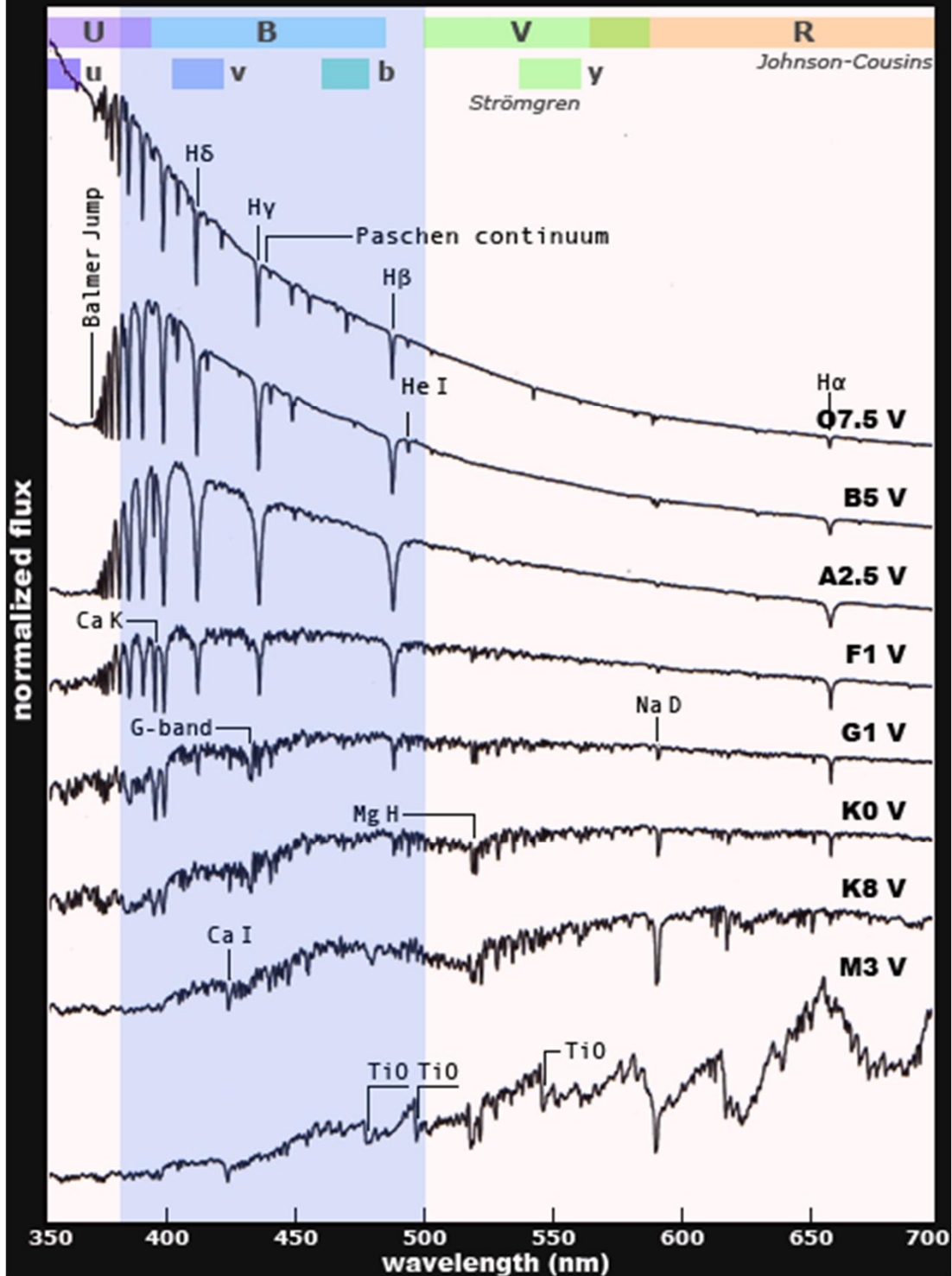
He

He

Mg

Mg

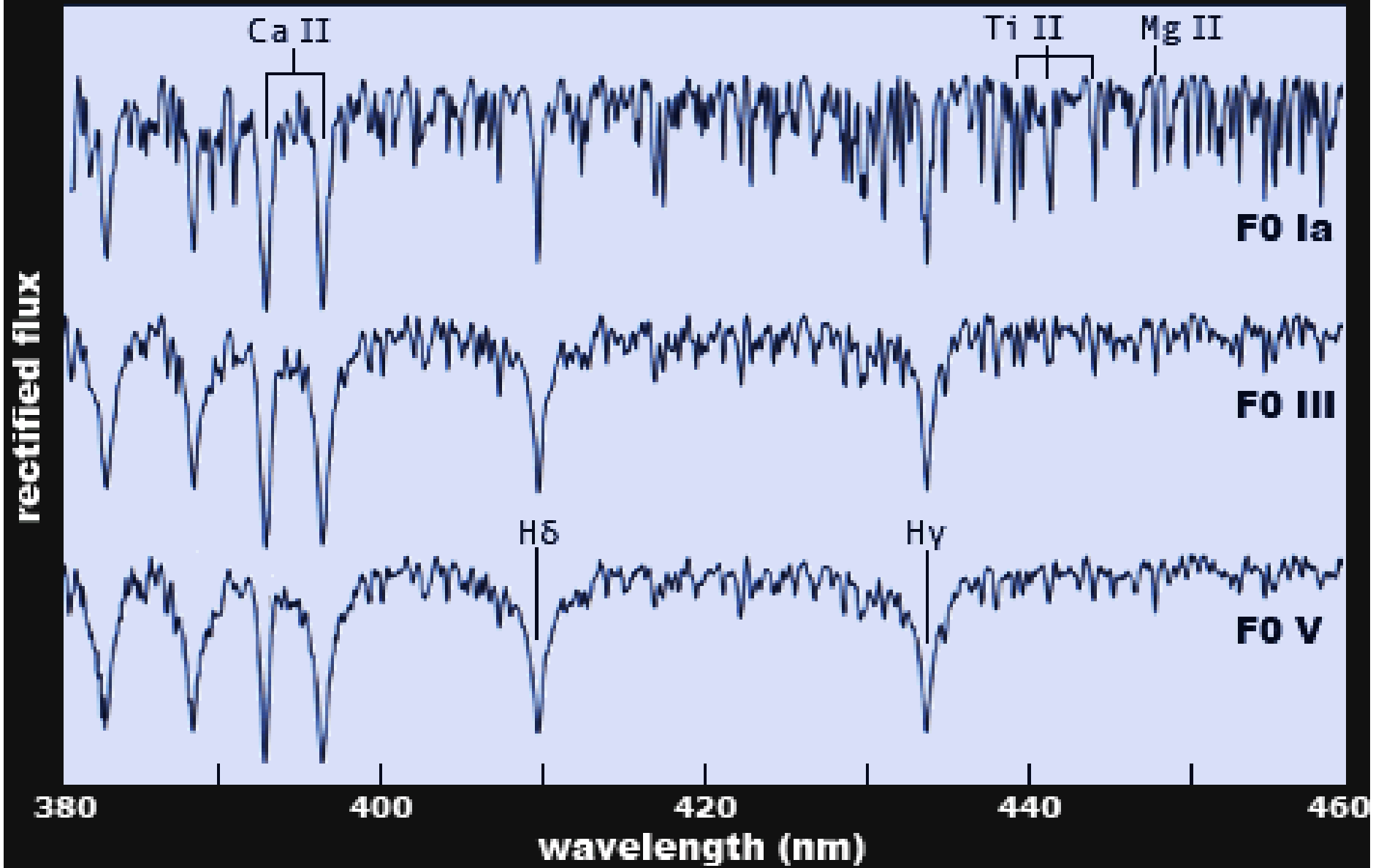
a sequence of stellar flux profiles



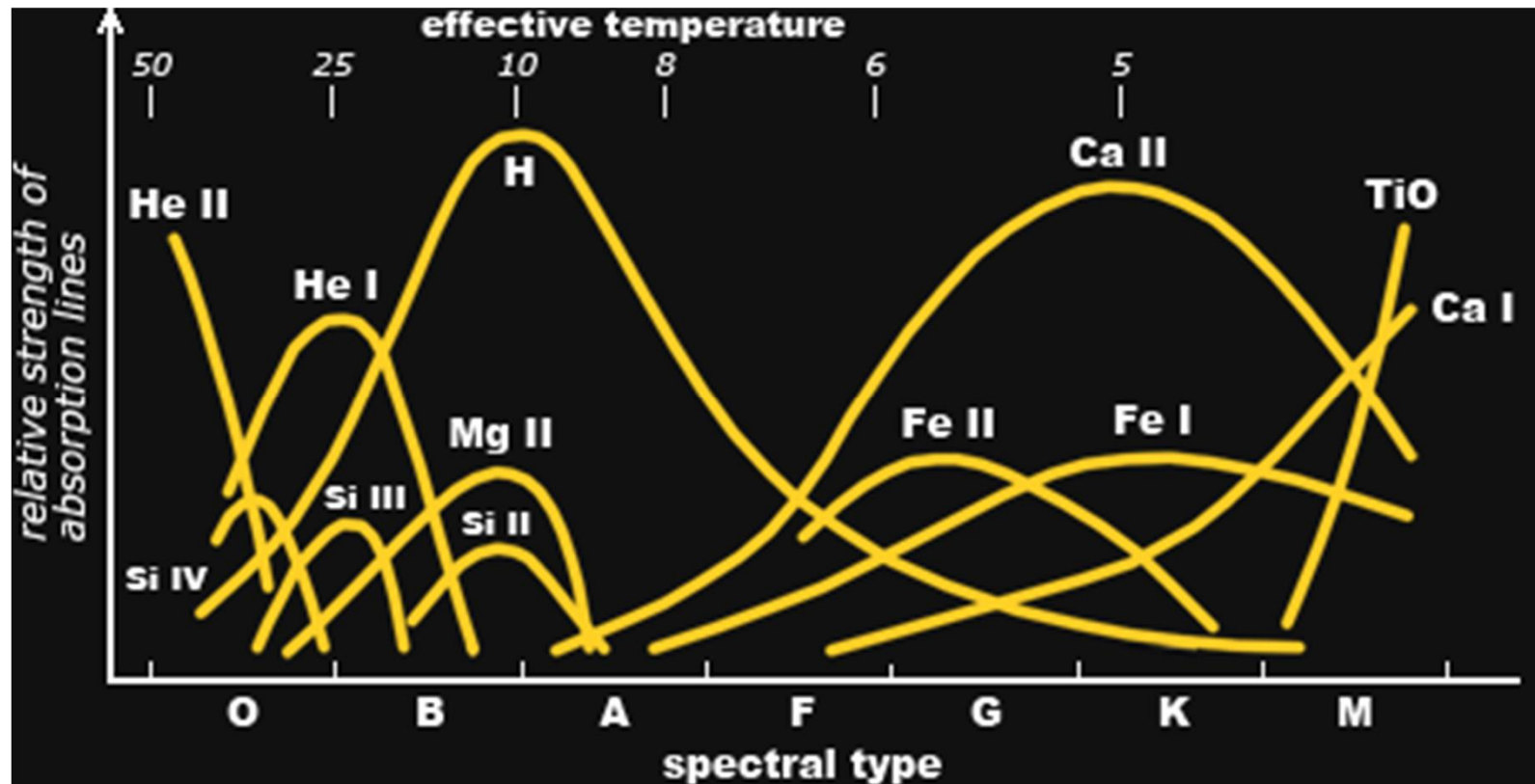
<https://lweb.cfa.harvard.edu/>

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

*luminosity (gravitational) effects*



# Εξάρτηση της έντασης γραμμών απορρόφησης από την ενεργό θερμοκρασία



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