

Κοσμάς Γαζέας

ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

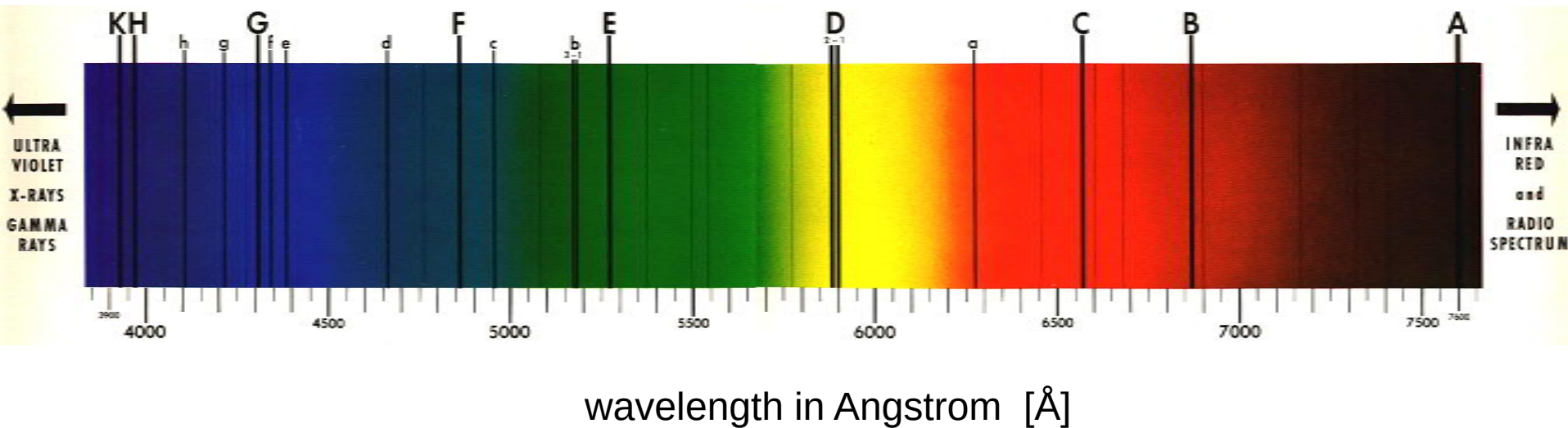
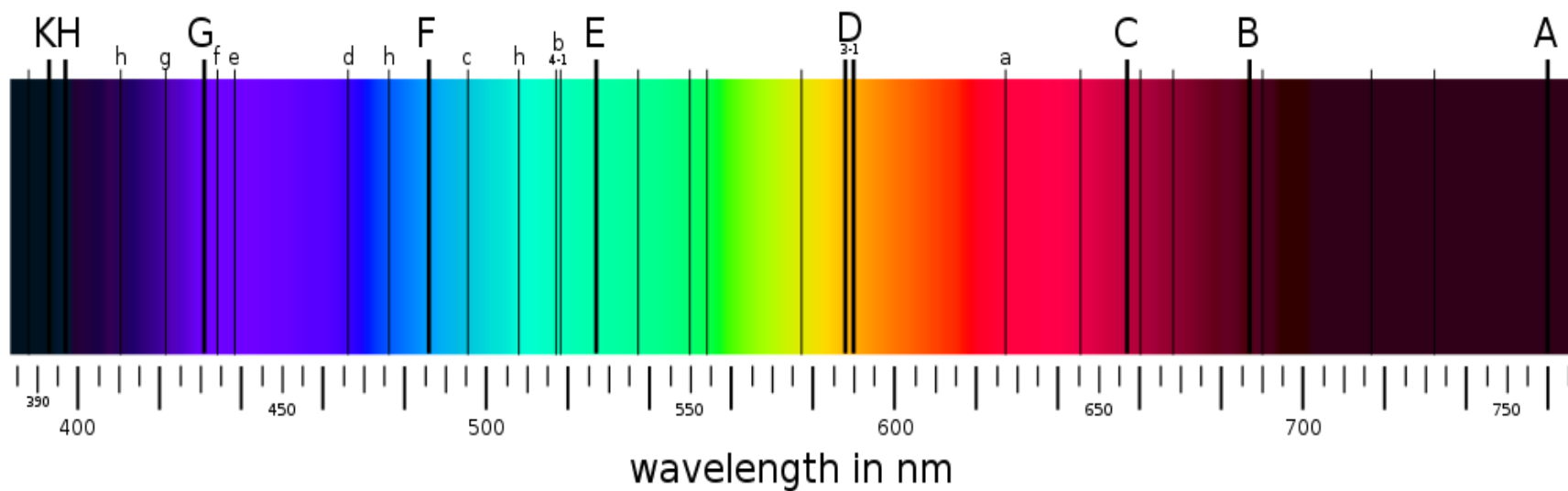
Μέρος Α΄

- Ιστορική αναδρομή
- Μέλαν σώμα
- Αστρικά φάσματα
- Φασματικοί τύποι
- Διάγραμμα H-R
- Φυσική του ατόμου

- **Φασματοσκοπία** είναι η επιστήμη της ανάλυσης του φωτός στις συχνότητες (μήκη κύματος) από τις οποίες αποτελείται, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση με τη φύση, τη σύσταση και τις συνθήκες γενικότερα κάτω από τις οποίες εκπέμπεται το φως.
- Στην **αστρονομική φασματοσκοπία** παρατηρούμε, συλλέγουμε και αναλύουμε το φως των ουρανίων σωμάτων με τη βοήθεια των τηλεσκοπίων ή και άλλων οπτικών βοηθημάτων.

• Ιστορική αναδρομή

- Δέκα περίπου χρόνια νωρίτερα, ο **William Hyde Wollaston** (1766-1826) είδε για πρώτη φορά στο ηλιακό φάσμα επτά σκοτεινές γραμμές, στις οποίες δεν έδωσε και ιδιαίτερη σημασία. Τις θεώρησε σαν τα φυσικά όρια μεταξύ των χρωμάτων.
- Πατέρας της αστρικής φασματοσκοπίας θεωρείται ο οπτικός **Josef von Fraunhofer** (1787-1826), ο οποίος **κατασκεύασε το πρώτο φασματοσκόπιο το 1814** για τον έλεγχο των φακών του.
- Ο Fraunhofer παρατήρησε συστηματικά το ηλιακό φάσμα, καταγράφοντας 574 σκοτεινές γραμμές και επισημαίνοντας τις εντονότερες με τα γράμματα του λατινικού αλφαβήτου (γραμμές Fraunhofer).
- Παρατήρησε επίσης ότι το φάσμα της Αφροδίτης ήταν ίδιο με αυτό του Ήλιου, προσφέροντας μία ατράνταχτη απόδειξη ότι το φως της είναι απλά το ανακλώμενο στην ατμόσφαιρά της ηλιακό φως.



• Ιστορική αναδρομή

- Ο Fraunhofer παρατήρησε και τα φάσματα των αστέρων, διαπιστώνοντας διαφορές μεταξύ τους.
- Δεν κατάφερε να δώσει εξήγηση για την ύπαρξη των σκοτεινών γραμμών στα φάσματα.
- Η εξήγηση ήρθε το 1859 από τον **Gustav Kirchhoff** (1824-1887), ο οποίος απέδωσε πολύ σωστά τις σκοτεινές γραμμές σε επιλεκτική απορρόφηση των χημικών στοιχείων του Ήλιου.
- Σε συνδυασμό με την έρευνα του χημικού **Robert Bunsen** (1811-1899) ο Kirchhoff μελέτησε τις ιδιότητες των φασμάτων απορρόφησης και εκπομπής και ταυτοποίησε ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων στον Ήλιο.

- **Ιστορική αναδρομή**

- Μεταξύ άλλων, ο Kirchhoff κατέληξε σε τρεις βασικούς νόμους:

- 1) Ένα πυρακτωμένο στερεό σώμα ή ένα αέριο σε υψηλή πίεση θα εμφανίσει συνεχές φάσμα.

- 2) Ένα πυρακτωμένο αέριο σε χαμηλή πίεση θα εμφανίσει φάσμα με (φωτεινές) γραμμές εκπομπής.

- 3) Εάν παρατηρηθεί ένα συνεχές φάσμα μέσω ενός αερίου χαμηλής πυκνότητας και θερμοκρασίας, τότε θα εμφανίσει φάσμα με (σκοτεινές) γραμμές απορρόφησης.

θερμό υλικό
υψηλής
πυκνότητας



διαθλαστικό
μέσο



συνεχές φάσμα



θερμό αέριο



φάσμα εκπομπής

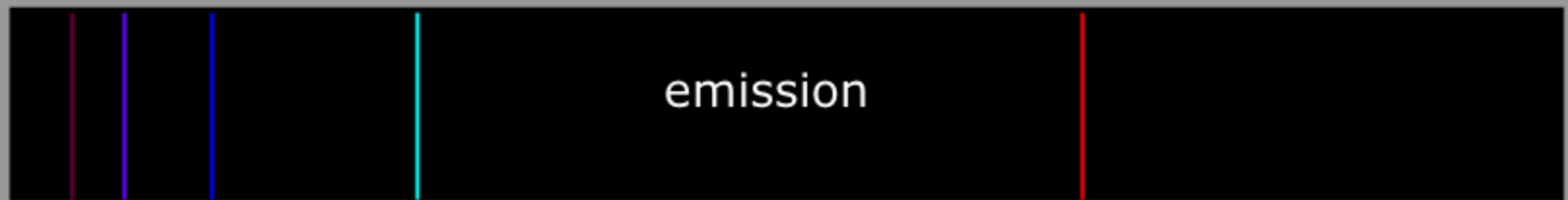


ψυχρό αέριο



φάσμα απορρόφησης





Hydrogen line spectrum: Balmer series



400nm

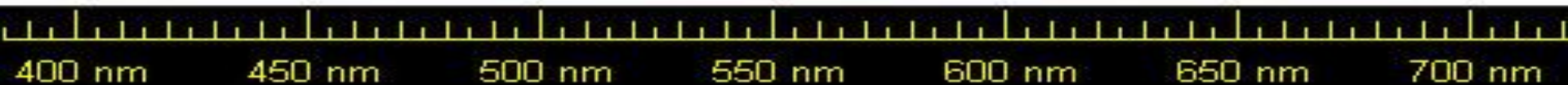
500nm

600nm

700nm

- **Ιστορική αναδρομή**

- Η τεχνική της ταυτοποίησης των στοιχείων στα φάσματα οδήγησε σύντομα στην ανακάλυψη νέων στοιχείων, όπως το ρουβίδιο και το ήλιο (**Norman Lockyer** - 1868).
- Ο **William Huggins** (1824-1910) και ο ιερέας-αστρονόμος **Pietro Angelo Secchi** (1818-1878) ήταν από τους πρωτοπόρους της συστηματικής μελέτης των αστρικών φασμάτων. Κατέταξαν τα γνωστά μέχρι τότε αστρικά φάσματα σε 5 βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.



- **Ιστορική αναδρομή**

- Η ταξινόμηση των αστρικών φασμάτων κατά τους Huggins και Secchi:

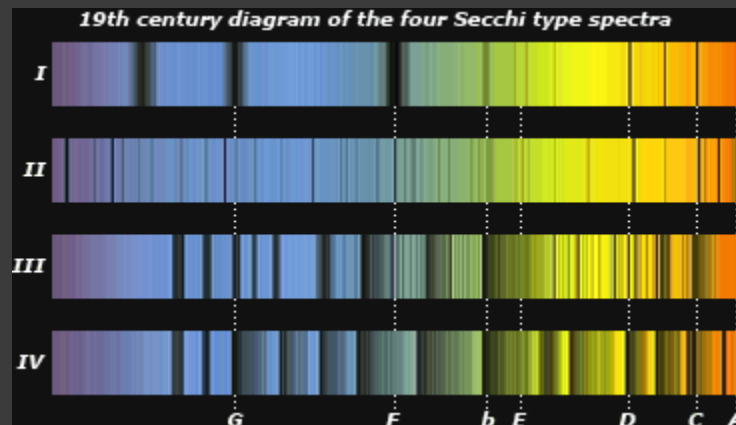
Type I – φάσματα από γαλανόλευκους αστέρες με γραμμές απορρόφησης κυρίως από ήλιο και υδρογόνο.

Type II – φάσματα με πολλαπλές (μεταλλικές) γραμμές απορρόφησης όπως αυτές του Ήλιου.

Type III – φάσματα από ερυθρούς αστέρες με πολλαπλές ζώνες απορρόφησης κυρίως στα κυανά μήκη κύματος (TiO).

Type IV – φάσματα από ερυθρούς αστέρες με πολλαπλές ζώνες απορρόφησης κυρίως στα ερυθρά μήκη κύματος (C).

Type V – φάσματα με λαμπρές γραμμές εκπομπής.



- **Ιστορική αναδρομή**

- Όσο η τεχνολογία των φασματοσκοπίων βελτιωνόταν, τα αστρικά φάσματα φαινόταν ολοένα και πιο περίπλοκα. Ήταν εμφανές ότι η ταξινόμηση των Huggins και Secchi έπρεπε να γίνει πιο λεπτομερής.
- Ο διευθυντής του Harvard College Observatory, **Edward Pickering** (1846-1919) ανέλαβε αυτό το έργο με τη βοήθεια τριών βοηθών: της **Williamina Fleming** (1857-1911), της **Antonia Maury** (1866-1952) και της **Annie Cannon** (1863-1941). Το 1890 συνέταξε ένα νέο κατάλογο αστρικών φασμάτων, τα οποία ταξινόμησε με δικά του κριτήρια.



Ο Edward Pickering στο Harvard College Observatory, μαζί με τις βοηθούς του.



Εικόνα από το Harvard College Observatory,
όπου η ταξινόμηση των φασμάτων γινόταν με υποτυπώδη μέσα.

- **Ιστορική αναδρομή**

- Η ταξινόμηση των αστρικών φασμάτων κατά τους Pickering και Maury:

A – φάσματα κυανόλευκων αστερών με εμφανείς γραμμές υδρογόνου

B – φάσματα κυανόλευκων αστερών με γραμμές υδρογόνου και ηλίου

C – φάσματα κυανόλευκων αστερών με διπλές γραμμές υδρογόνου

D – φάσματα κυανόλευκων αστερών με γραμμές εκπομπής

E – φάσματα με γραμμές CaII και υδρογόνου

F – φάσματα όπως και τα E, αλλά με περισσότερες γραμμές υδρογόνου

G – φάσματα κίτρινων αστερών με γραμμές υδρογόνου και μετάλλων

H – φάσματα όπως τα G, με μικρότερη λαμπρότητα στην μπλε περιοχή

I – φάσματα όπως τα H, αλλά με περισσότερες γραμμές

K – φάσματα πορτοκαλί αστερών με εμφανείς ζώνες απορρόφησης

L – ιδιόμορφα φάσματα του τύπου K

M – φάσματα πορτοκαλί-κόκκινων αστερών με μοριακές ζώνες απορρόφησης

N – φάσματα κόκκινων αστερών με γραμμές απορρόφησης άνθρακα

O – φάσματα με λαμπρές γραμμές εκπομπής (Wolf-Rayet)

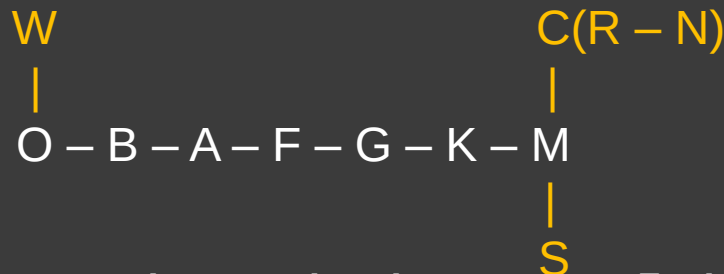
P – φάσματα πλανητικών νεφελωμάτων

Q – φάσματα όλων των υπολοίπων κατηγοριών (καινοφανών κτλ)

• Ιστορική αναδρομή

- Το 1901 η **Annie Cannon** απλοποίησε δραστικά την προηγούμενη ταξινόμηση και από 22 κατηγορίες φασμάτων κατέληξε στη γνωστή μέχρι και σήμερα κατάταξη των 7 βασικών **φασματικών τύπων**, με βάση την επιφανειακή θερμοκρασία των αστέρων:

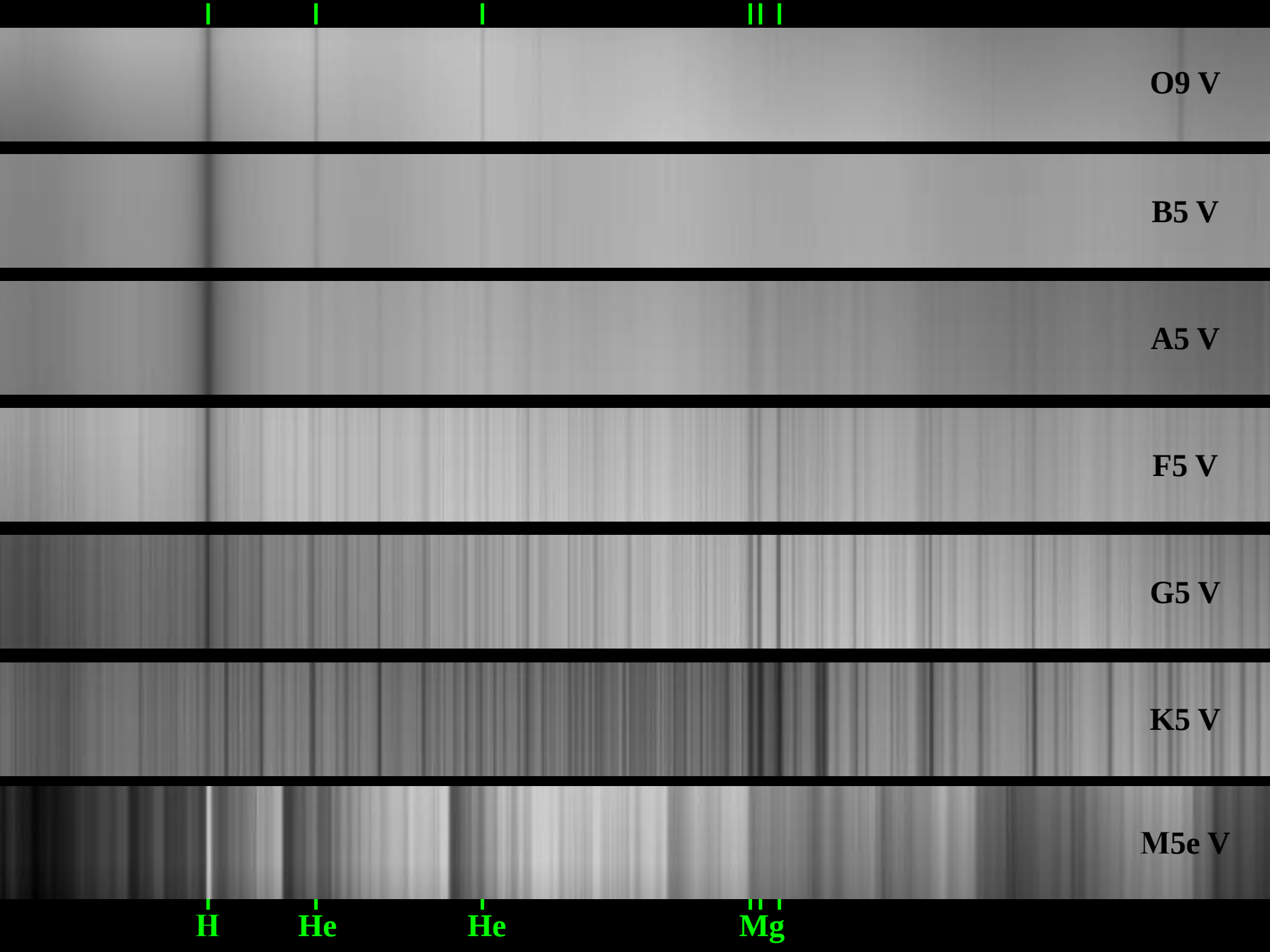
- Οι φασματικοί τύποι είναι:



- Τους φασματικούς αυτούς τύπους τους διαίρεσε σε 10 υποκατηγορίες, προσθέτοντας τον αριθμό από 0 έως 9 σε κάθε τύπο.
- Βάσει της λαμπρότητάς τους οι αστέρες (και τα αντίστοιχα φάσματά τους) χωρίζονται σε **τάξεις λαμπρότητας**, λαμβάνοντας το λατινικό δείκτη I έως VII, σύμφωνα με τους William **Morgan** και Philip **Keenan** (Yerkes Observatory).
- Το 99% των ορατών αστέρων ανήκουν στις κατηγορίες από B έως M.

Οι φασματικοί τύποι των αστέρων

- **Τύπος W:** πολύ θερμοί αστέρες με γραμμές εκπομπής (τύπος Wolf-Rayet).
- **Τύπος O:** πολύ θερμοί αστέρες (20.000 - 100.000 K) με χαρακτηριστικό βαθύ κυανό χρώμα. Οι αστέρες αυτοί έχουν πολύ λίγες γραμμές απορρόφησης, κυρίως ιονισμένου ηλίου και ζουν μόνο μερικά εκατομμύρια χρόνια.
- **Τύπος B:** θερμοί αστέρες (10.000 - 20.000 K) με χαρακτηριστικό μπλε χρώμα. Παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης ουδέτερου ηλίου και υδρογόνου. (π.χ. *Rigel*, στον *Ωρίωνα* και *Στάχης (Spica)*, στην *Παρθένο*).
- **Τύπος A:** αστέρες με ισχυρές γραμμές απορρόφησης ουδέτερου υδρογόνου. Η θερμοκρασία τους είναι 8.000 - 10.000 K και έχουν λευκό χρώμα. (π.χ. *Vega*, *Altair*, και *Sirius*).
- **Τύπος F:** αστέρες λίγο θερμότεροι από τον Ήλιο (6.000 - 8.000 K) με γραμμές υδρογόνου και ηλίου και αμυδρές μεταλλικές γραμμές απορρόφησης ιονισμένου Ca (CaII). (π.χ. *Προκύων*).
- **Τύπος G:** αστέρες με θερμοκρασίες 5.000 - 6.000 K και κίτρινο χρώμα με γραμμές απορρόφησης CaII και FeI. Ο Ήλιος ανήκει στην κατηγορία αυτή, μαζί με τους αστέρες *α Centauri* και *Αίγα (Capella)*.
- **Τύπος K:** πορτοκαλί αστέρες χαμηλής θερμοκρασίας (3.000 - 5000 K) με γραμμές απορρόφησης ουδέτερων μετάλλων με μοριακές ζώνες. (π.χ. *Αρκτούρος*, τον *Βοώτη*).
- **Τύπος M:** ψυχροί αστέρες (2.000 - 3.000 K). Είναι τόσο ψυχροί, που μόρια νερού, CO, TiO μπορούν να διατηρούνται στην επιφάνειά τους. Οι αστέρες αυτοί είναι χαρακτηριστικά ερυθροί (π.χ. *Betelgeuse* στον *Ωρίωνα* και *Αντάρης* στον *Σκορπιό*).
- **Τύπος C(R-N):** ψυχροί αστέρες με μοριακές ταινίες άνθρακα.
- **Τύπος S:** ψυχροί αστέρες με μοριακές ταινίες ZrO, YO, LaO.



O9 V

B5 V

A5 V

F5 V

G5 V

K5 V

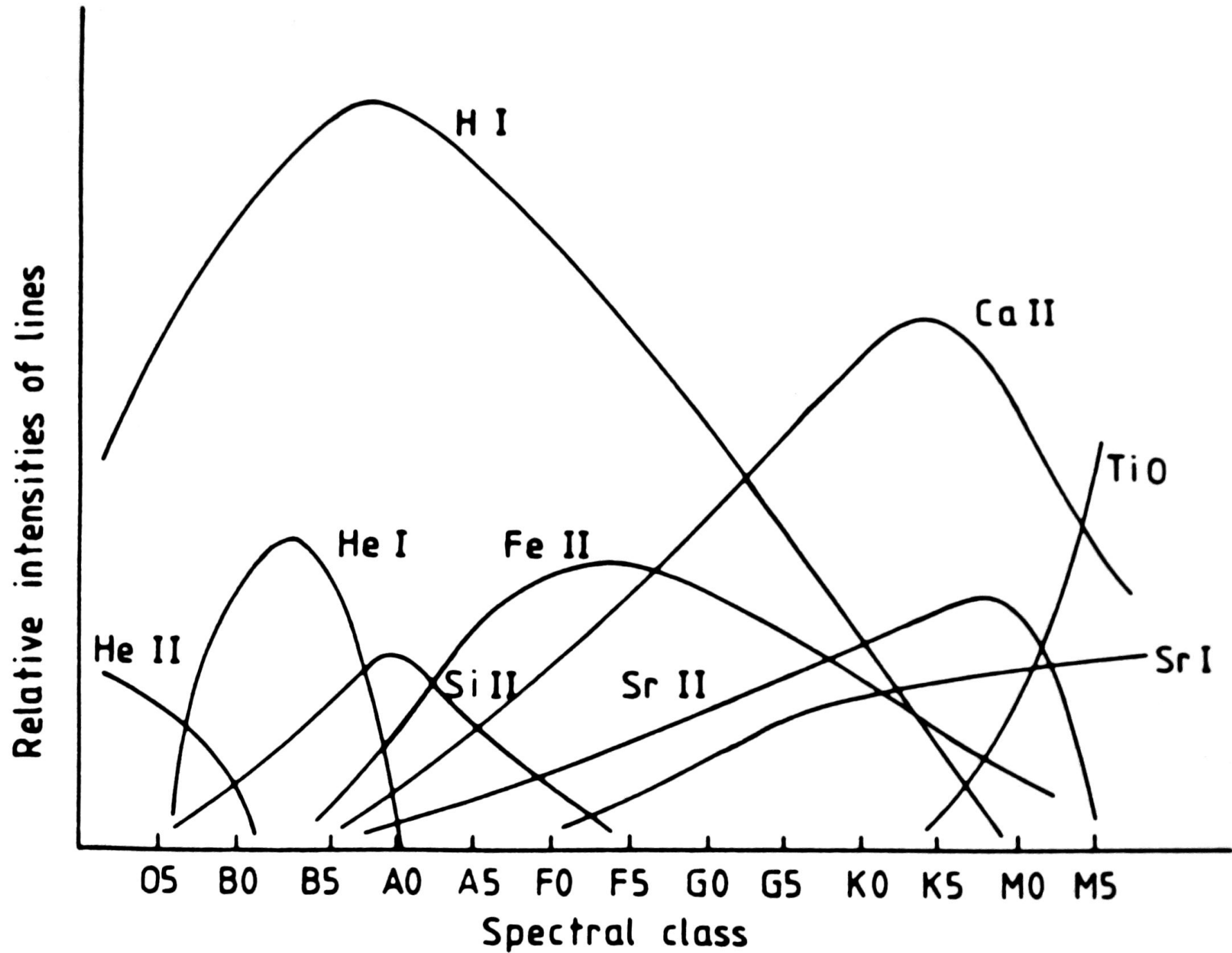
M5e V

H

He

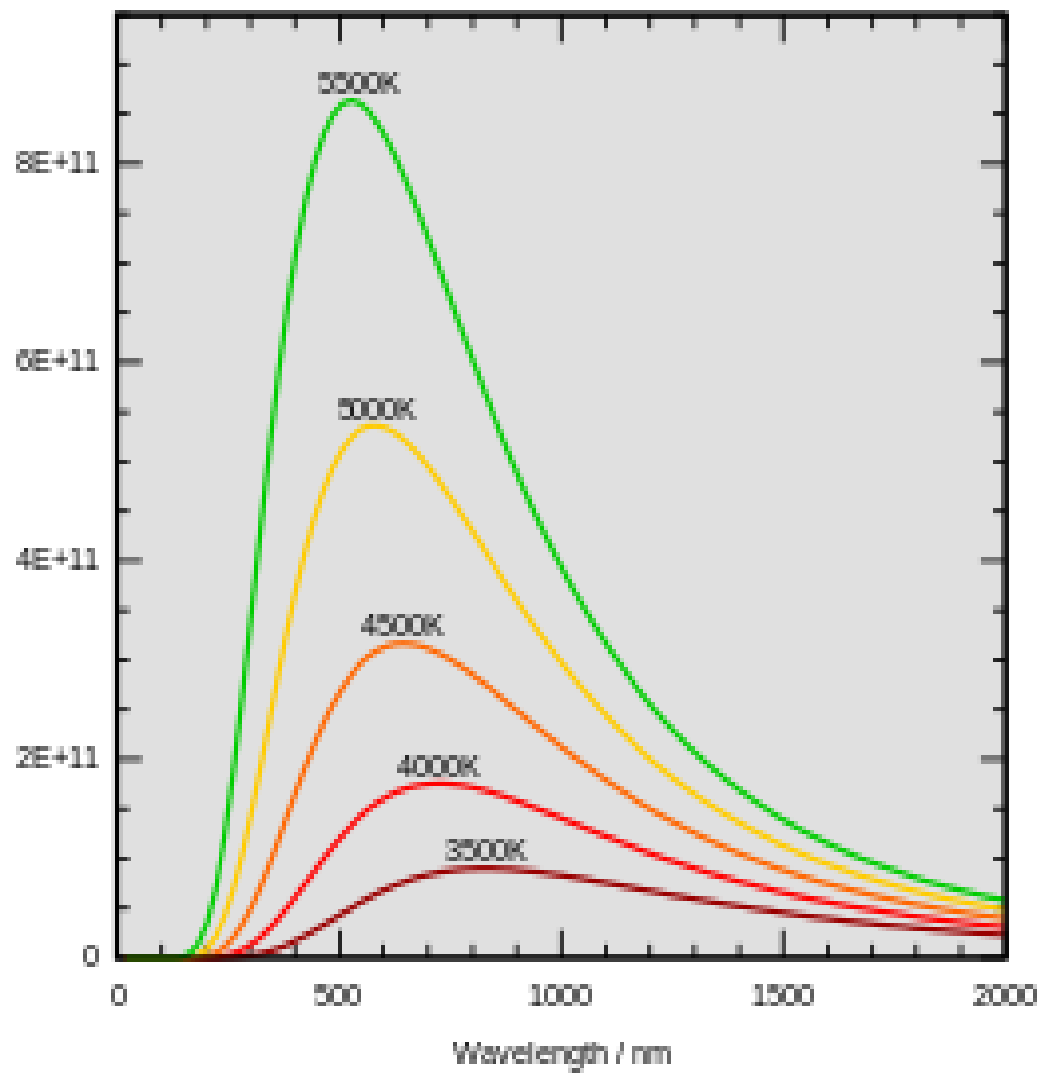
He

Mg

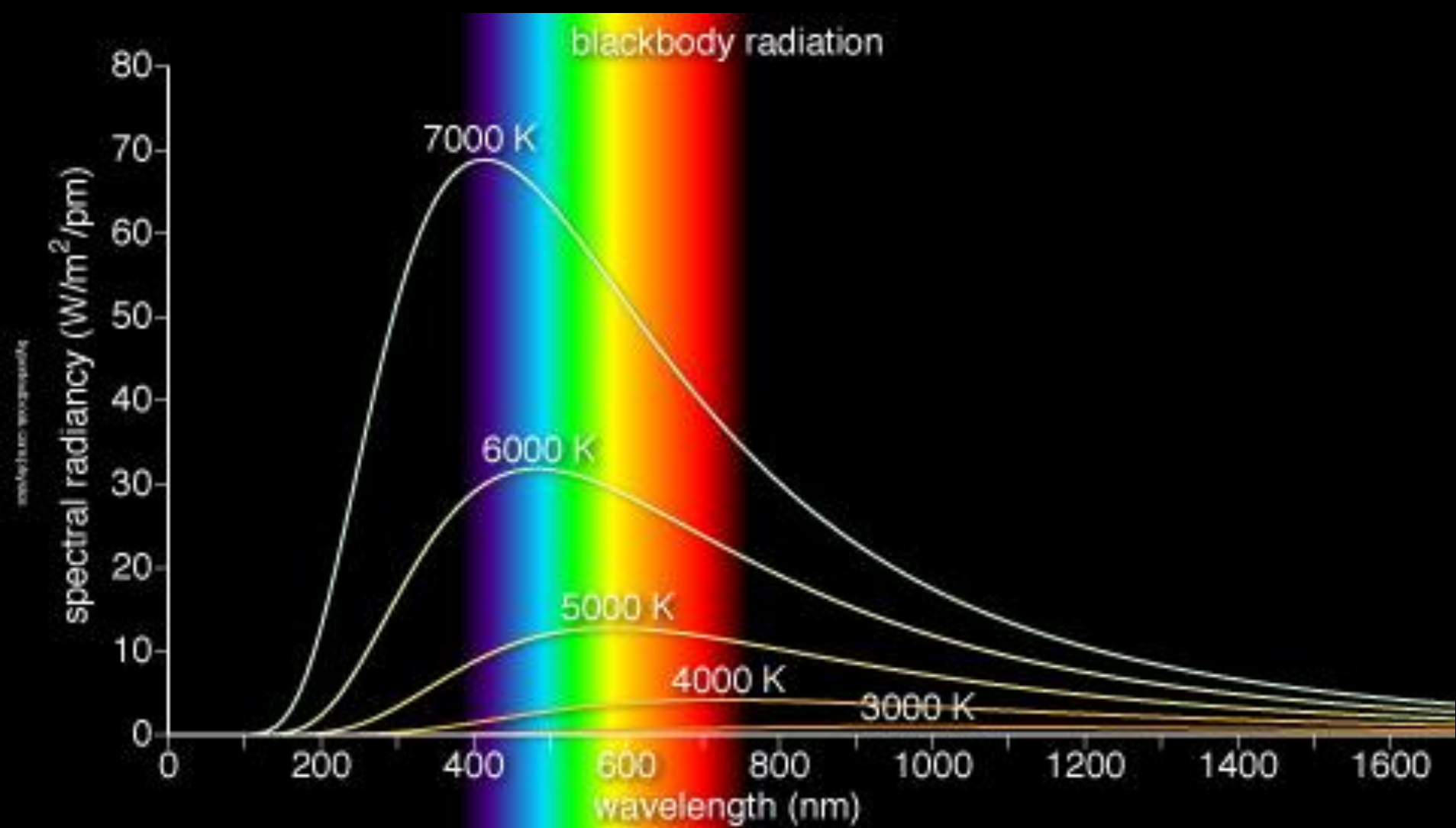


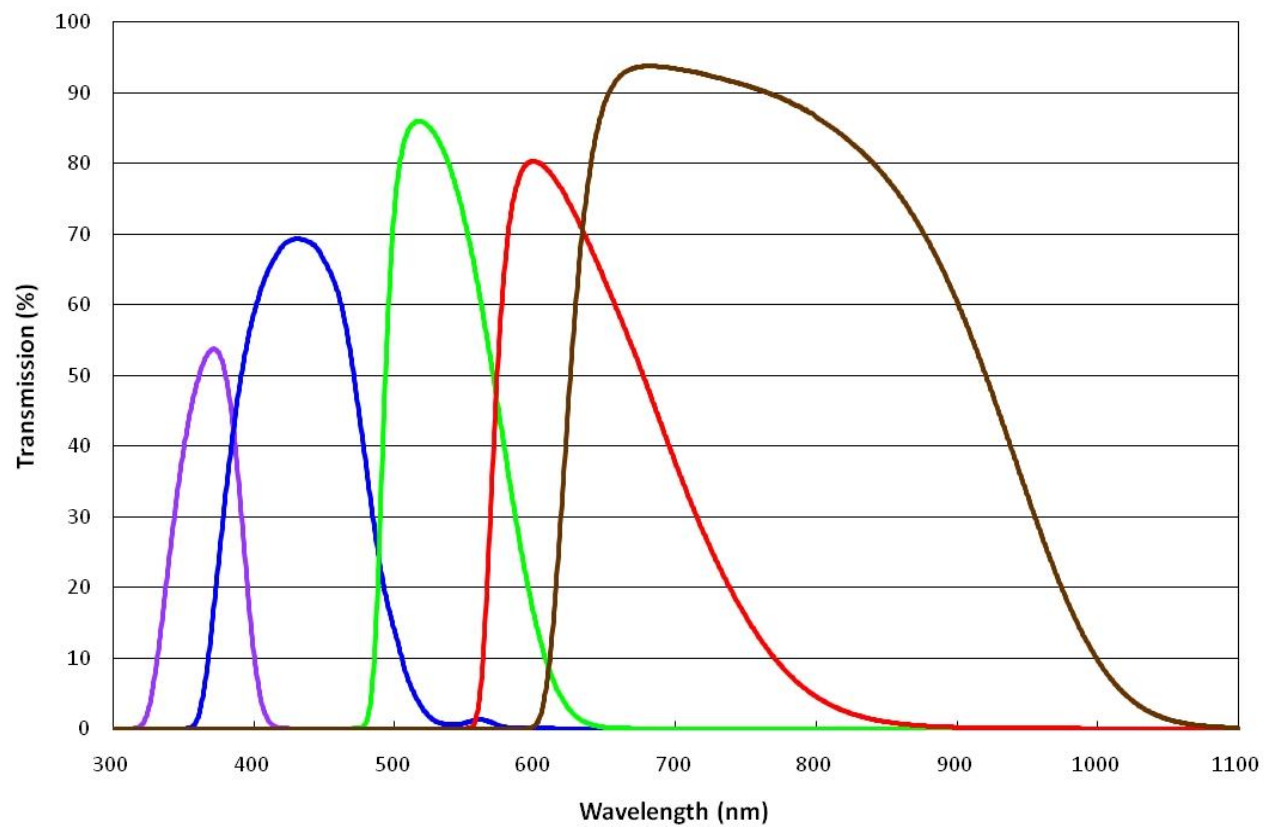
• Θερμοπυρηνικές αντιδράσεις

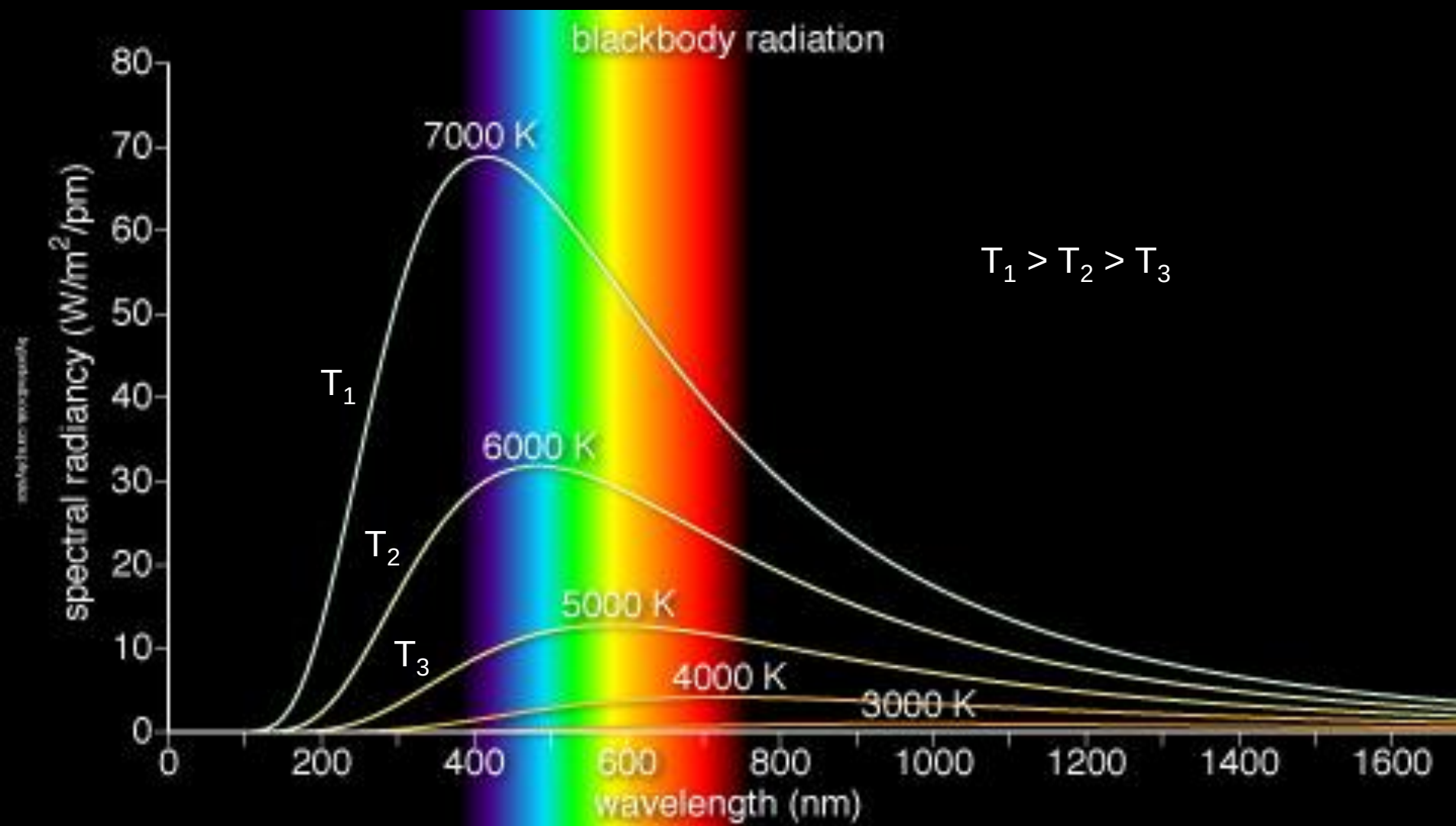
- Οι αστέρες είναι πύρινες σφαίρες που αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο.
- Κάτω από την πίεση της βαρύτητας, η θερμοκρασία του κέντρου των αστερών φτάνει τους 10^6 K, ενεργοποιώντας τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα.
- Τέσσερα άτομα υδρογόνου συντήκονται και παράγουν ένα άτομο ηλίου, εκλύοντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Αυτή η ενέργεια παράγει το φως και τη θερμότητα που λαμβάνουμε από τους αστέρες.
- Οι βαρύτεροι αστέρες έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό τους, καταναλώνοντας πολύ πιο γρήγορα υδρογόνο.

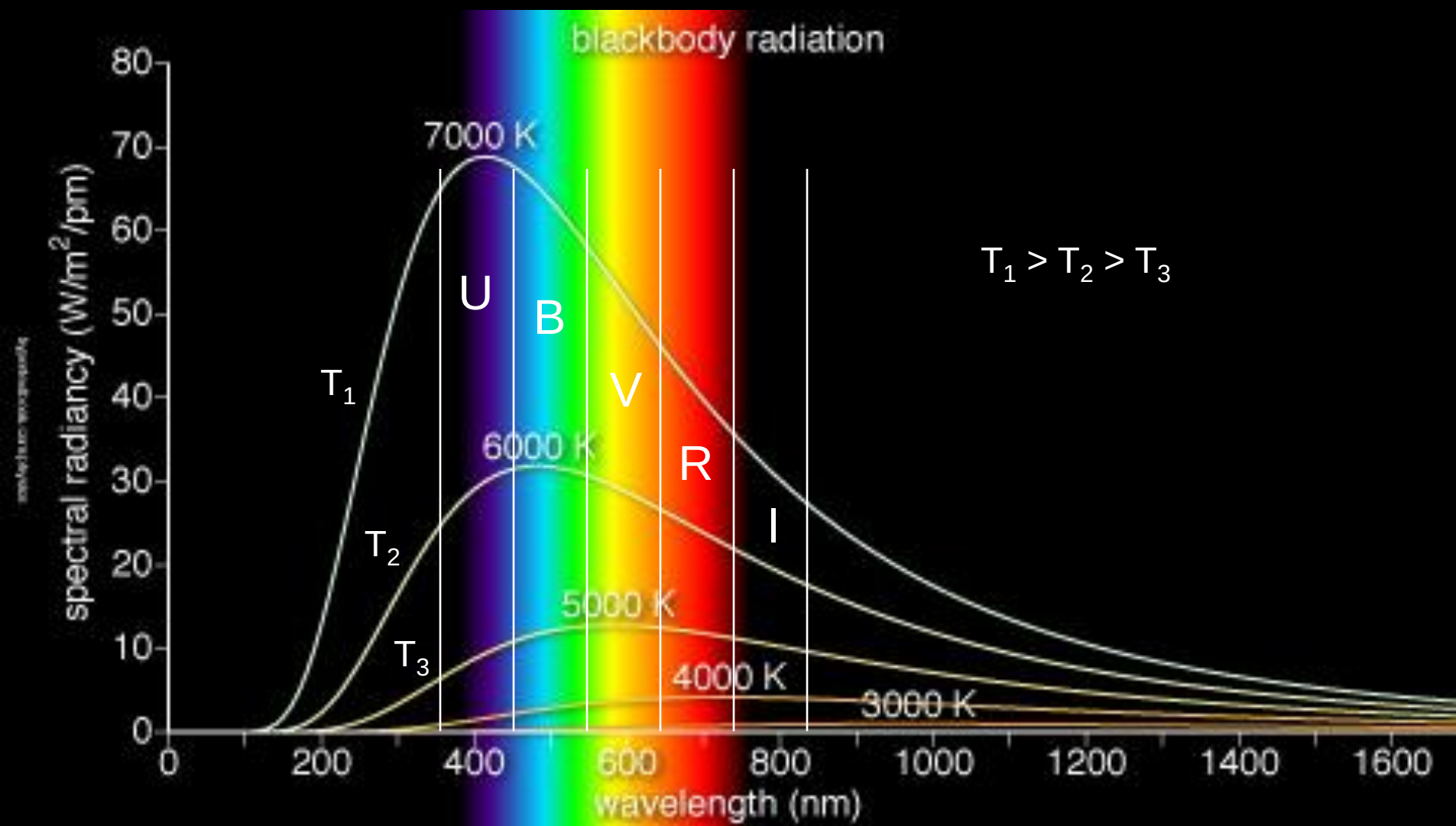


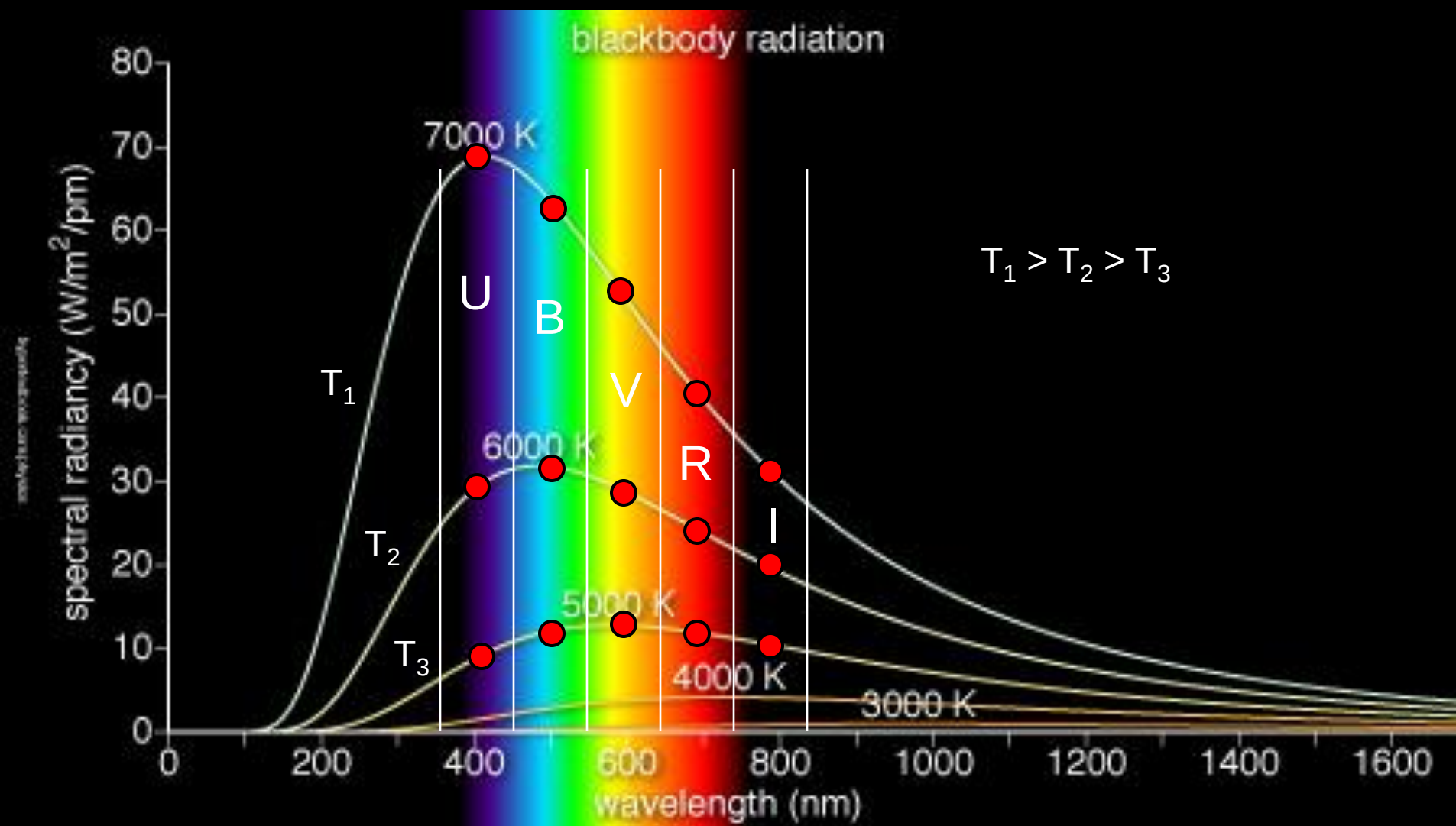
Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες.
Γραφική αναπαράσταση του νόμου του Planck.

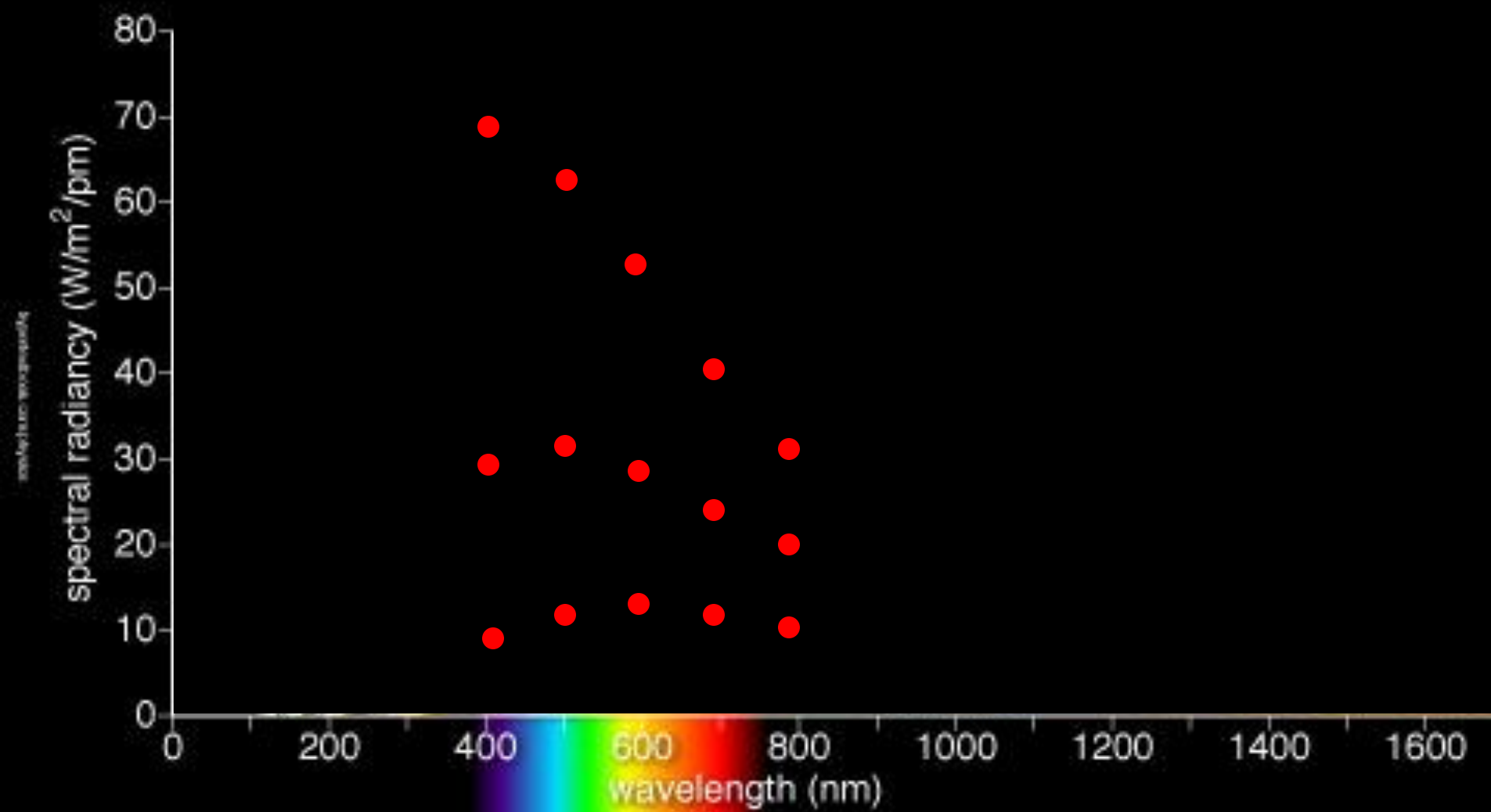


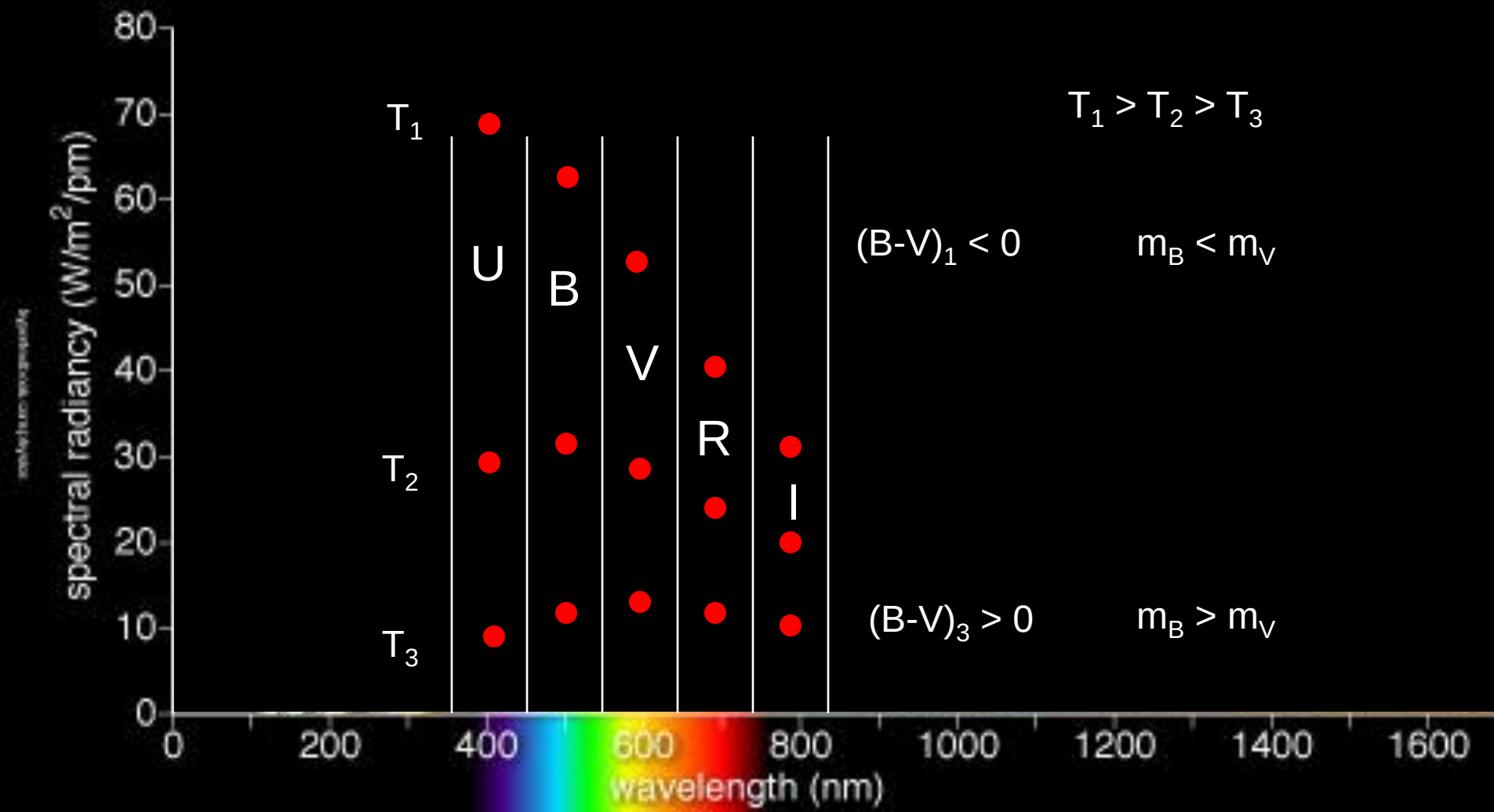


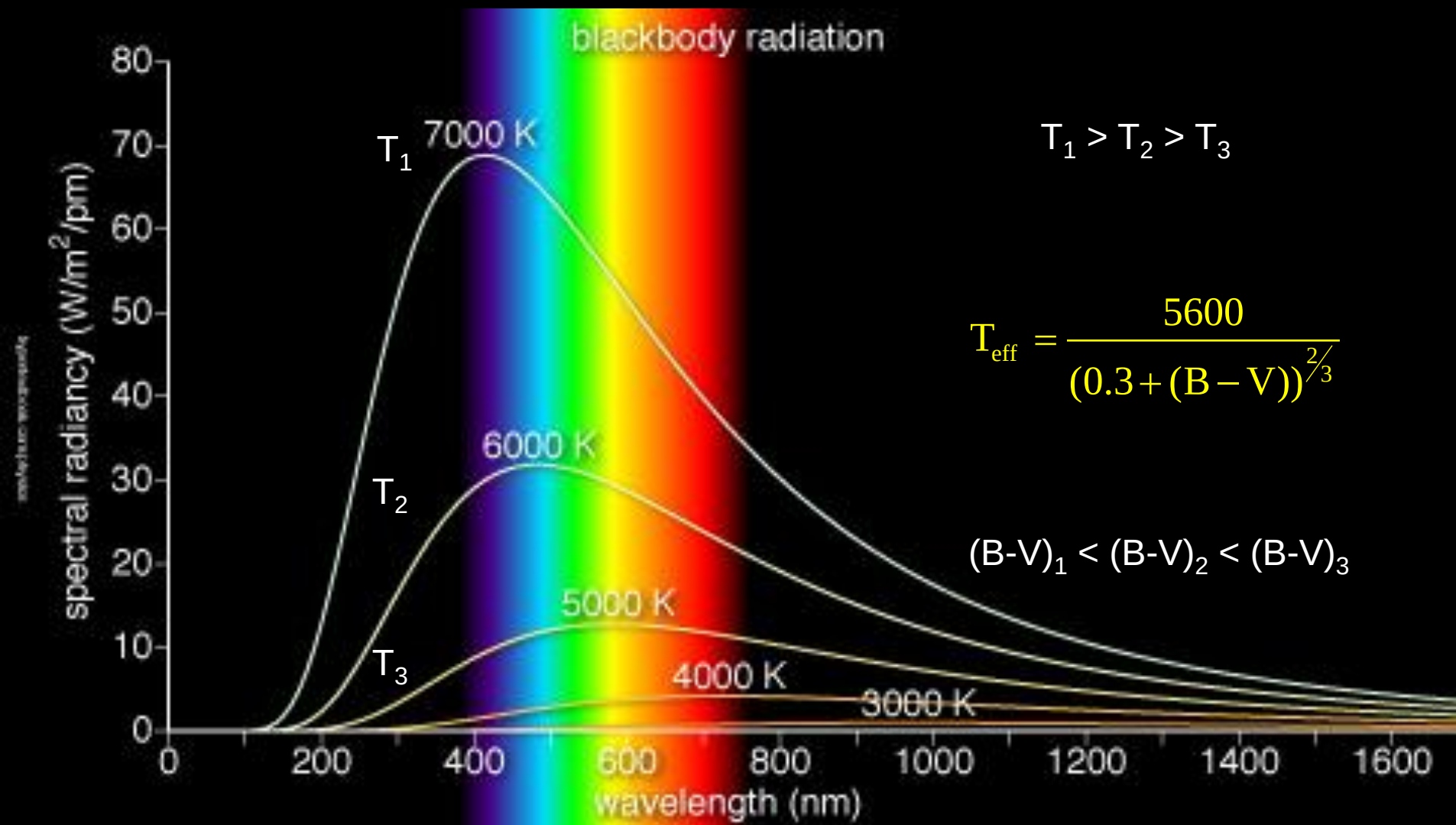




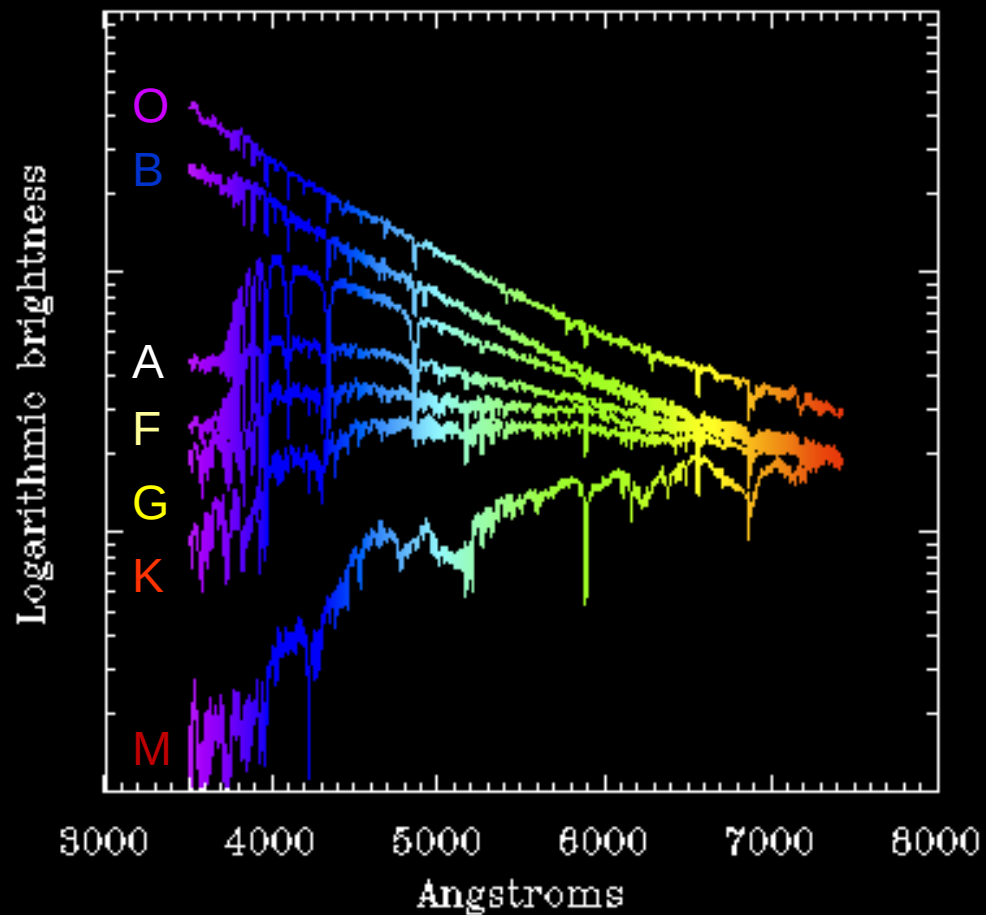






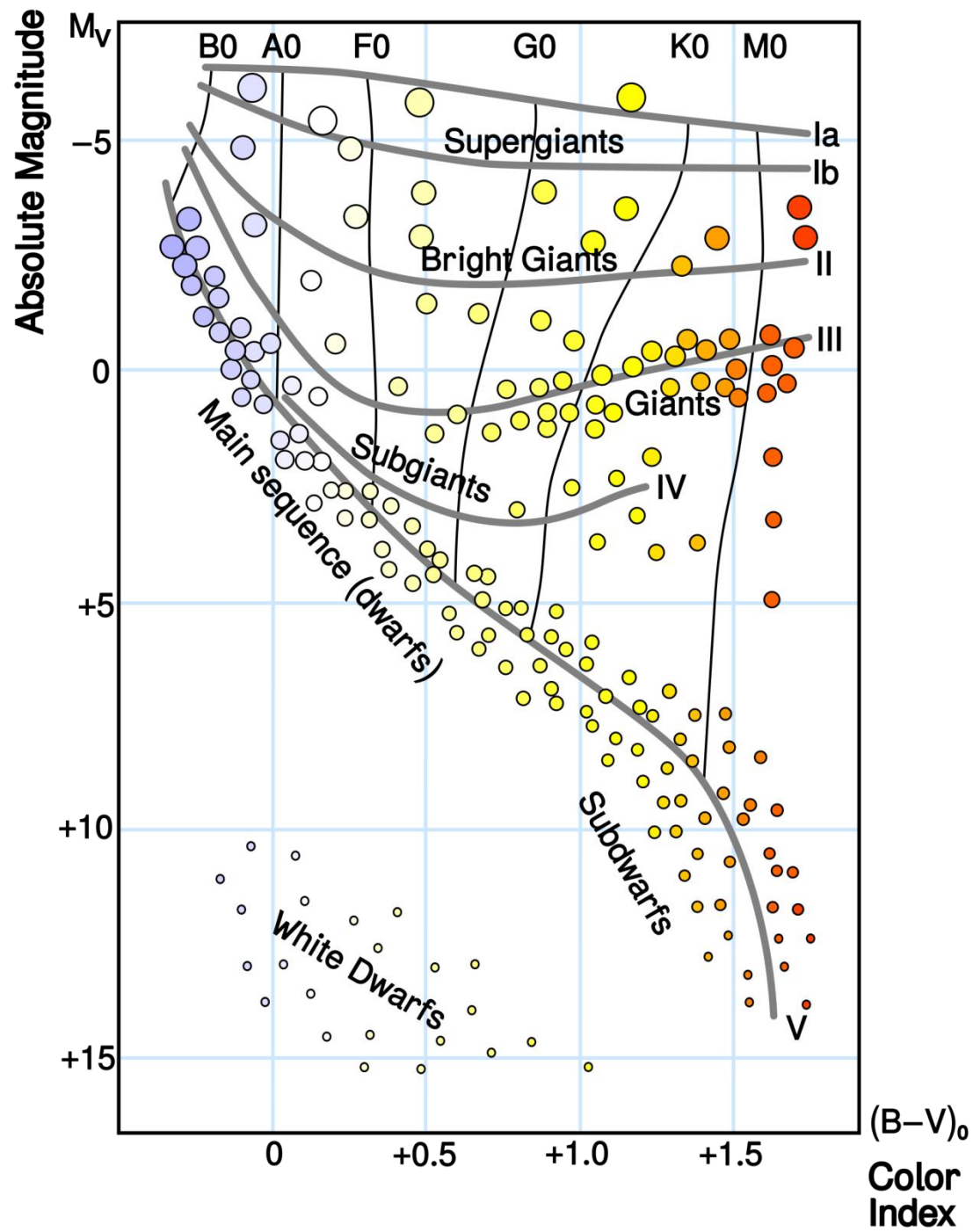


- Το χρώμα των αστερών

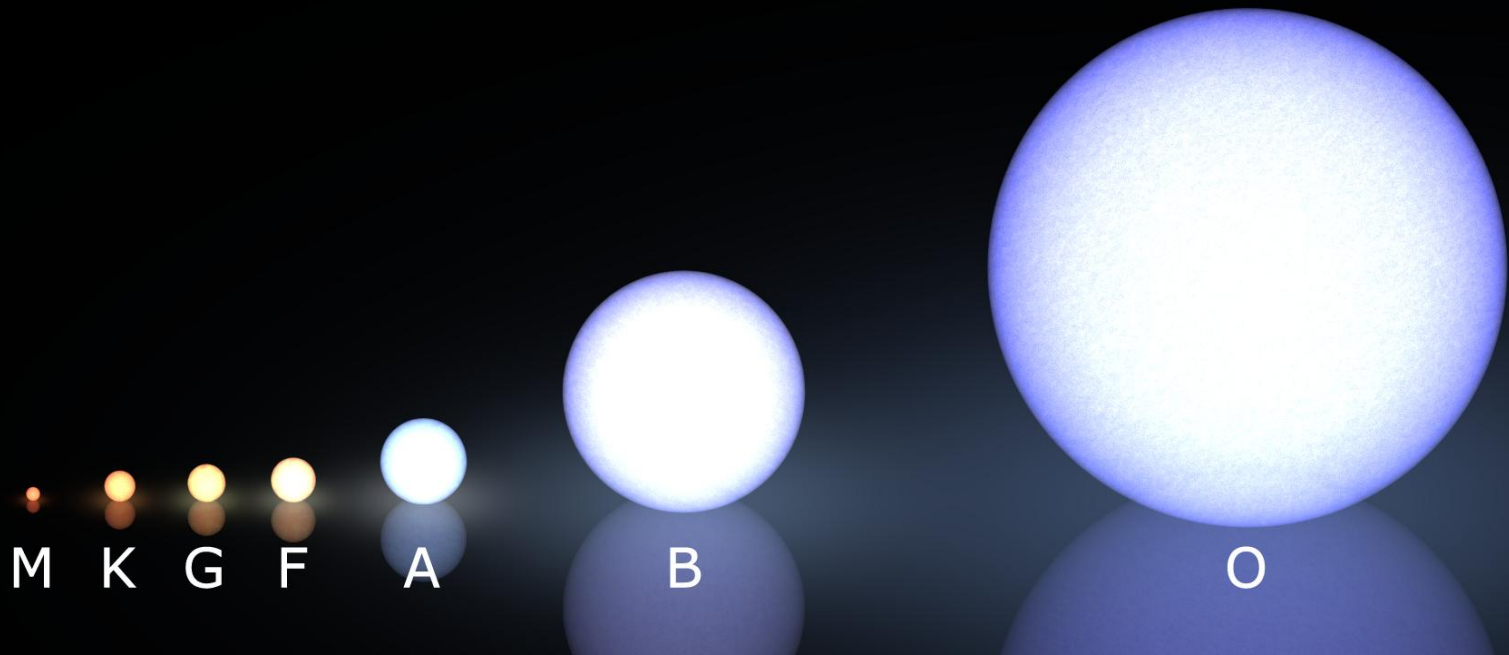


- Το διάγραμμα Hertzsprung-Russell (H-R)

- Ο **Ejnar Hertzsprung** (1873-1967) το 1906 τοποθέτησε τους αστέρες σε ένα διάγραμμα, με βάση το φασματικό τους τύπο και τη λαμπρότητά τους.
- Τελείως ανεξάρτητα, ο **Henry Norris Russell** (1877-1957) το 1910 έκανε την ίδια εργασία, δημιουργώντας ένα αντίστοιχο διάγραμμα.



Το χρώμα και το μέγεθος των αστερών



• Η φυσική του ατόμου

- Τα άτομα αποτελούνται από πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια.
- Κάθε στοιχείο έχει και τα ισότοπά του
- Κάθε άτομο έχει ενεργειακές στοιβάδες (στάθμες), οι οποίες απέχουν μεταξύ τους:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

- Ακόμη και το πιο απλό άτομο (υδρογόνο) μπορεί να έχει τουλάχιστον 200 ενεργειακές στάθμες, κάθε μια από τις οποίες μπορεί να φιλοξενεί ηλεκτρόνια.
- Τα ηλεκτρόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια όρια, δεν μπορούν να συγκρατούνται στο άτομο και αποδεσμεύονται από αυτό, καθιστώντας το άτομο ιονισμένο.

- **Η δομή των φασματικών γραμμών**

- Κάθε φασματική γραμμή προκύπτει από μία συγκεκριμένη μετάπτωση ηλεκτρονίου από μία στάθμη σε μία άλλη.
- Η ενέργεια αυτή είναι μονοσήμαντα προκαθορισμένη, και επομένως η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι μονοχρωματική.
- Η φύση του ατόμου όμως προκαλεί μικρές διακυμάνσεις αυτής της ενέργειας και έτσι οι φασματικές γραμμές δεν είναι απείρως λεπτές. Παρουσιάζουν δομή, η οποία καθιστά τις γραμμές ευρείες και προκαλείται από διάφορους παράγοντες.

Η διεύρυνση των φασματικών γραμμών οφείλεται σε διάφορους παράγοντες:

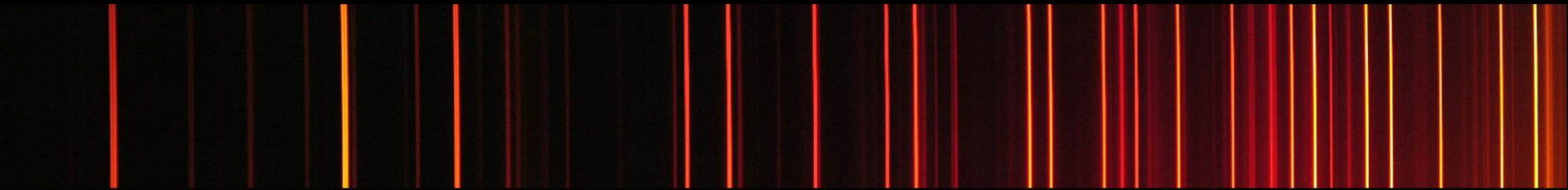
Διεύρυνση λόγω φαινομένου Doppler: τα άτομα βρίσκονται σε διαρκή θερμική ή τυρβώδη κίνηση μέσα στο αέριο. Αυτό προκαλεί διεύρυνση 0.02 nm στις γραμμές του υδρογόνου. Επίσης οι αστέρες και τα ουράνια σώματα γενικότερα κινούνται στο χώρο. Η περιστροφή των αστείων έχει σαν αποτέλεσμα τη διεύρυνση των φασματικών γραμμών, διότι το φαινόμενο Doppler γίνεται αισθητό στα όρια των αστείων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τον παρατηρητή. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις αστείων παρατηρούνται συστολές ή διαστολές της επιφάνειάς τους ή των αερίων κελυφών που τα περιβάλλουν, με αποτέλεσμα την περαιτέρω διεύρυνση των φασματικών γραμμών.

Κβαντική διεύρυνση: η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg ορίζει ότι η ενέργεια που έχουν τα ηλεκτρόνια στο άτομο δεν είναι απόλυτα προσδιορισμένη. Η ακρίβεια προσδιορισμού εξαρτάται από το χρόνο που το κάθε ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε κάθε στοιβάδα. Αυτό προκαλεί διεύρυνση 10^{-6} nm στις φασματικές γραμμές.

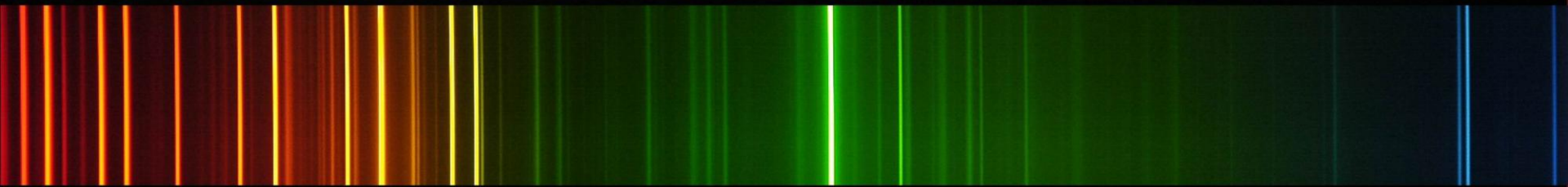
Διεύρυνση λόγω συγκρούσεων ή πίεσης: τα άτομα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (λόγω συγκρούσεων ή ακόμη και ηλεκτροστατικά – φαινόμενο Stark) με αποτέλεσμα να αλλάζουν ελαφρώς οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων.

Μαγνητική διεύρυνση (Zeeman): το μαγνητικό πεδίο διασπά τις ενεργειακές στάθμες σε περισσότερες από μία, προσθέτοντας (ή αφαιρώντας) ενέργεια στο spin του ηλεκτρονίου.

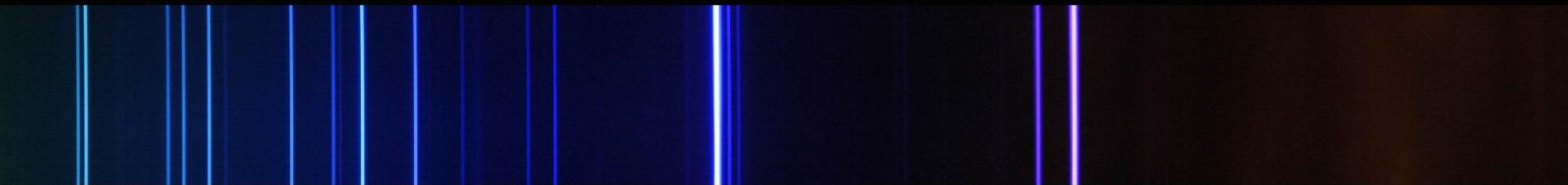
Το φάσμα βαθμονόμησης (Hg – Ne – Xe)



7032 Å



5461 Å



4358 Å

4047 Å

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κοσμάς Γαζέας

ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

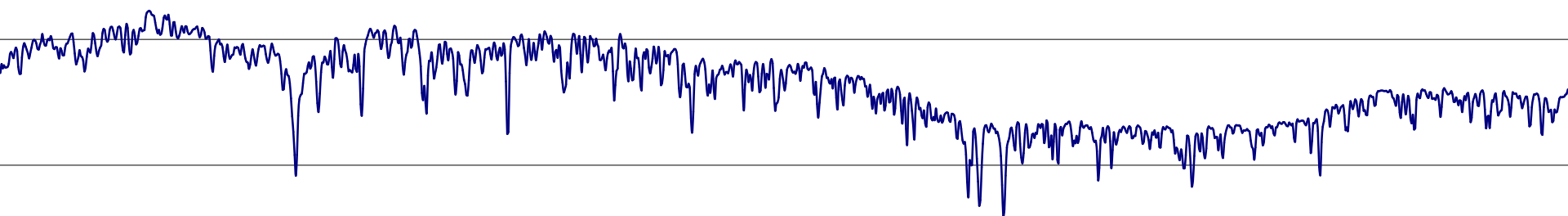
Μέρος Β΄

- Βαθμονόμηση φάσματος
- Φασματική ταξινόμηση

• Βαθμονόμηση φάσματος

- Η επεξεργασία των φασμάτων περιλαμβάνει τη κλασσική επεξεργασία ψηφιακής εικόνας (διόρθωση με τις εικόνες bias, dark, flat) και στη συνέχεια την αναγωγή της διδιάστατης εικόνας σε μονοδιάστατη (φωτομετρικό εγγράφημα). Η αναγωγή αυτή γίνεται με μια φωτομετρική σάρωση της εικόνας του φάσματος κατά μήκος του άξονα της διασποράς.
- Κάθε φάσμα έχει μεταβαλλόμενη ένταση στα διάφορα μήκη κύματος. Για να γίνει πιο εύκολα η ανάλυση, κάθε φάσμα πρέπει να κανονικοποιηθεί, έτσι ώστε η μέγιστη ένταση σε όλα τα μήκη κύματος να είναι ίση με τη μονάδα.
- Πριν την ανάλυση, κάθε φάσμα πρέπει να βαθμονομηθεί (αντιστοιχία pixel με πραγματικό μήκος κύματος) με τη βοήθεια των φασμάτων βαθμονόμησης. Αυτά τα φάσματα λαμβάνονται με τη βοήθεια ειδικών λυχνιών φασμάτων εκπομπής, οι οποίες έχουν απόλυτα γνωστές φασματικές γραμμές.

Αρχική εικόνα (αστρικό φάσμα)



Σάρωση αρχικής εικόνας

(pixels)

400

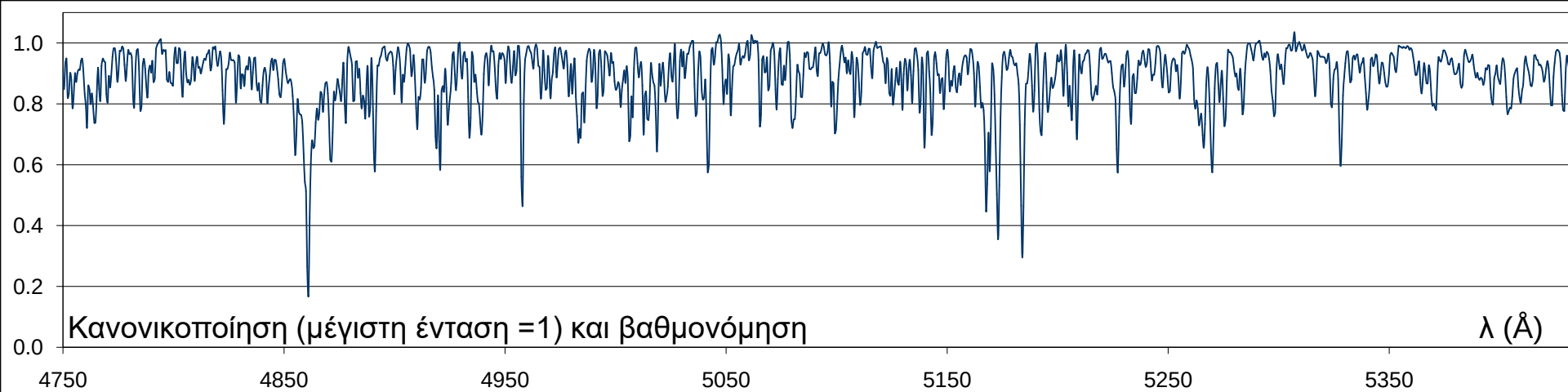
600

800

1000

1200

1400



Κανονικοποίηση (μέγιστη ένταση =1) και βαθμονόμηση

λ ($\text{\AA}$)

4750

4850

4950

5050

5150

5250

5350

- Φασματική ταξινόμηση

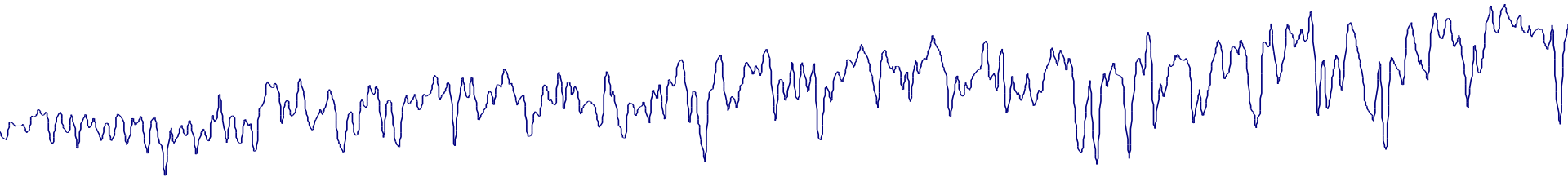
- Η ταξινόμηση γίνεται με σύγκριση των αγνώστων φασμάτων με άλλα, γνωστά.



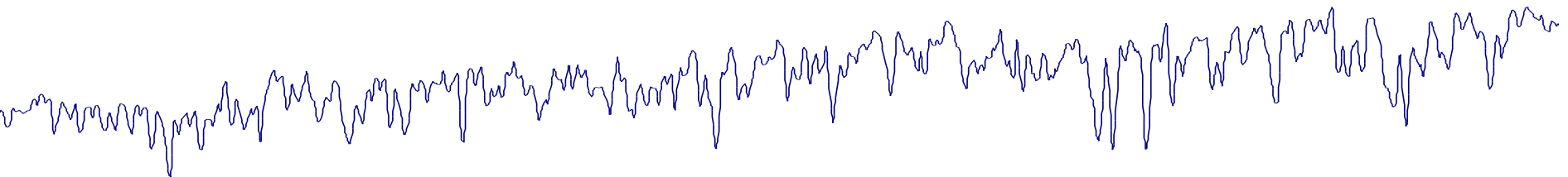
α Cas (K0)

ϵ Peg (K0)

α Cas (K0)



ϵ Peg (K0)



Αστρικά Φάσματα Τύπου O, B, A, F, G, K

| | | |||

O9 V

B5 V

A5 V

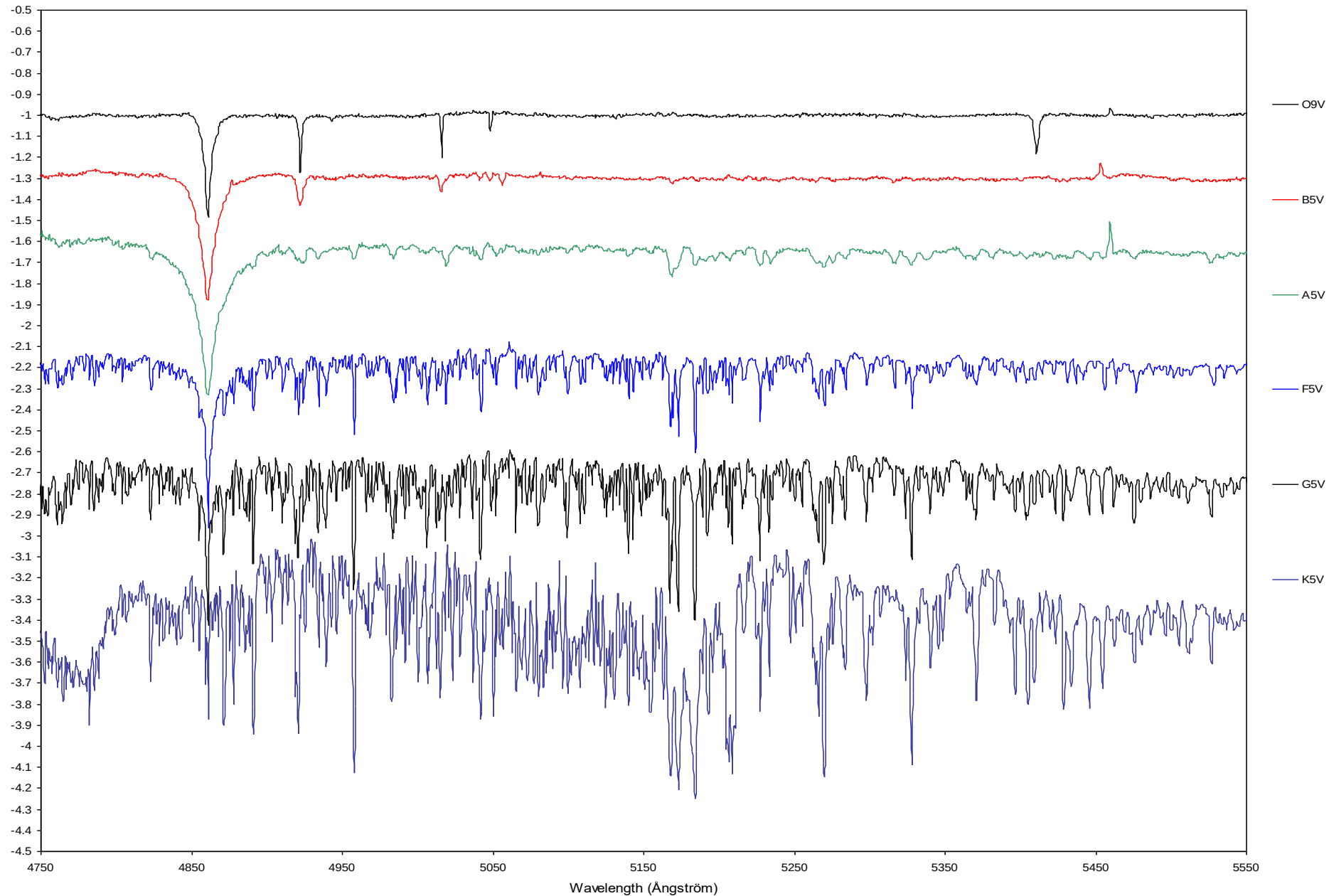
F5 V

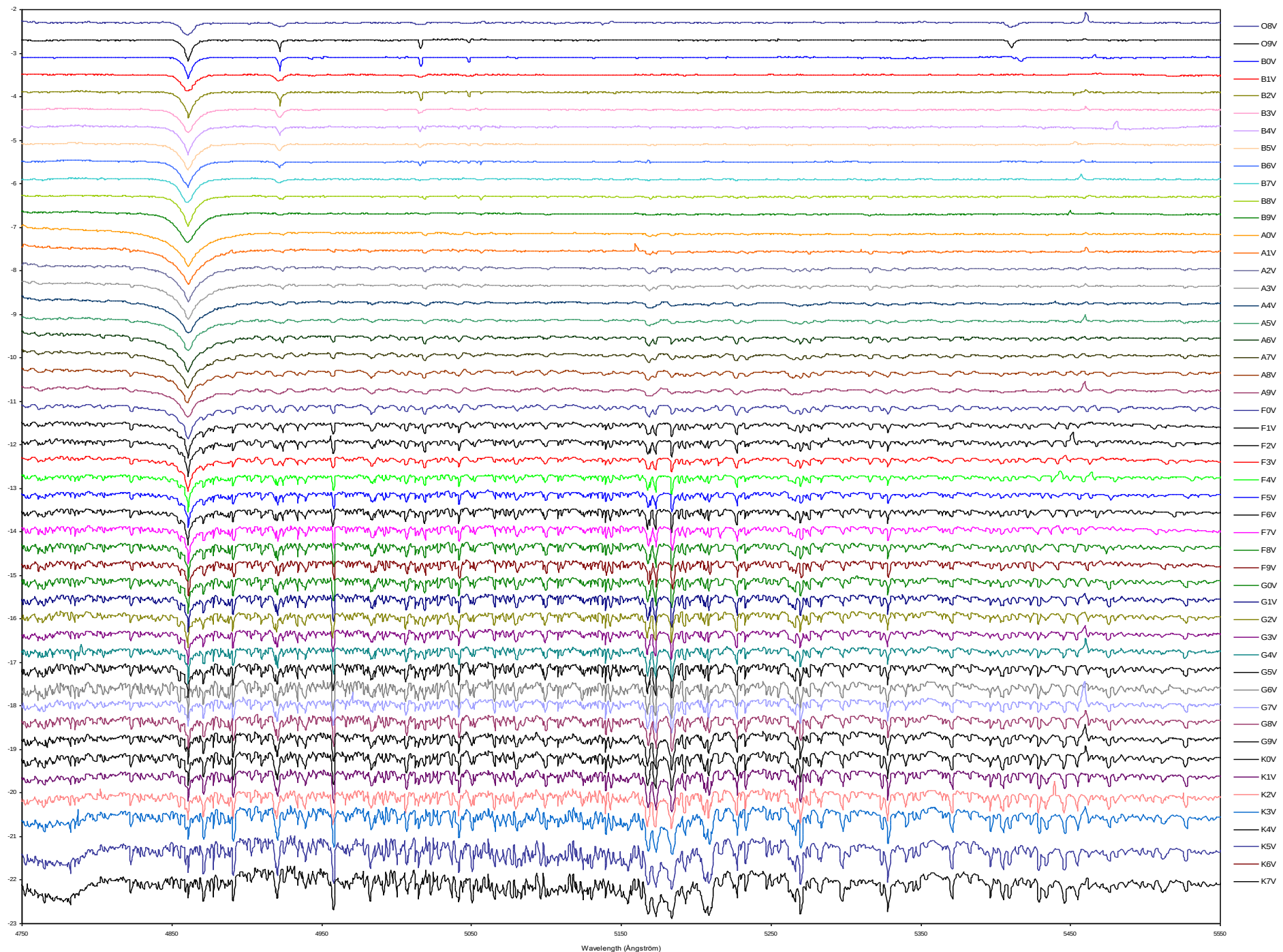
G5 V

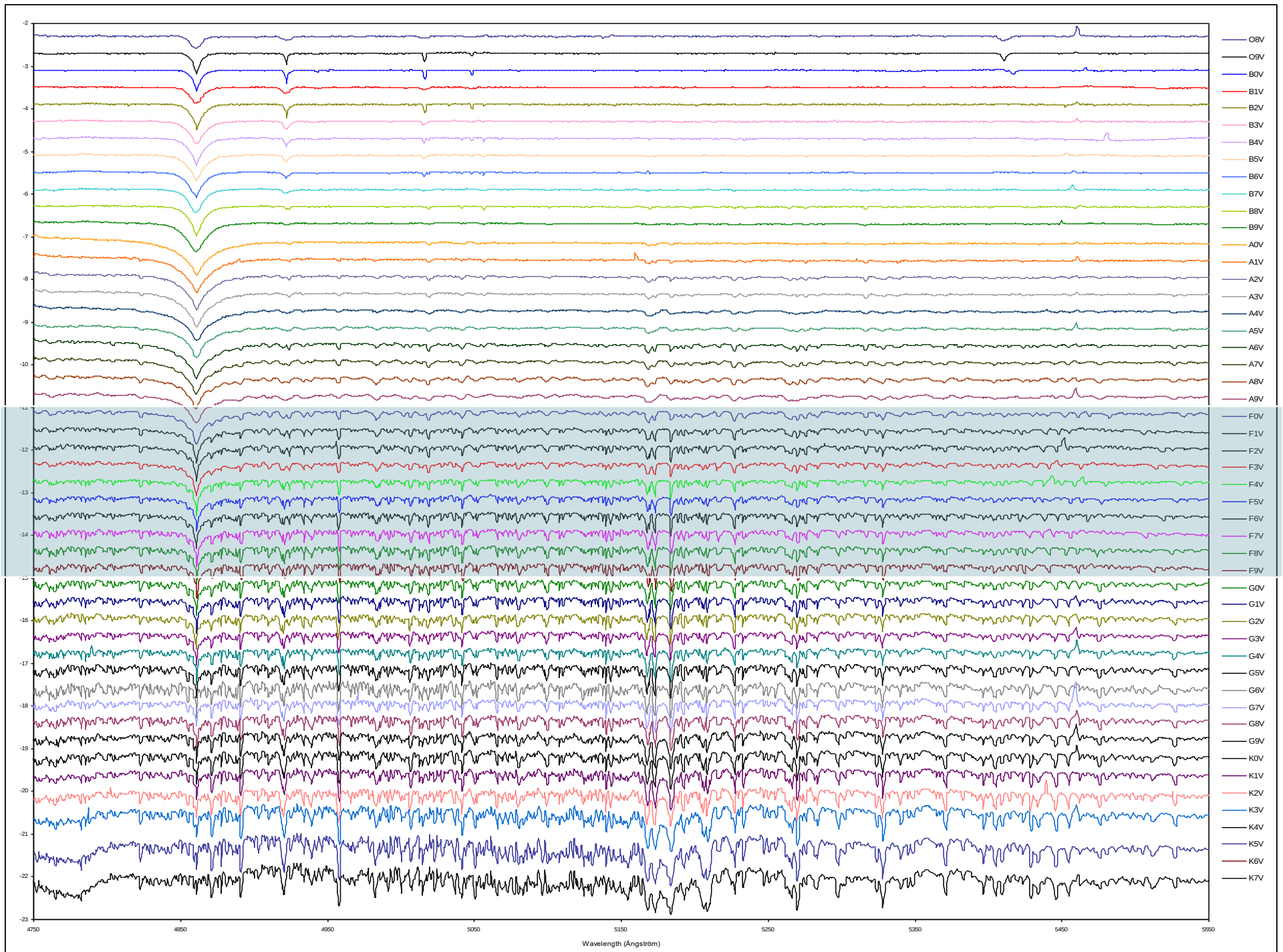
K5 V

| | | |||
H β He He Mg

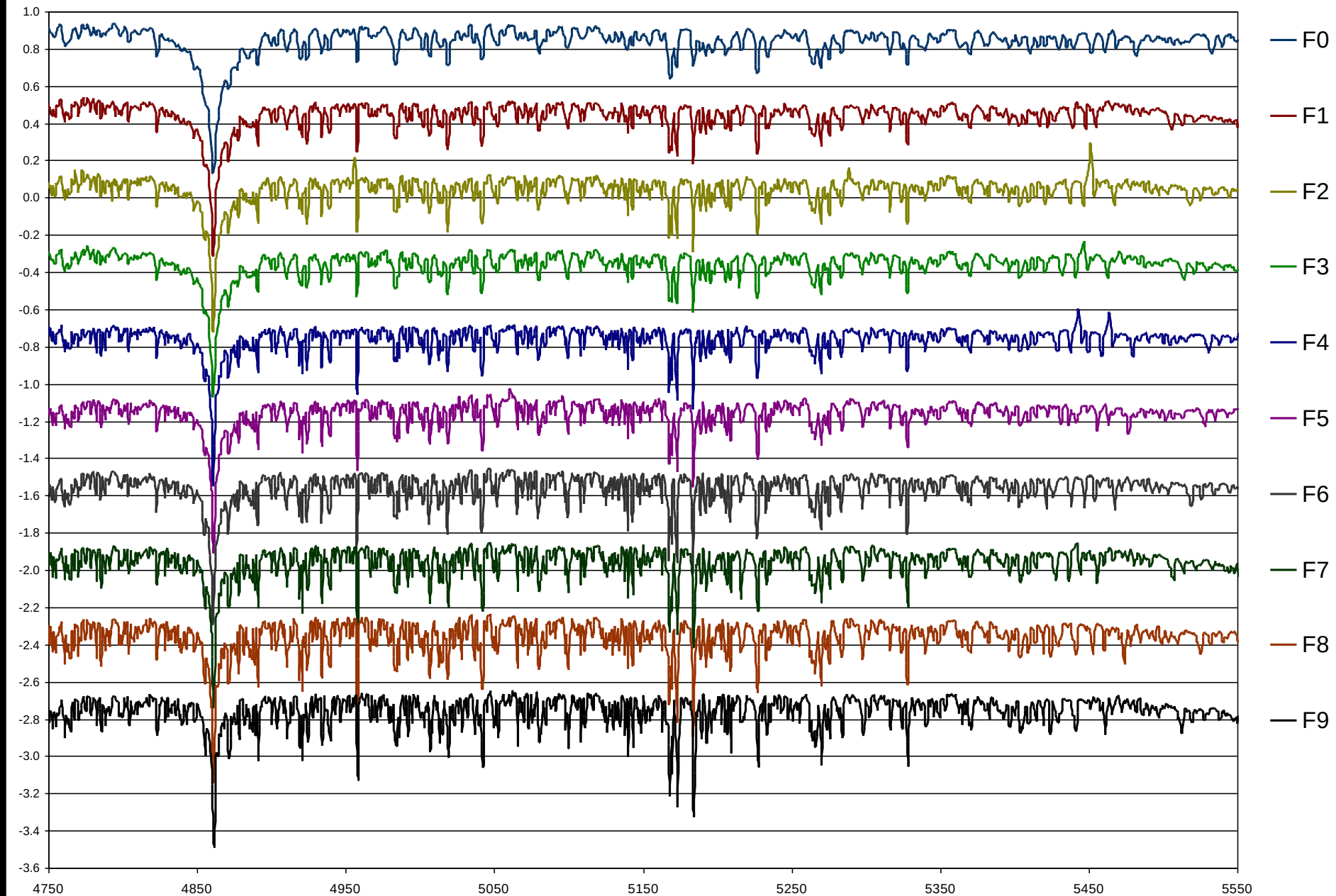
Φασματοφωτομετρία Αστέρων O, B, A, F, G, K

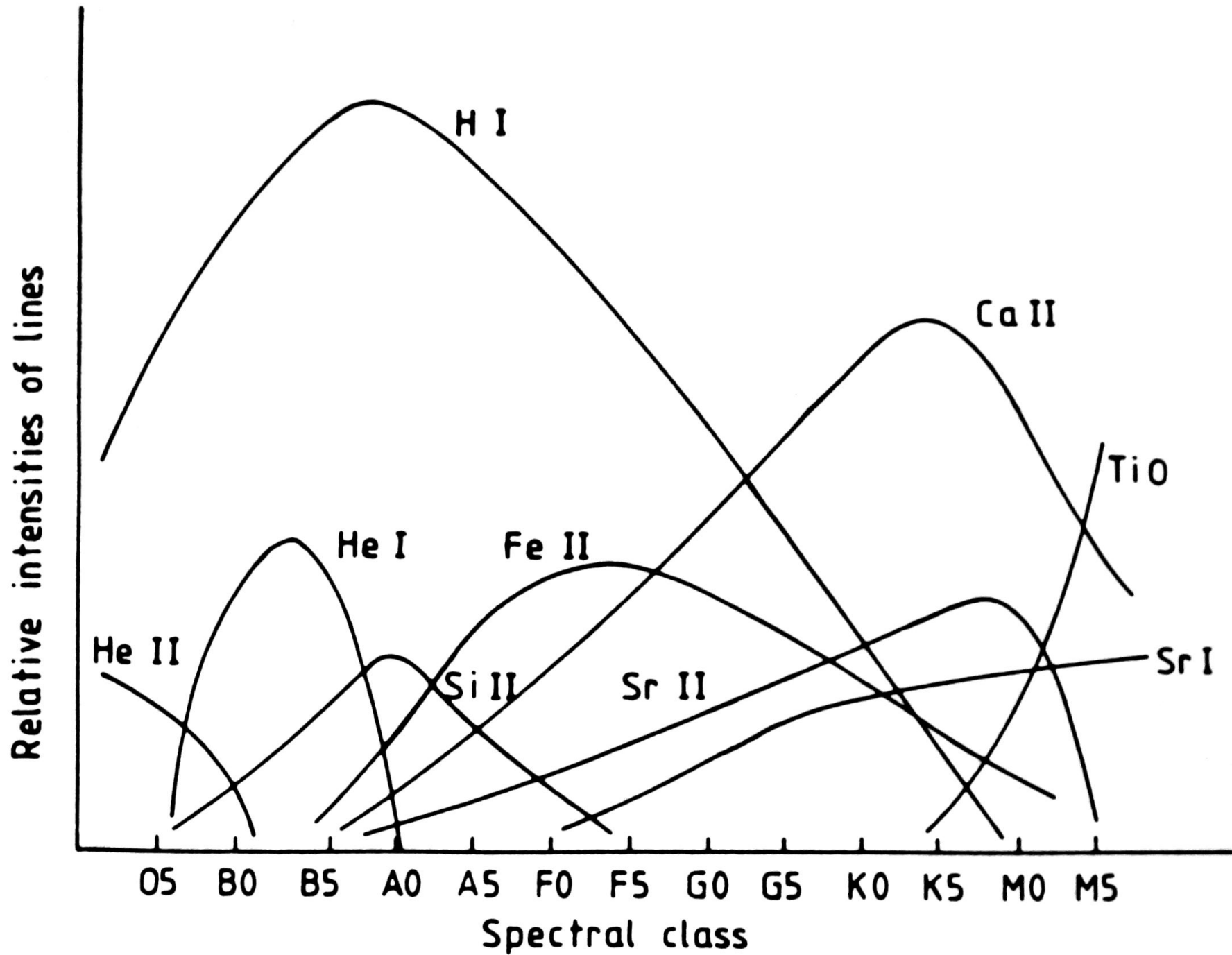






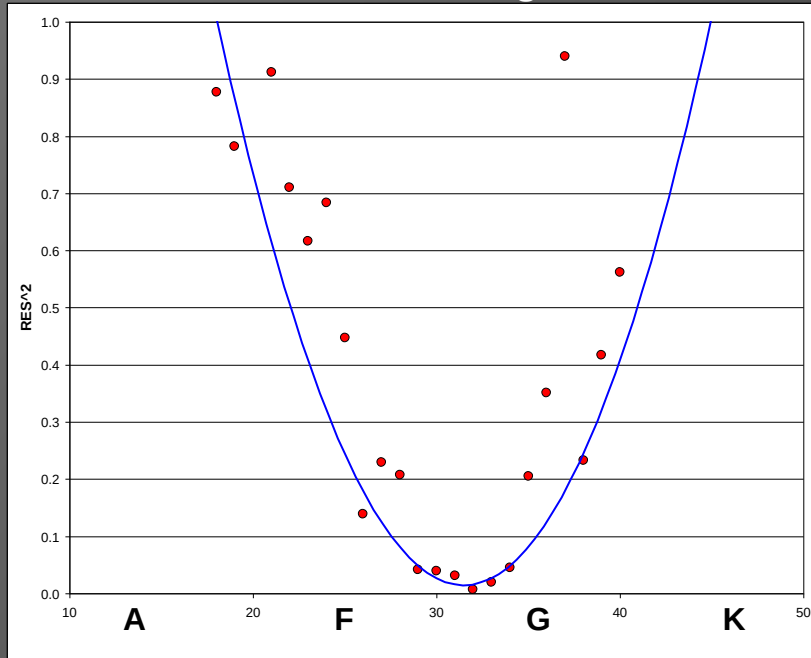
Αστέρες Φασματικού Τύπου F(0-9) V





Φασματική Ταξινόμηση

HIP 23835 5.5 mag

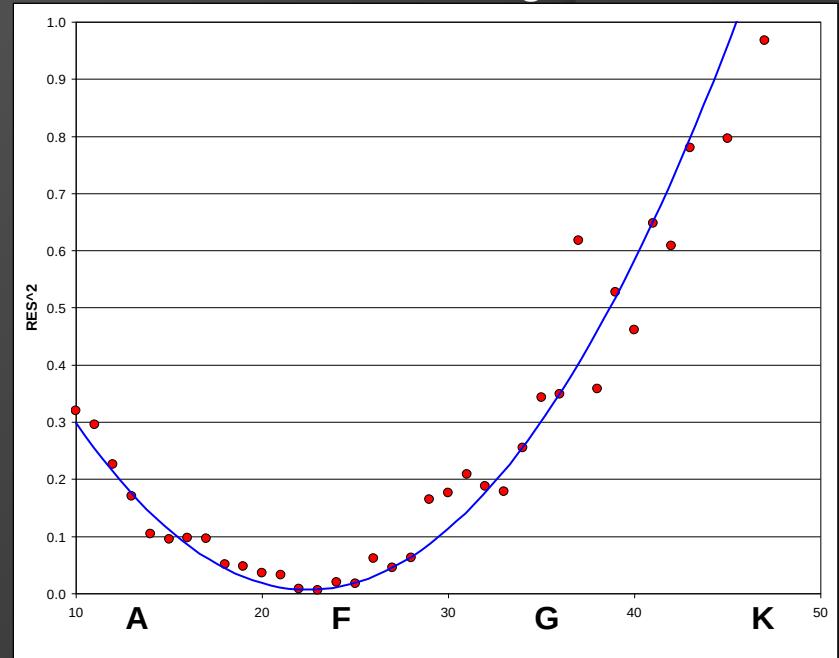


HIP 23835 G0.7 V (± 0.3)

Βιβλιογραφία: G1 V

Θερμοκρασία: 5900 (± 30) K

V1130 Tau 6.7 mag



V1130 Tau F2.3 V (± 0.4)

Βιβλιογραφία: F3 V

Θερμοκρασία: 6700 (± 40) K

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κοσμάς Γαζέας

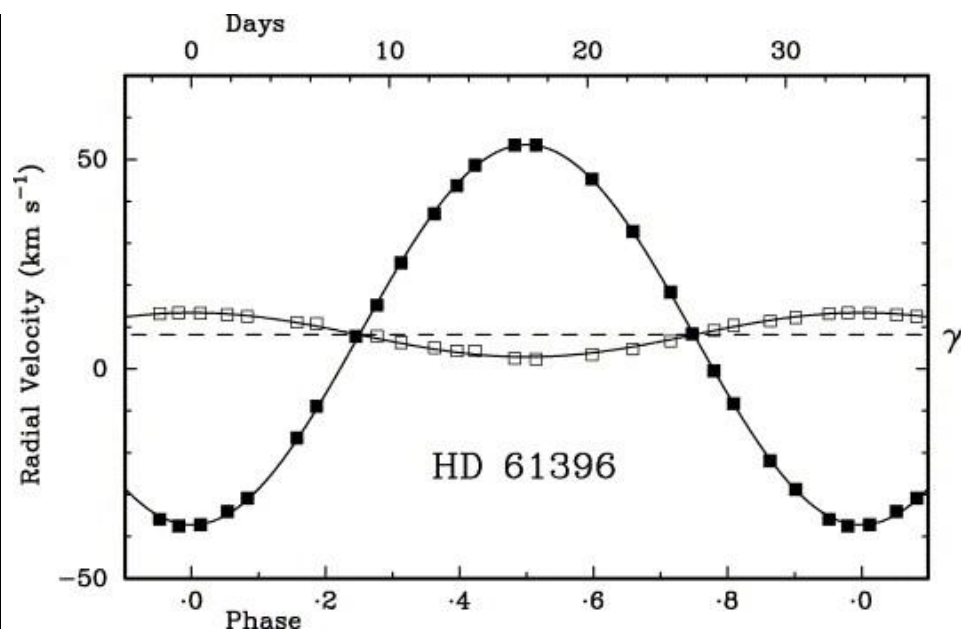
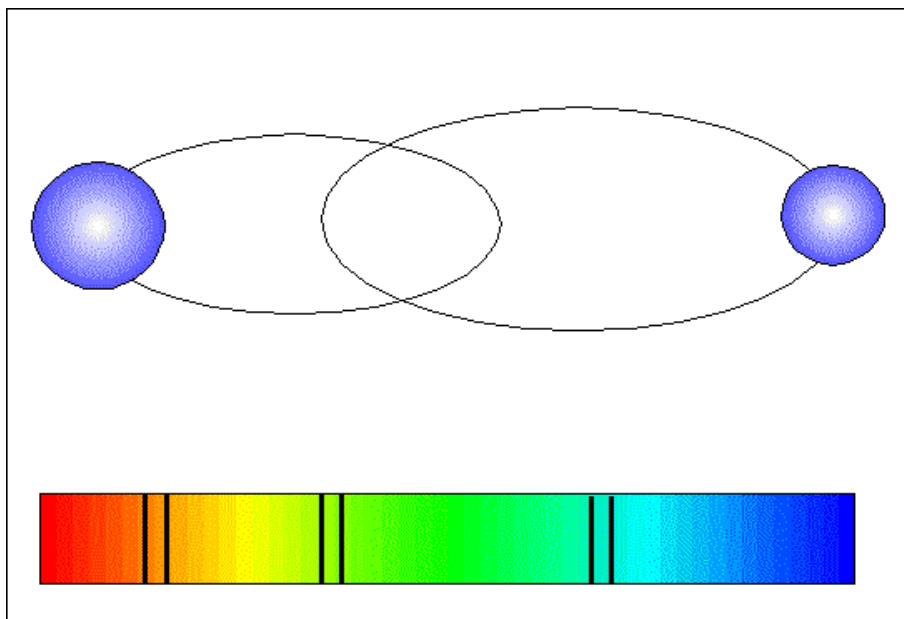
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

Μέρος Γ΄

- Φάσματα διπλών αστρικών συστημάτων
- Εφαρμογές φασματοσκοπίας

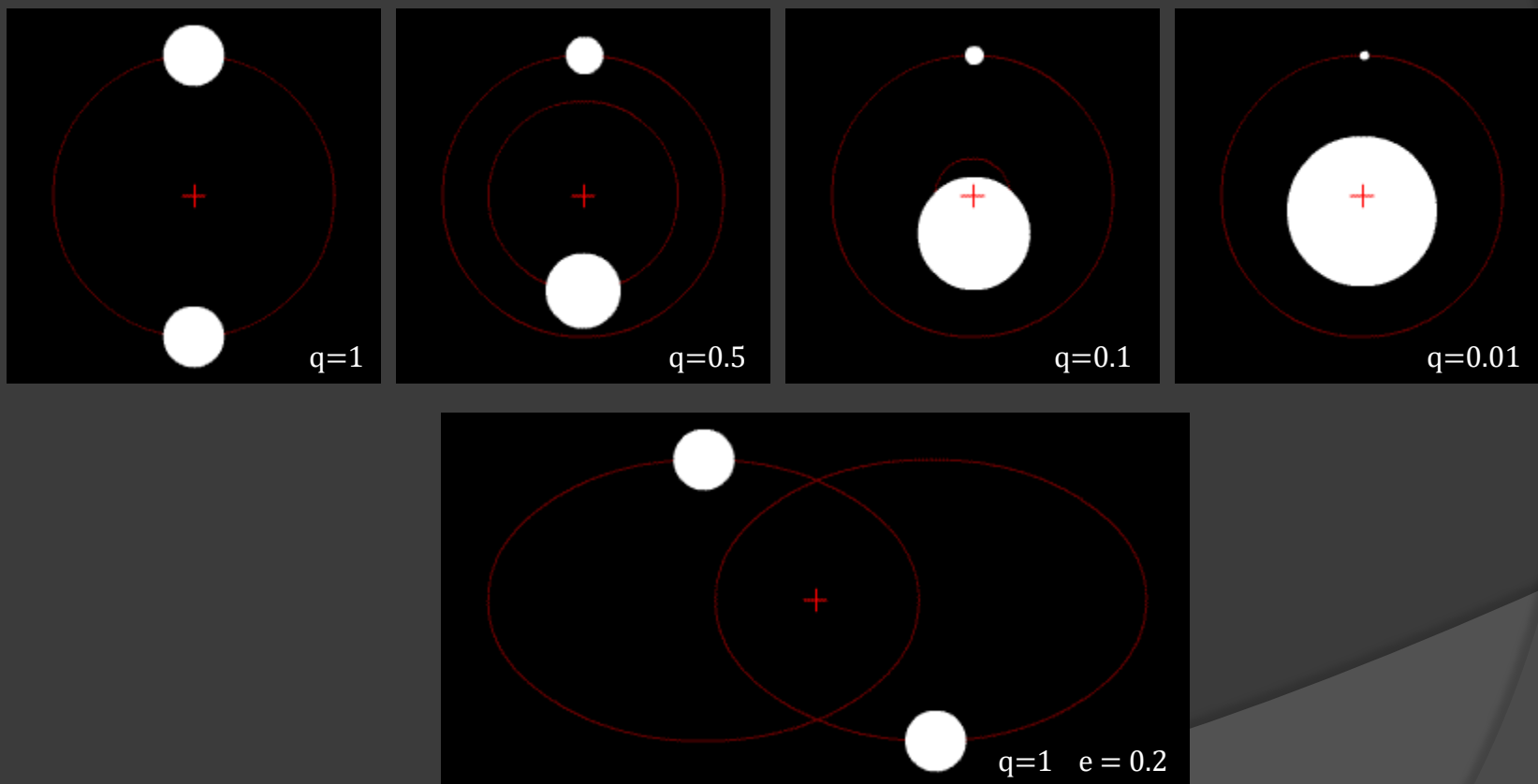
• Φάσματα διπλών αστέρων

- Οι φασματικές γραμμές στα διπλά αστρικά συστήματα εμφανίζονται διπλές, ακολουθώντας το φαινόμενο Doppler. Οι κινήσεις τους είναι περιοδικές και από τη μορφή τους μπορούμε να μελετήσουμε τις τροχιές των δύο αστέρων, καθώς και το λόγο μαζών τους.



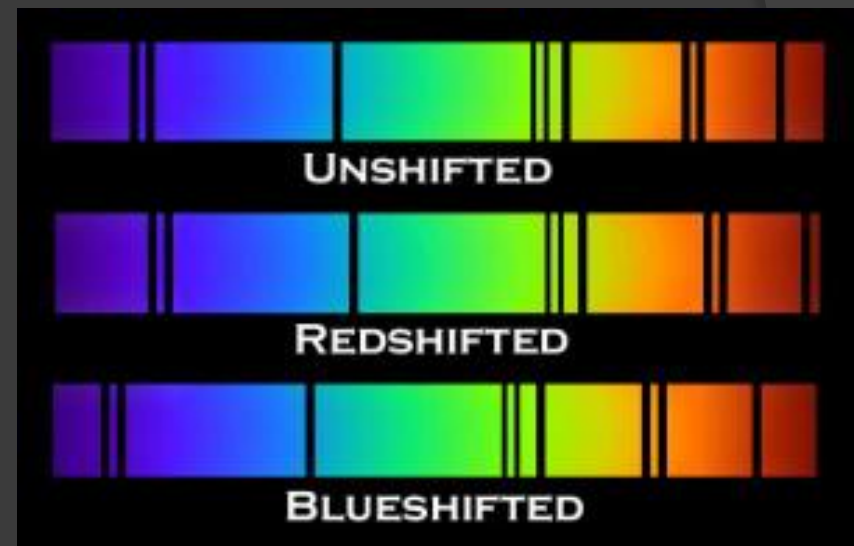
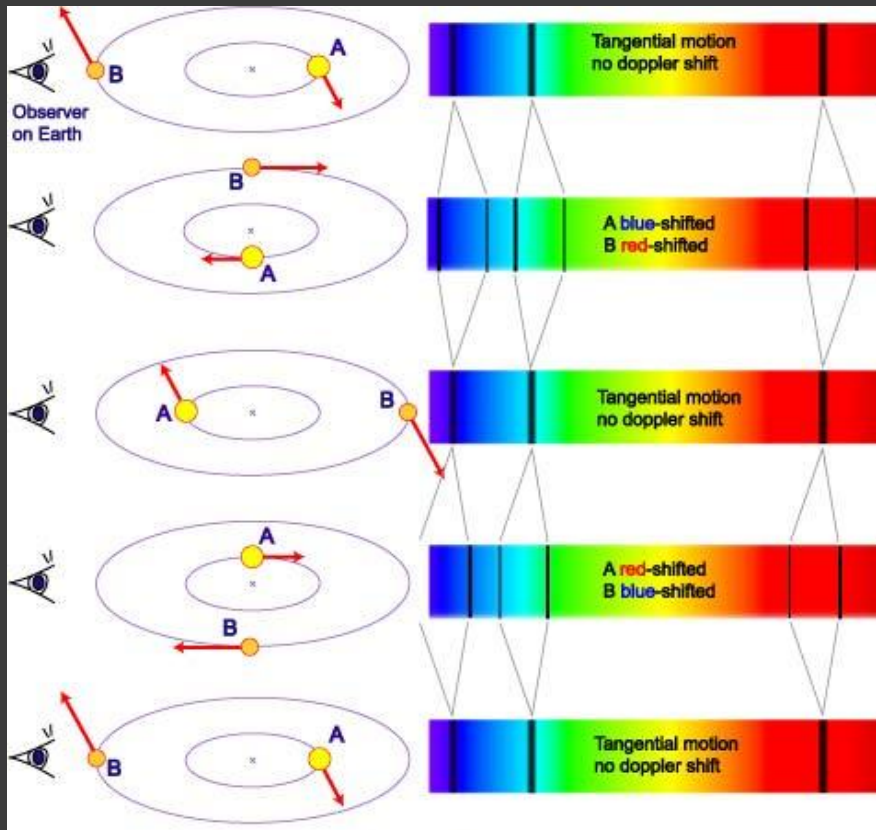
• Φάσματα διπλών αστέρων

- Ο λόγος μαζών των μελών ενός διπλού συστήματος επηρεάζει την τροχιά τους, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στα φάσματα.



• Φάσματα διπλών αστέρων

- Η ένταση των φασματικών γραμμών σε ένα σύστημα αντικατοπτρίζει και τη λαμπρότητα των μελών του.



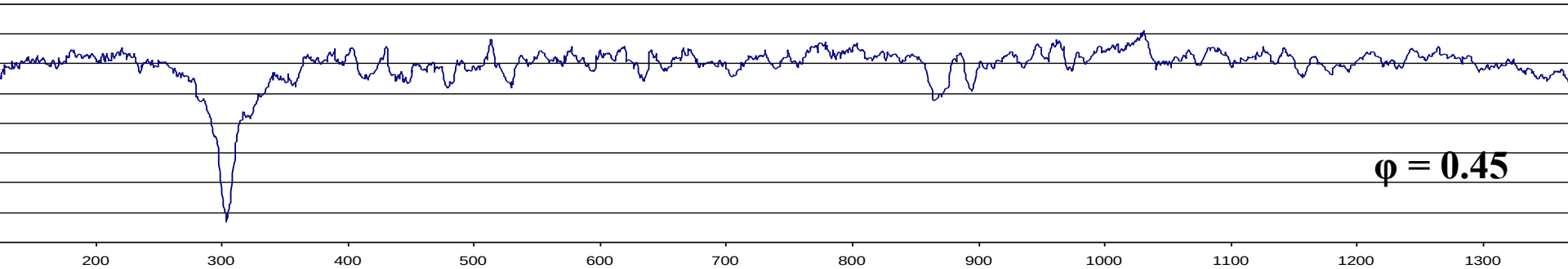
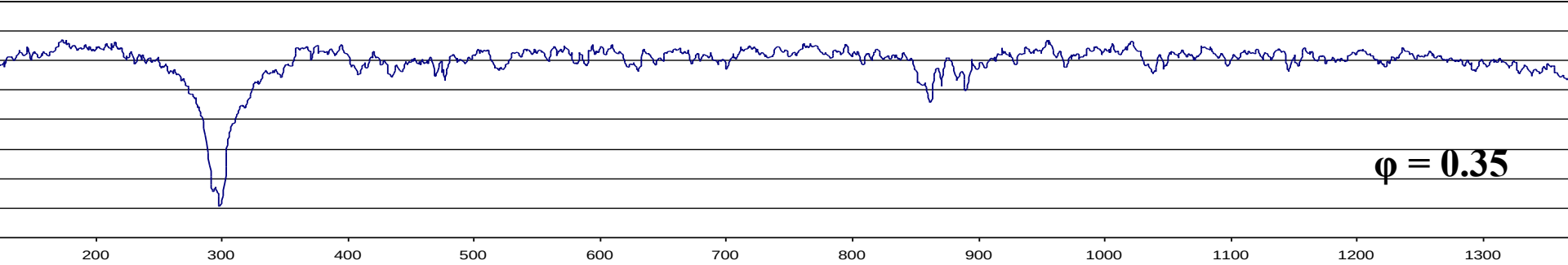
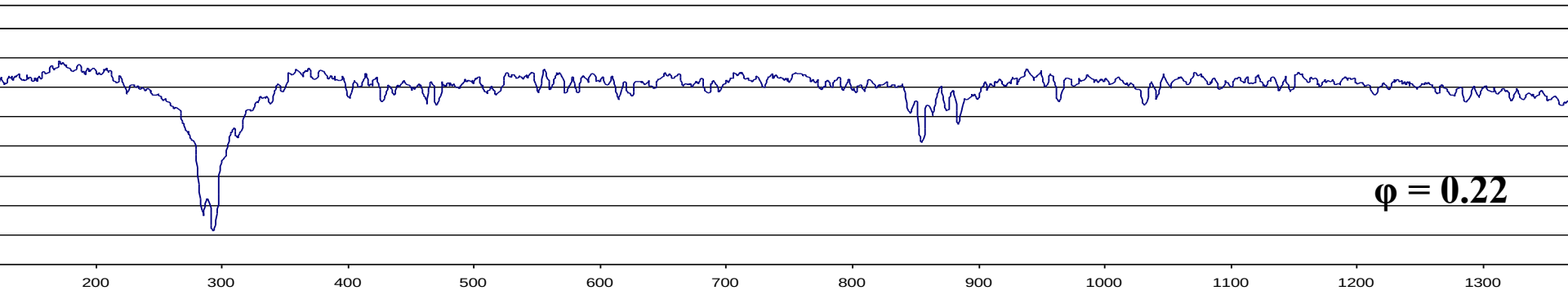
Εκλειπτικό σύστημα V1130 Tau (F3 V, Vmag=6.7)

$$\phi = 0.22$$

$$\phi = 0.35$$

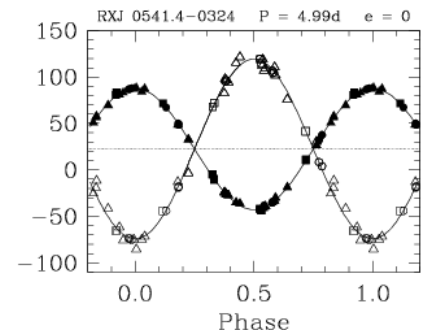
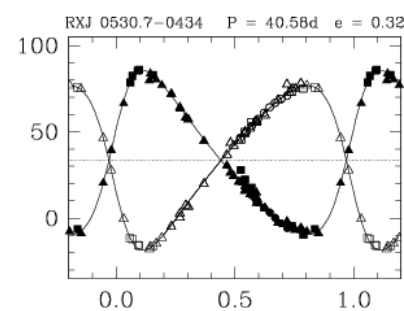
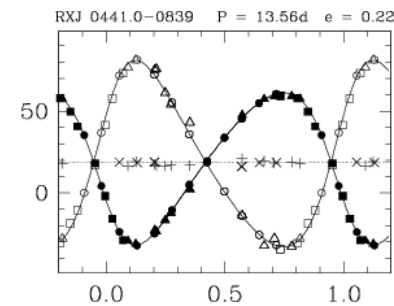
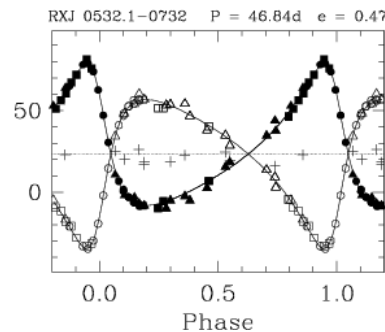
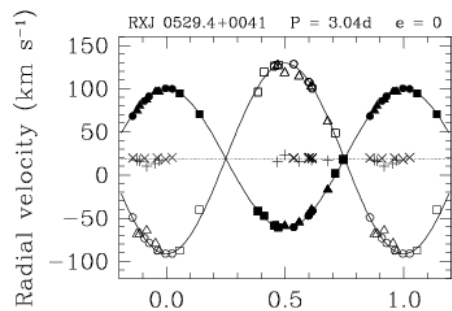
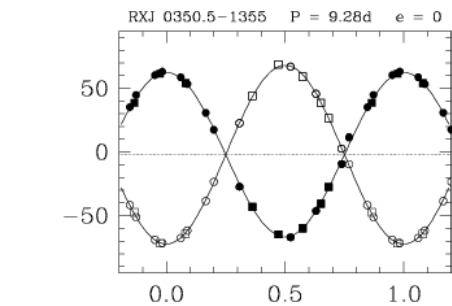
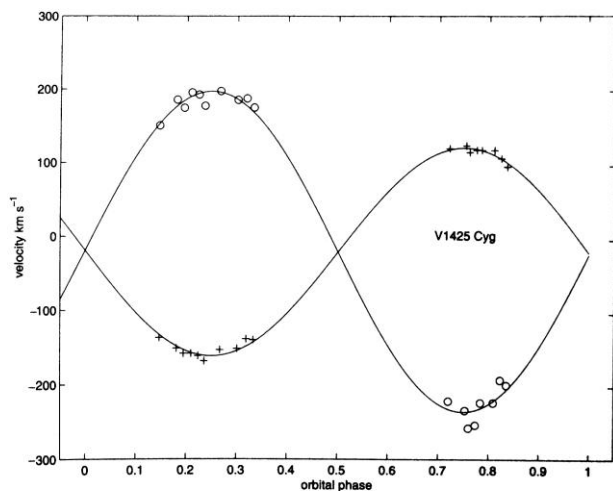
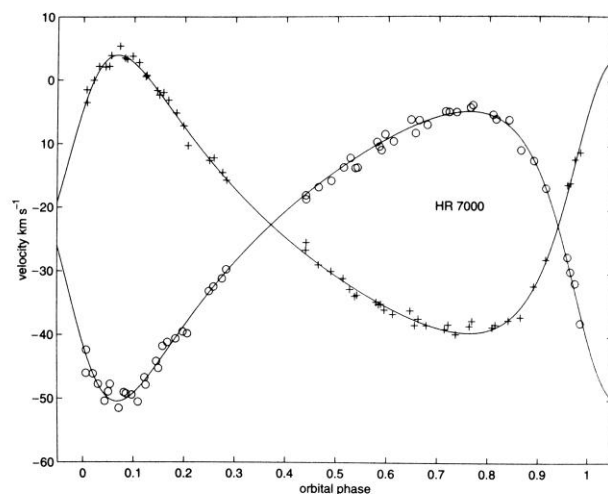
$$\phi = 0.45$$

Eclipsing Binary V1130 Tau

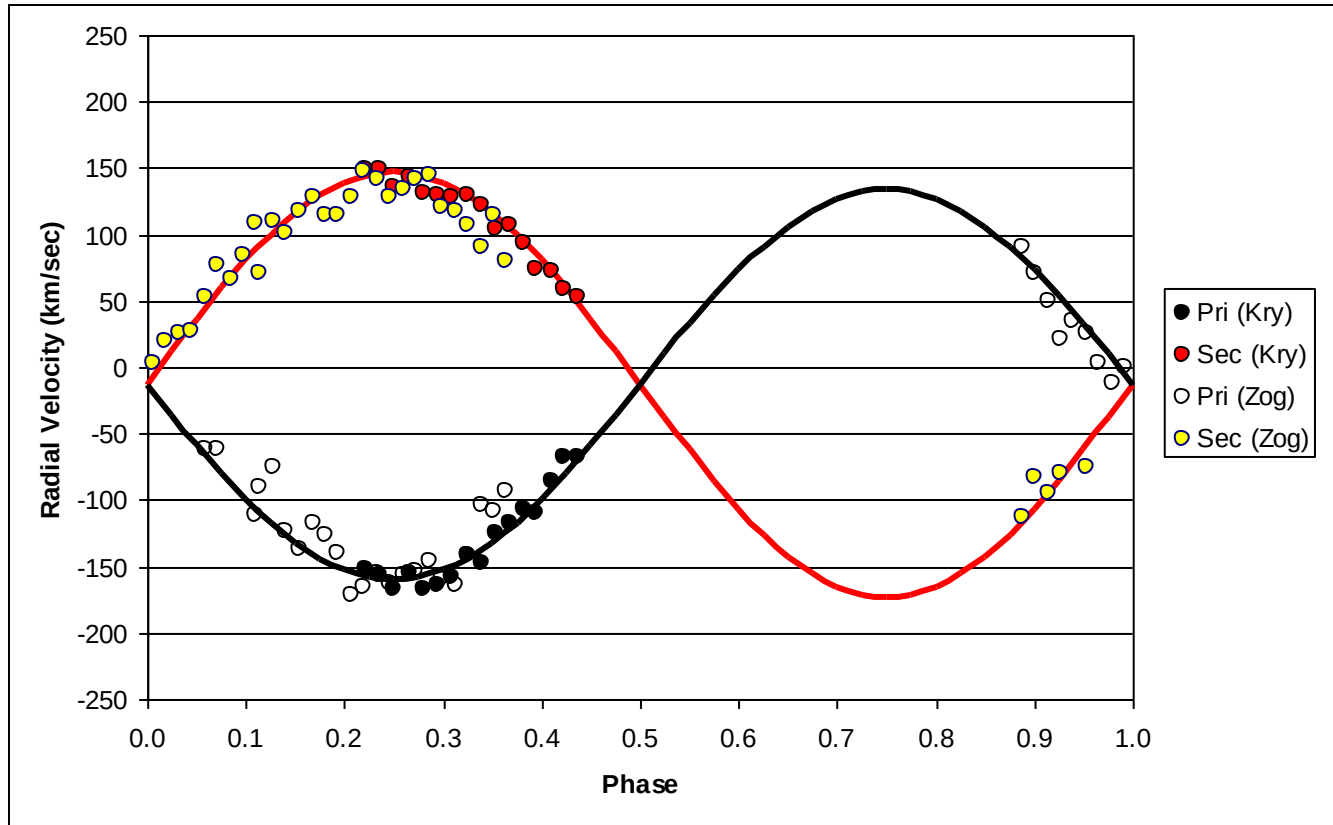


Φασματοσκοπία - Spectroscopy

Μέτρηση ταχυτήτων, προσδιορισμός τροχιών κ.α.

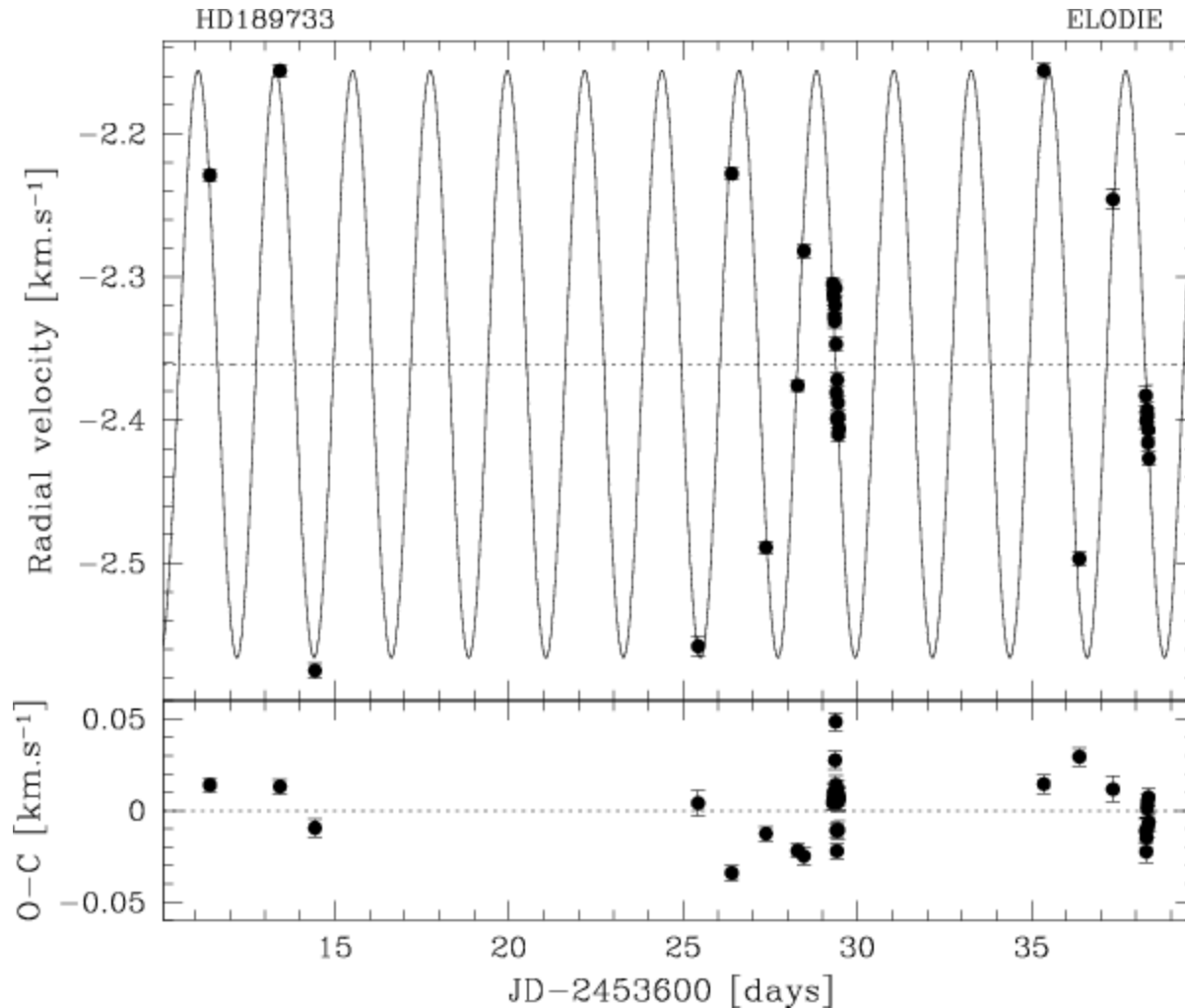


Radial Velocity V1130 Tau (F3 V, $V_{\text{mag}}=6.7$)

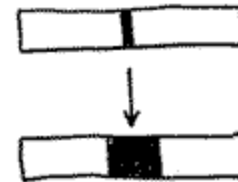
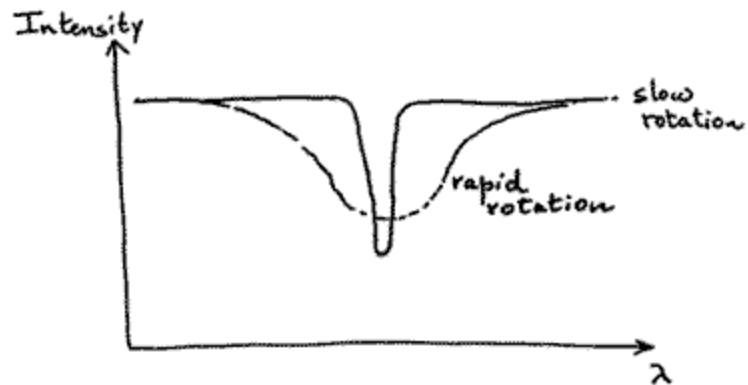


Περιφορά πλανητών γύρω από αστέρια

φασματοσκοπία
(μέτρηση μάζας)



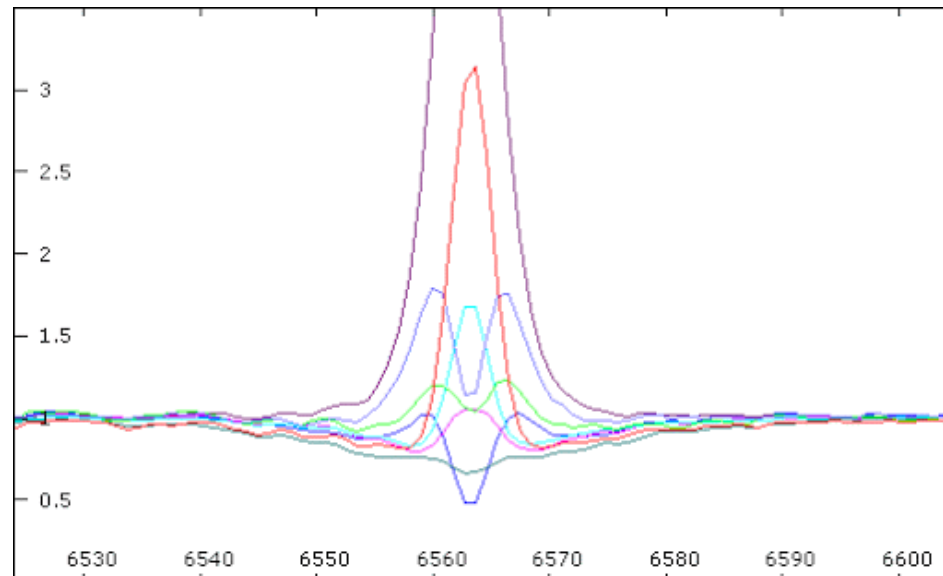
Προφίλ φασματικής γραμμής



Resolution

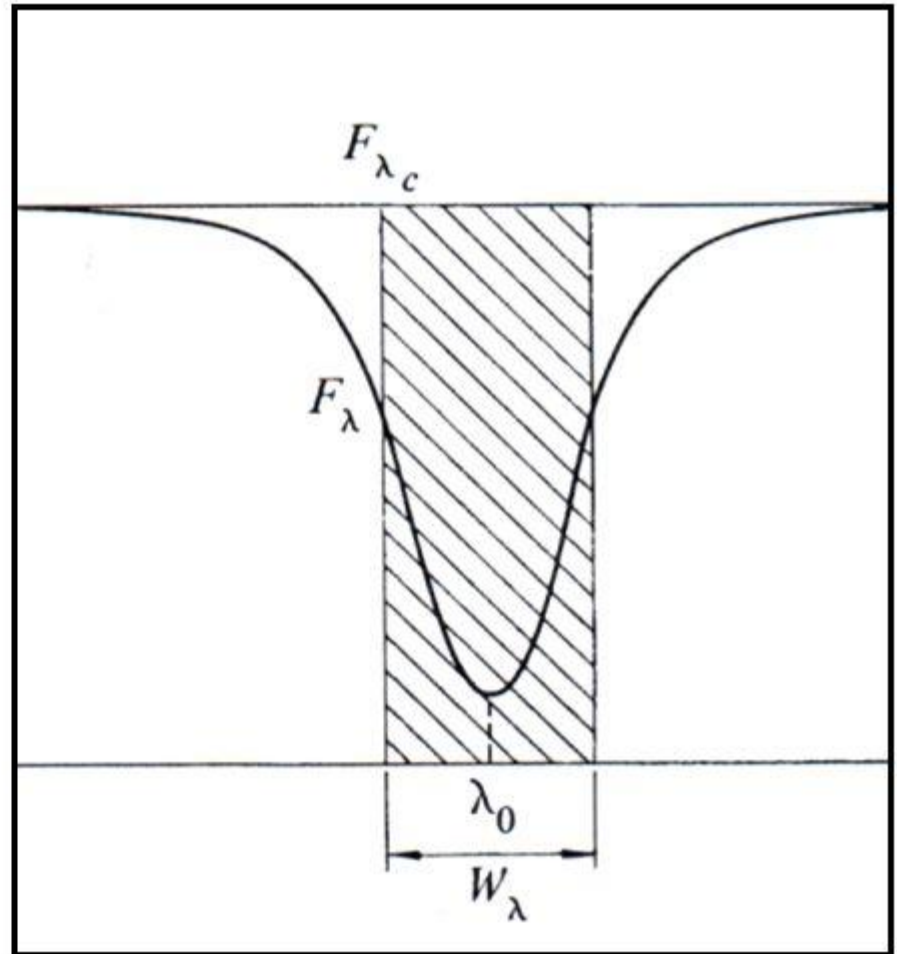
$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

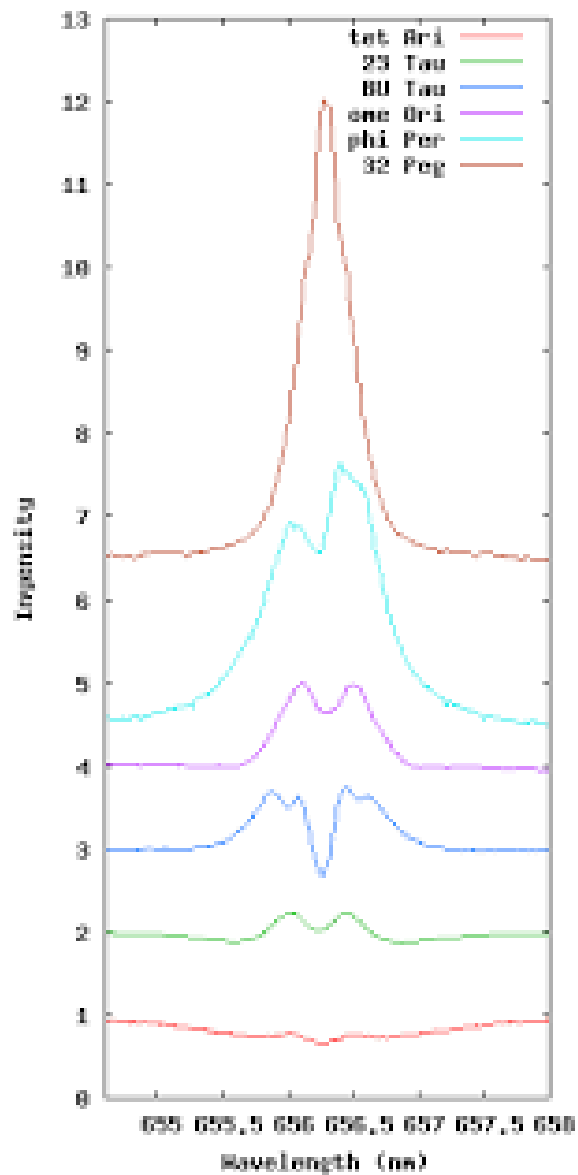
Line Profile



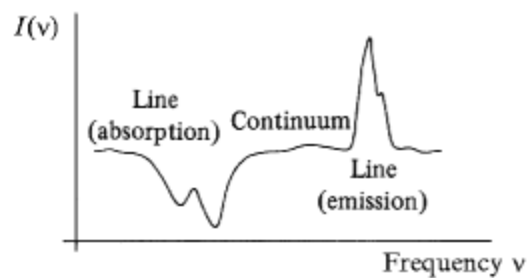
Ισοδύναμο εύρος φασματικής γραμμής

- The equivalent width is a measure of the strength of a spectral line
- Area equal to a rectangle with 100% depth
- Triangle approximation: half the base times the width
- Integral of a fitted line profile (Gaussian, Voigt fn.)
- Measured in Angstroms or milli-Angstroms
- How is equivalent width defined for emission lines?

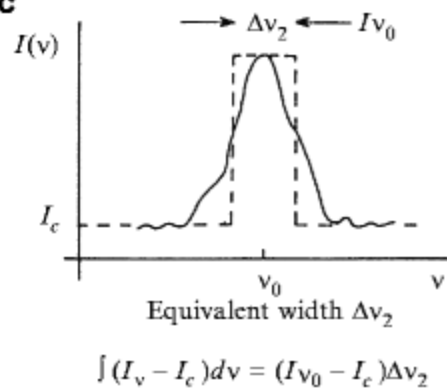




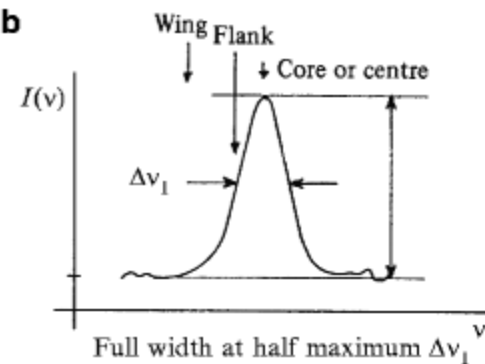
a



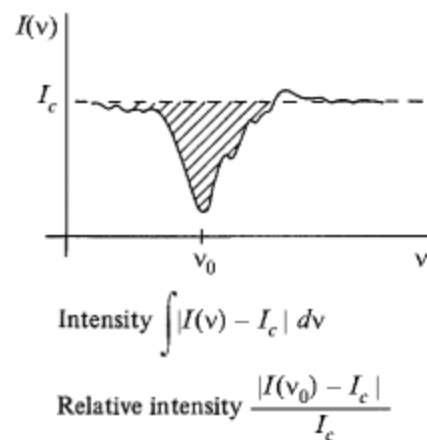
c

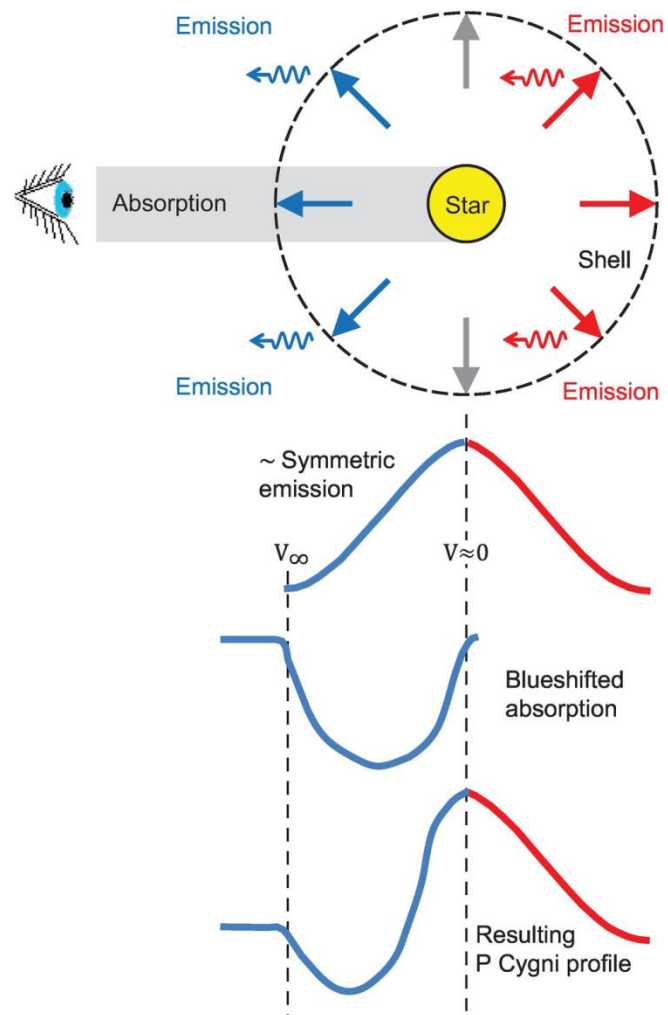
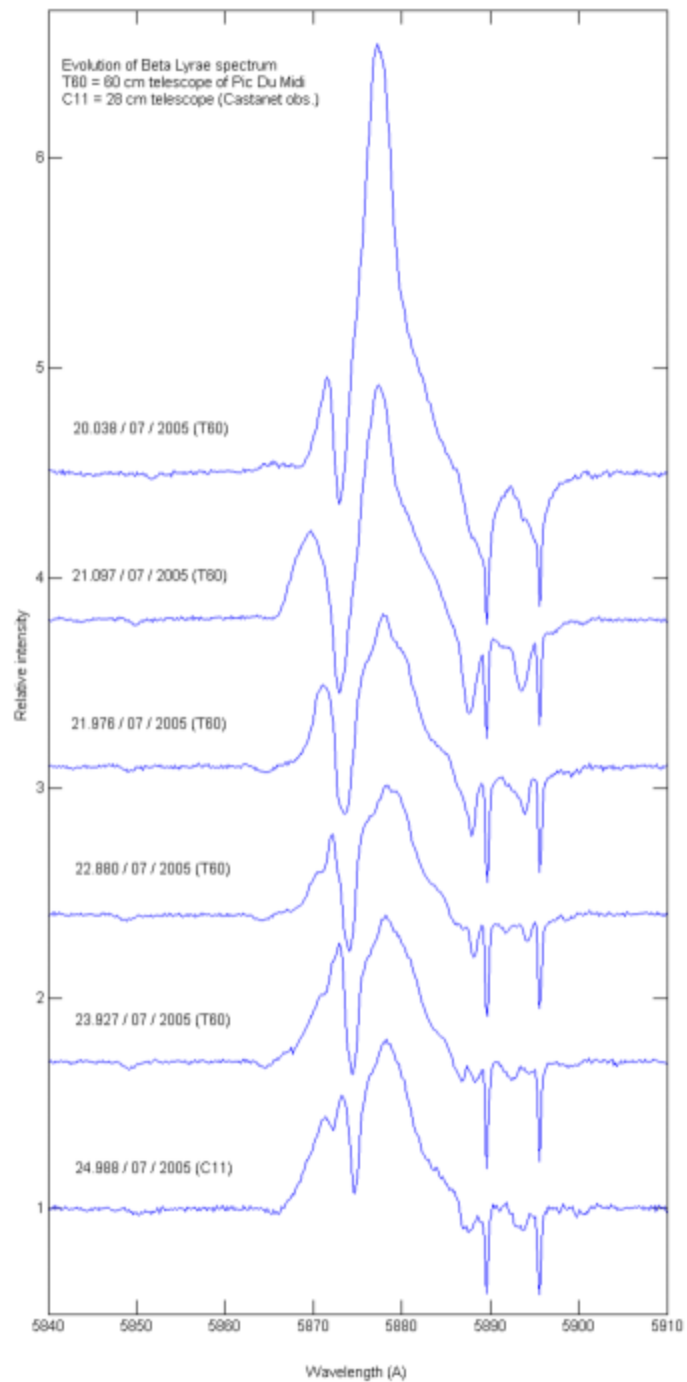


b



d

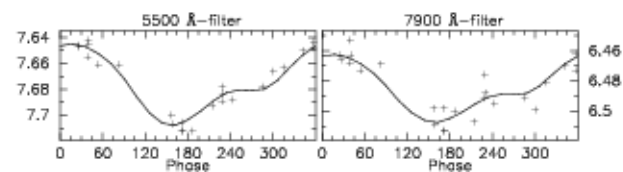
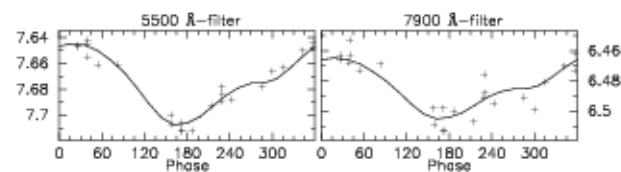
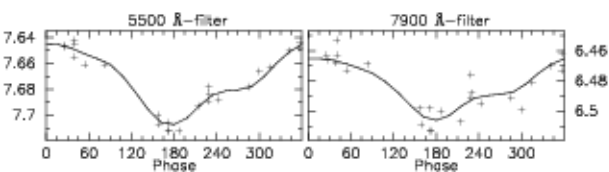
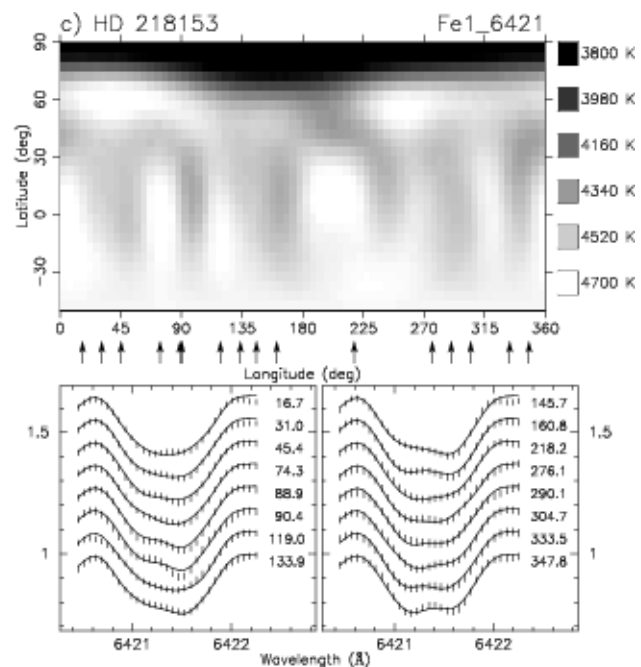
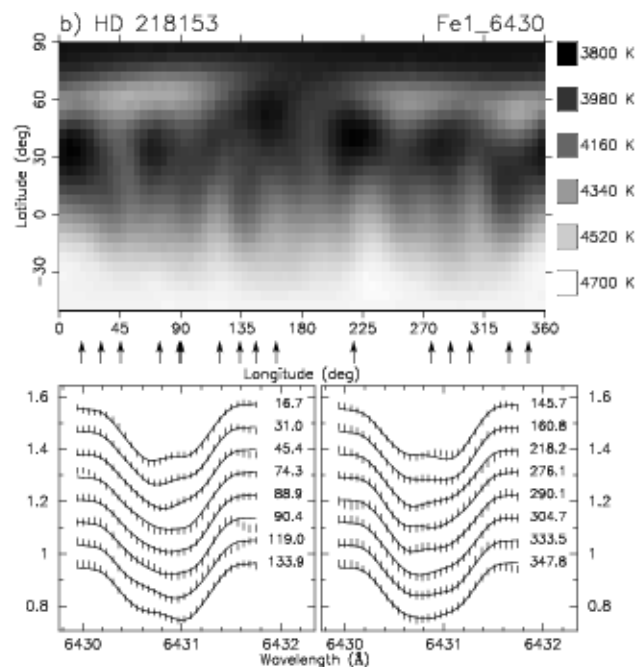
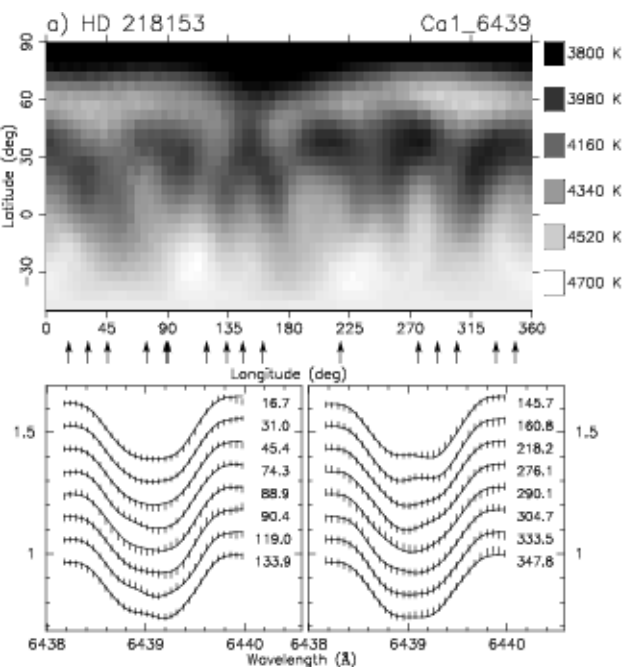
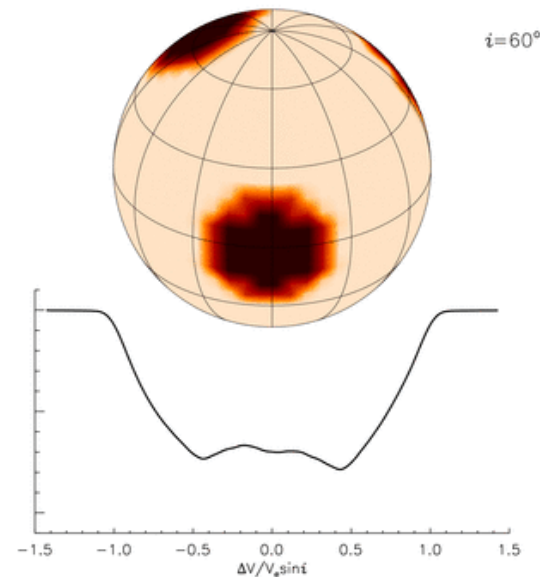




Αστρικές κηλίδες

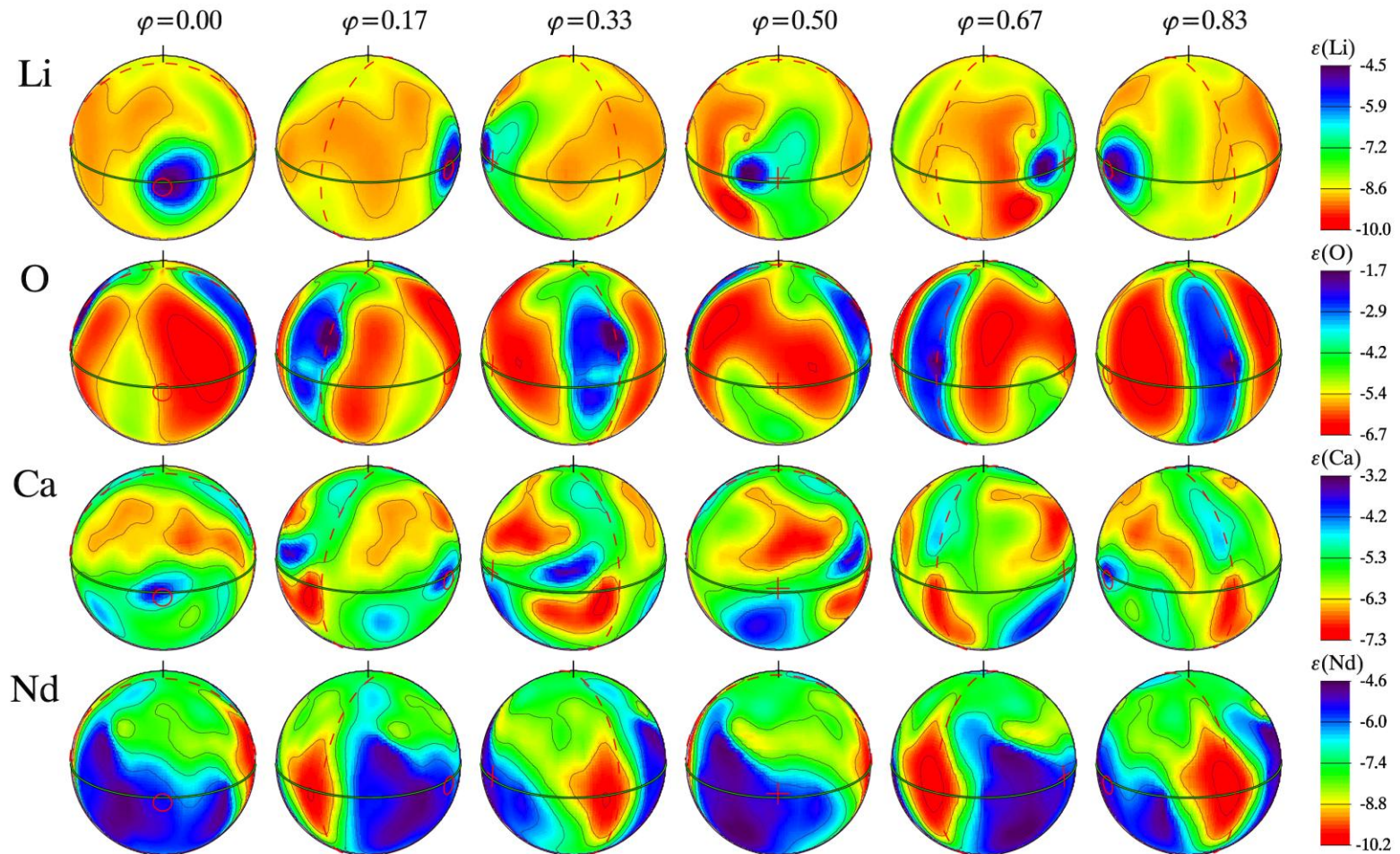
φασματοσκοπία

(μελέτη μαγνητικού πεδίου)



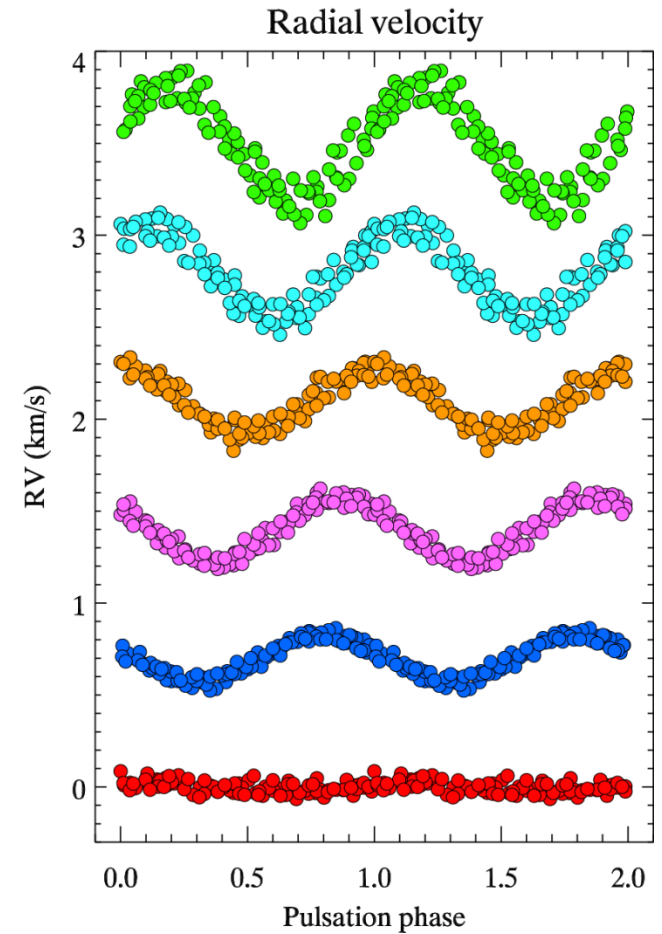
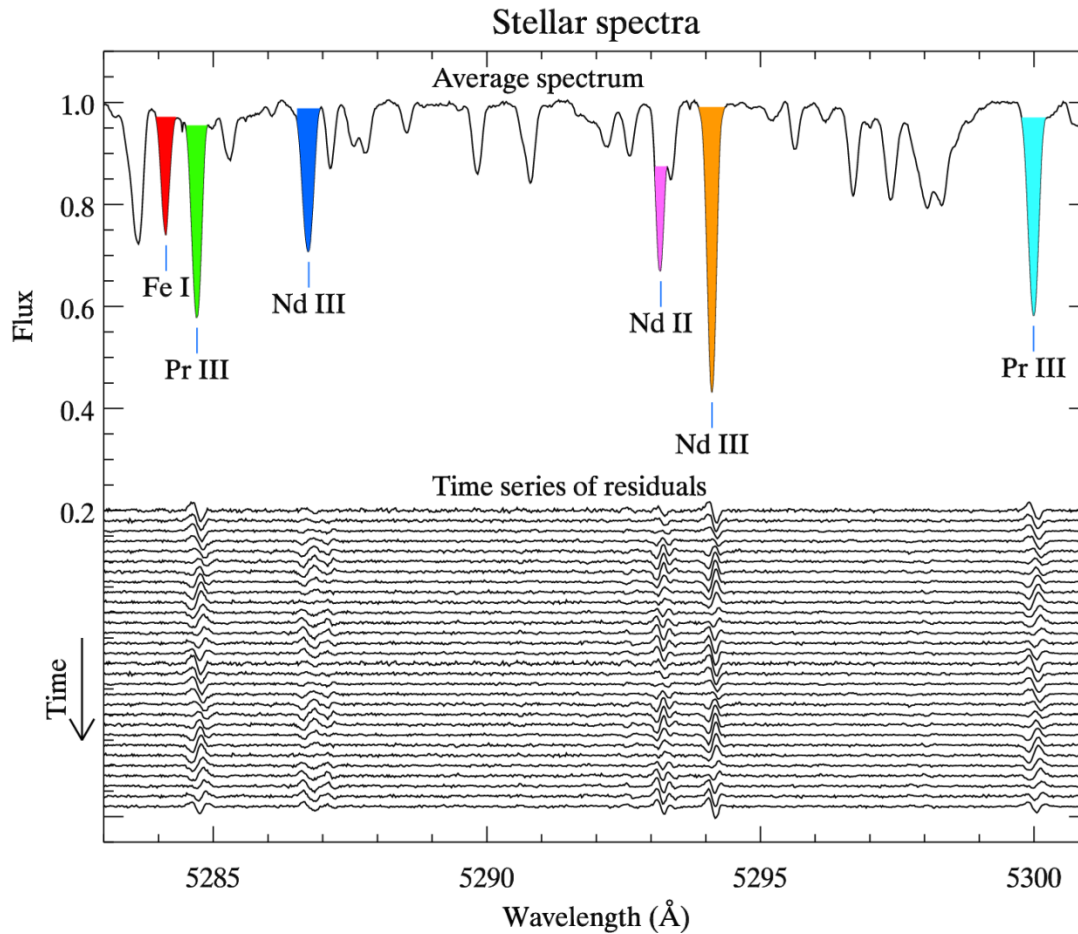
Αστρικές κηλίδες

φασματοσκοπία
(μελέτη μαγνητικού πεδίου)



Αστρικές κηλίδες

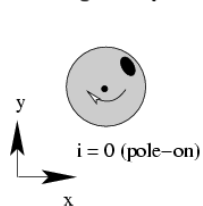
φασματοσκοπία (μελέτη μαγνητικού πεδίου)



Αστρικές κηλίδες

φασματοσκοπία (μελέτη μαγνητικού πεδίου)

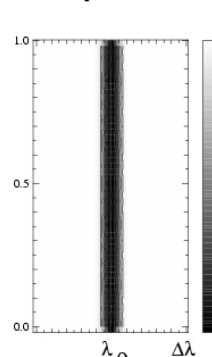
Star geometry



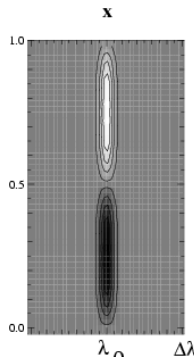
ϕ



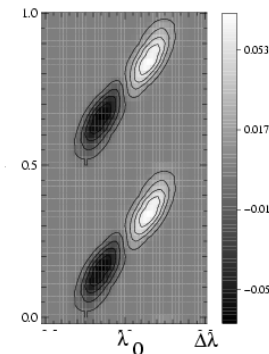
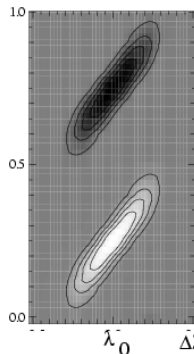
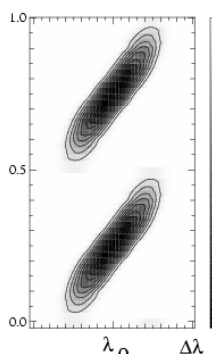
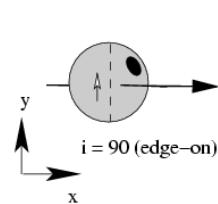
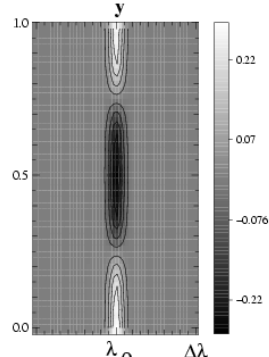
Spectrum



x



Photocenters

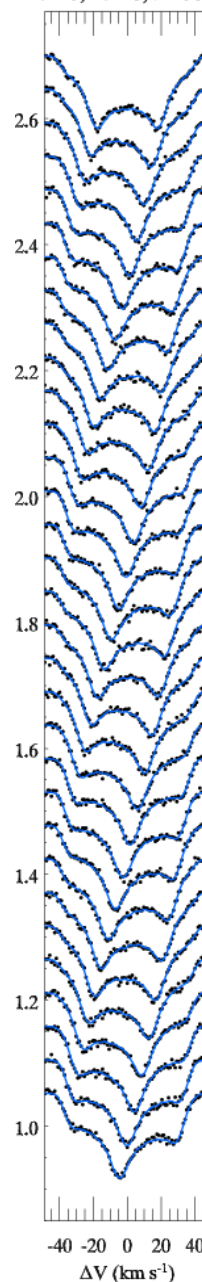


(a)

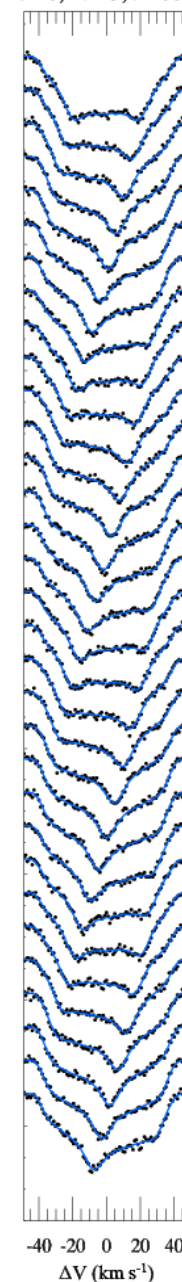
(b)

(c)

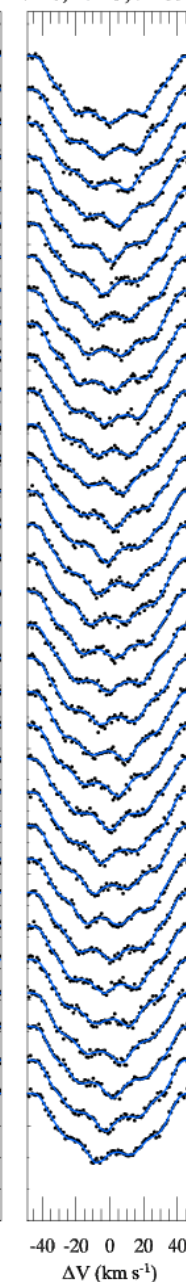
$l=6, m=6, i=60^\circ$



$l=6, m=5, i=60^\circ$

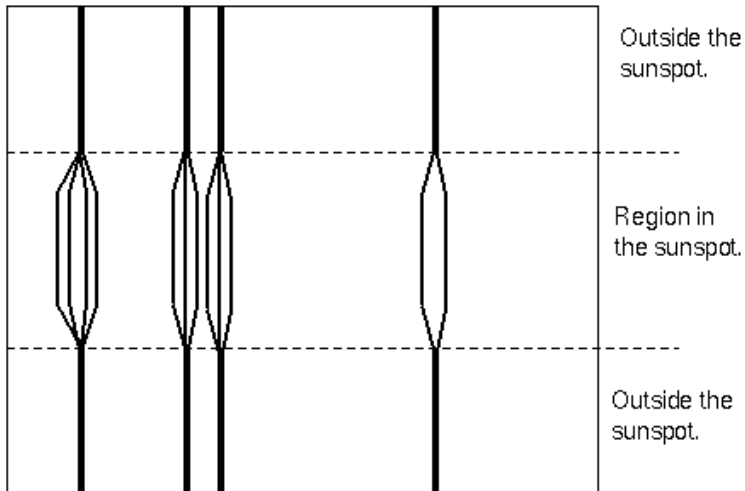


$l=6, m=5, i=85^\circ$

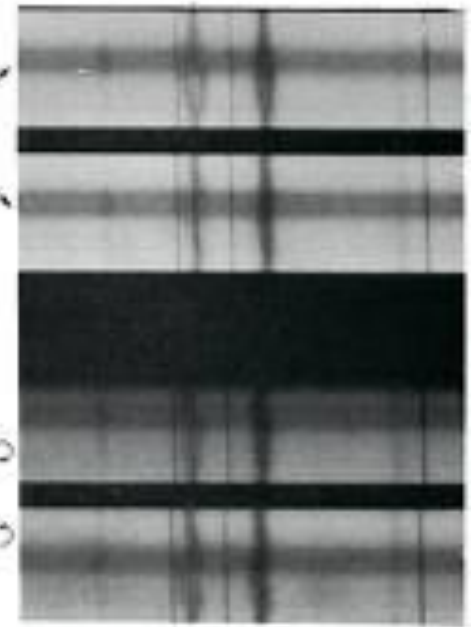
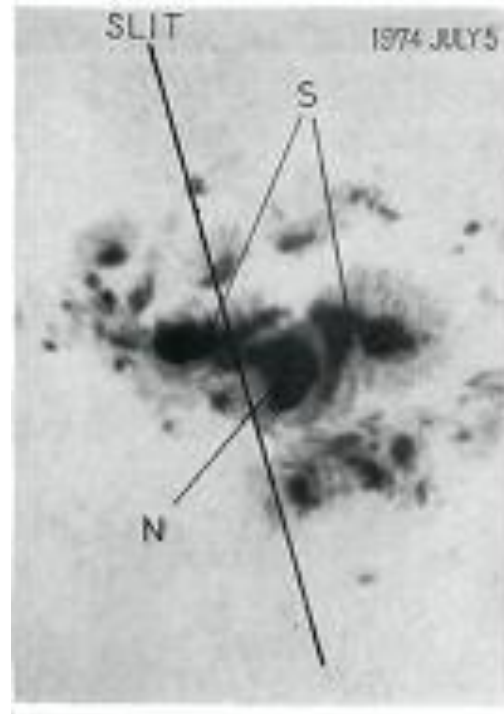


Ηλιακές κηλίδες

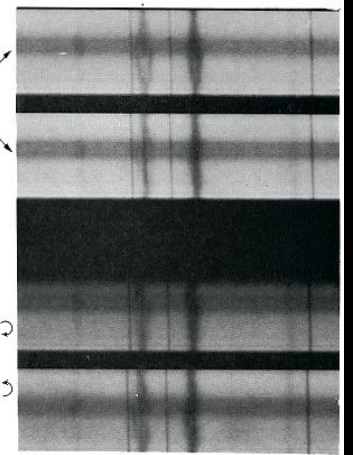
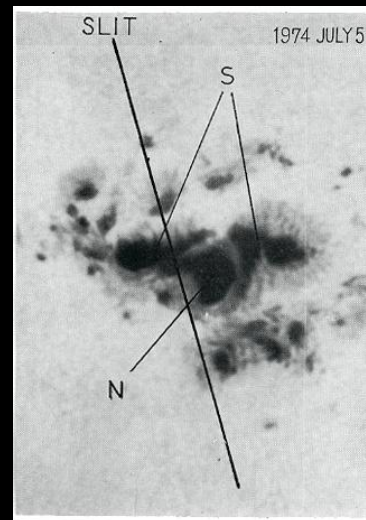
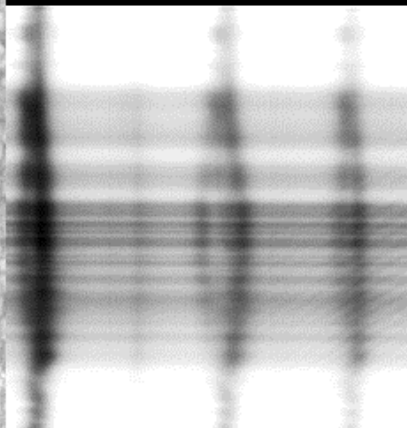
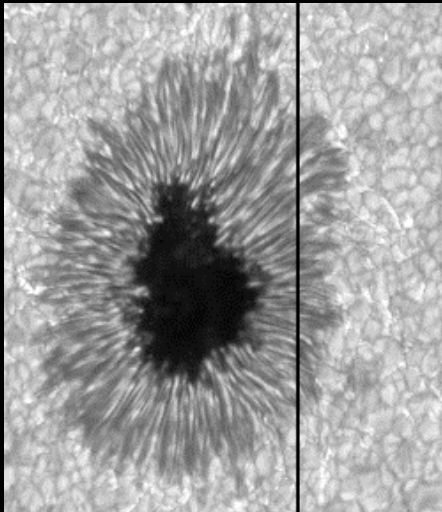
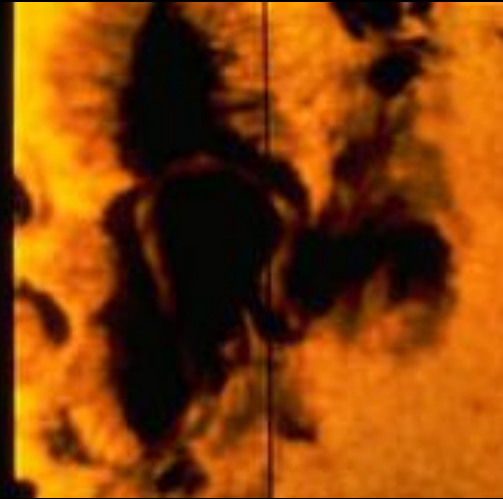
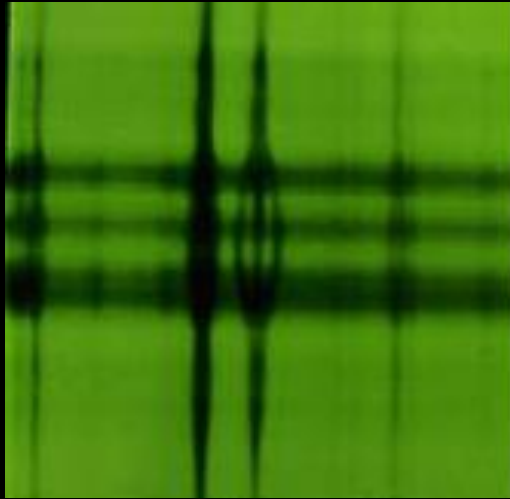
(φαινόμενο Zeeman για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου)



The Zeeman effect: a strong magnetic field splits the spectral lines into two or more components. The strength of the magnetic field can be measured from the amount of separation of the components. Sunspots are regions of strong magnetic fields.

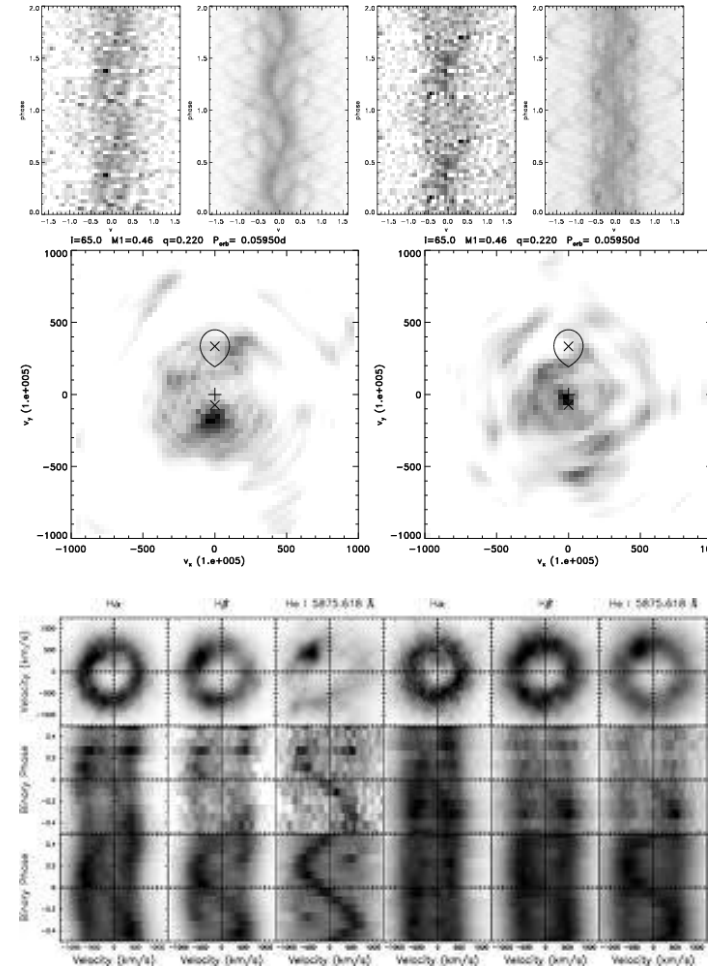
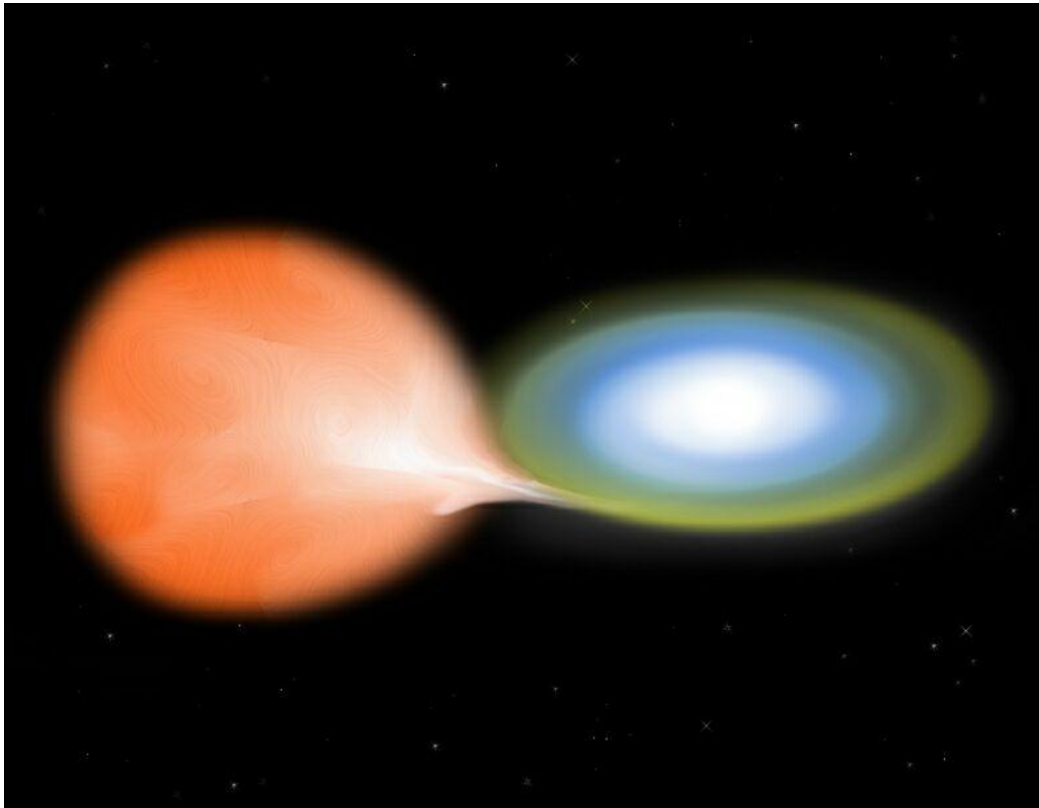


Το φαινόμενο Zeeman

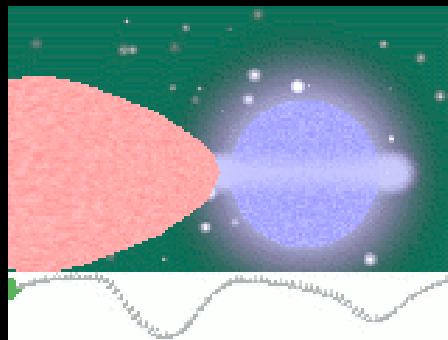
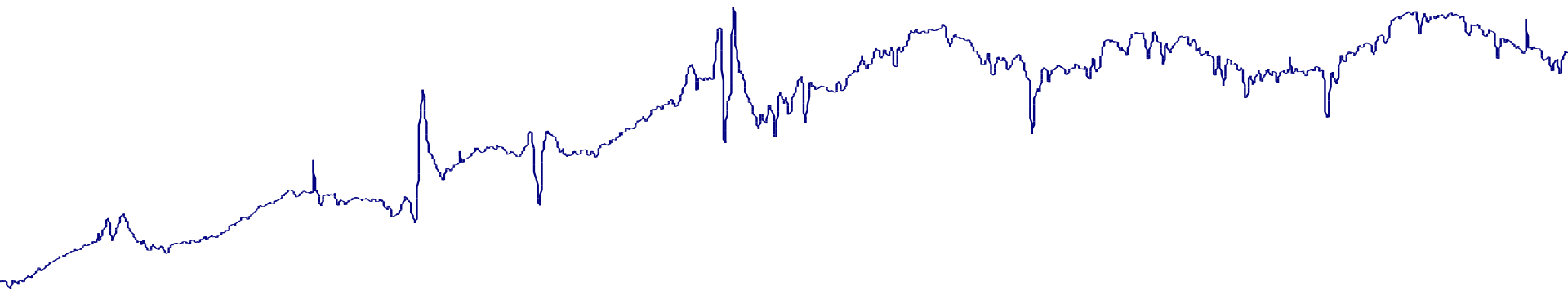


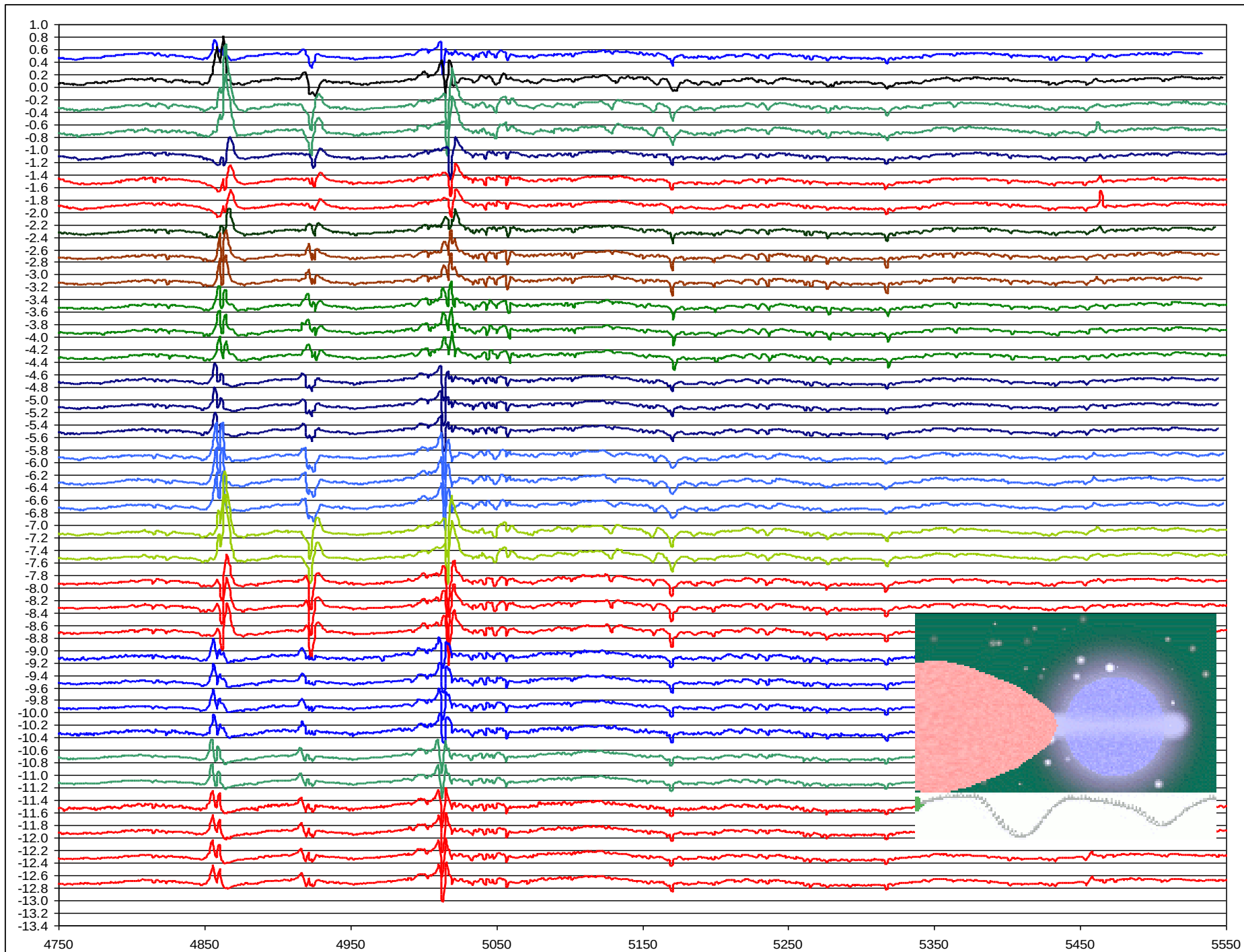
Τομογραφία

(απεικόνιση δίσκων προσάυξης και αστρικών επιφανειών)

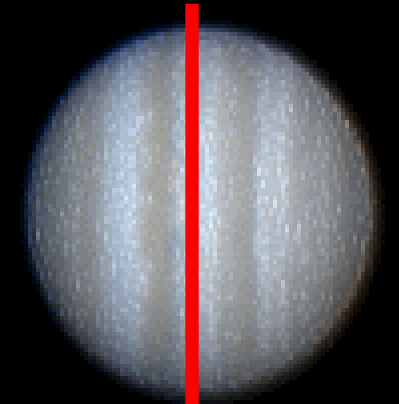
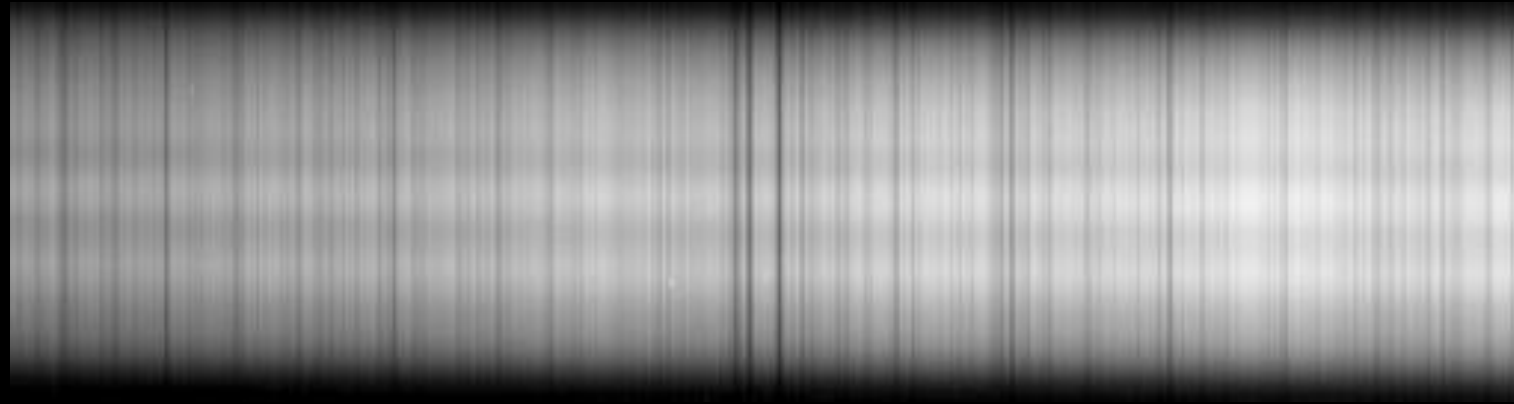
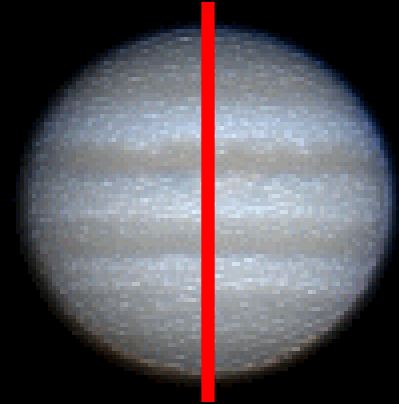


β Lyr (B7V+A8V) (3.9 mag)





Περιστροφή πλανητών

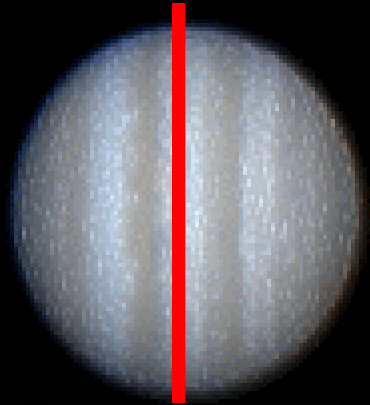


$V_{\text{rot}} = 12.5(\pm 3.0) \text{ km/s}$
 $V_{\text{rot}} = 12.6 \text{ km/s}$

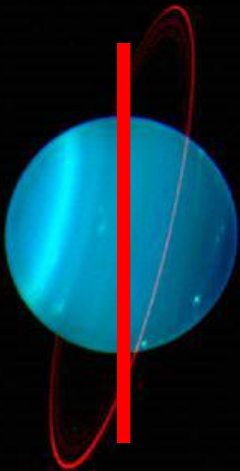
Περιστροφή πλανητών



$V_{\text{rot}}=9.5(\pm 3.0)$ km/s
 $V_{\text{rot}}=9.9$ km/s

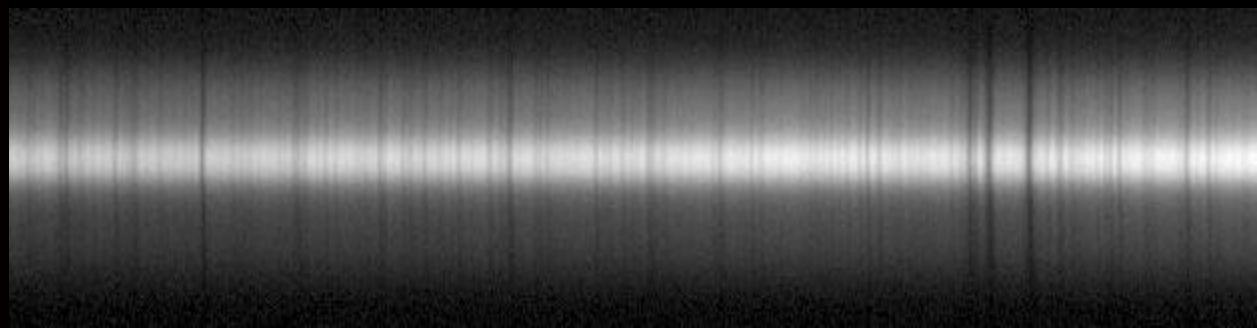
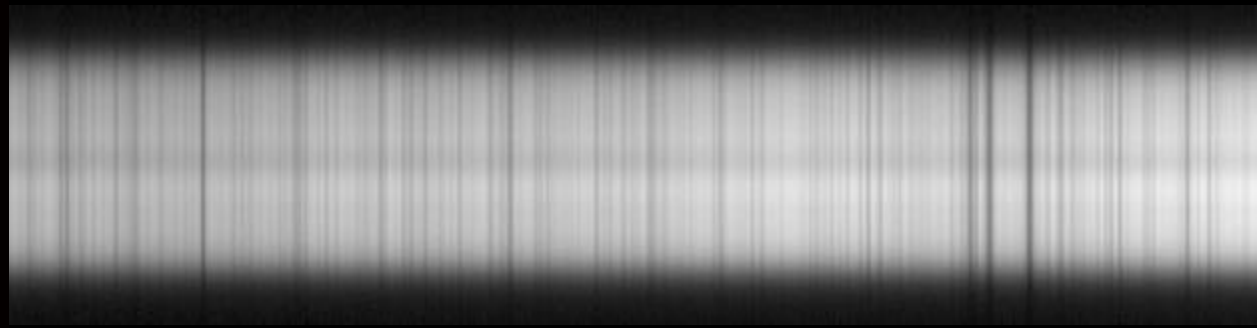
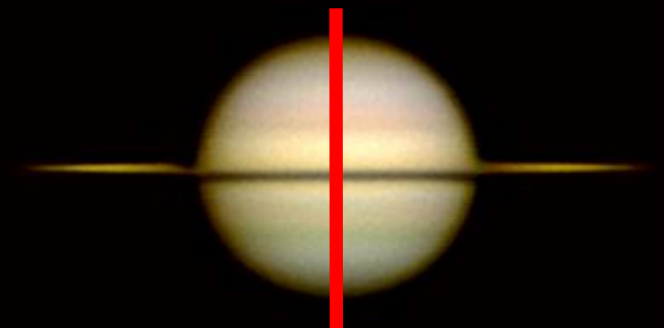


$V_{\text{rot}}=12.5(\pm 3.0)$ km/s
 $V_{\text{rot}}=12.6$ km/s

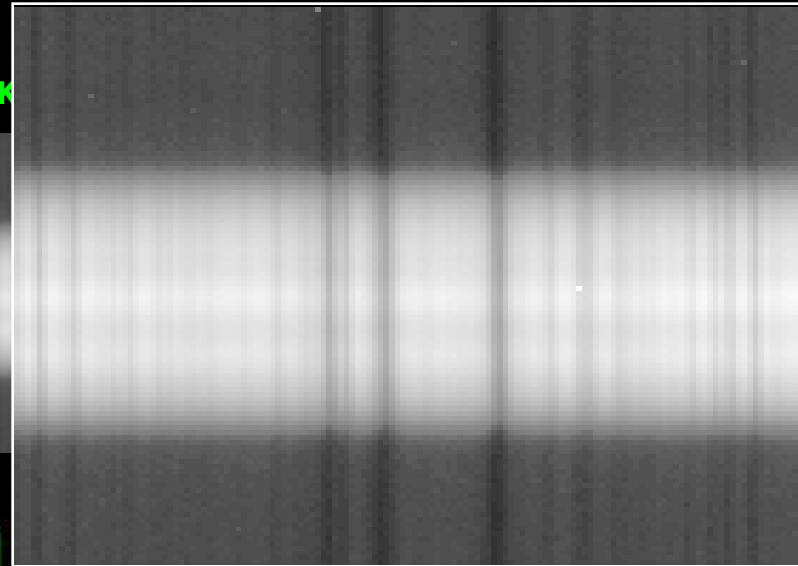
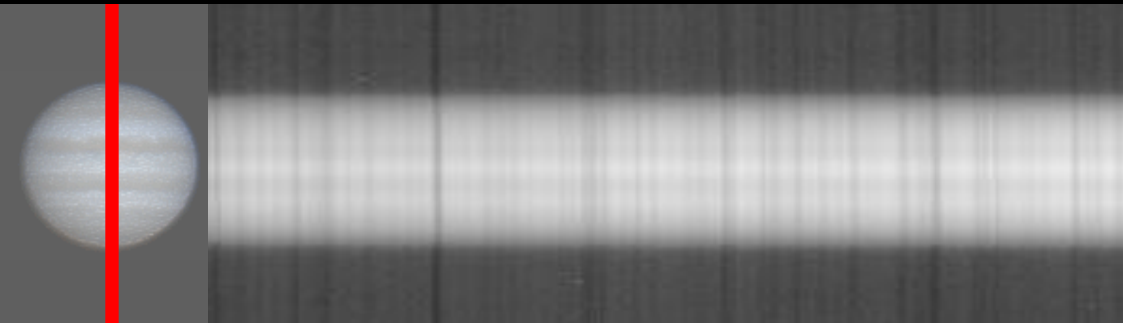


$V_{\text{rot}}=9.1(\pm 3.0)$ km/s
 $V_{\text{rot}}=9.3$ km/s

Περιστροφή Κρόνου



Περιφορά Δία (21 Οκτ)

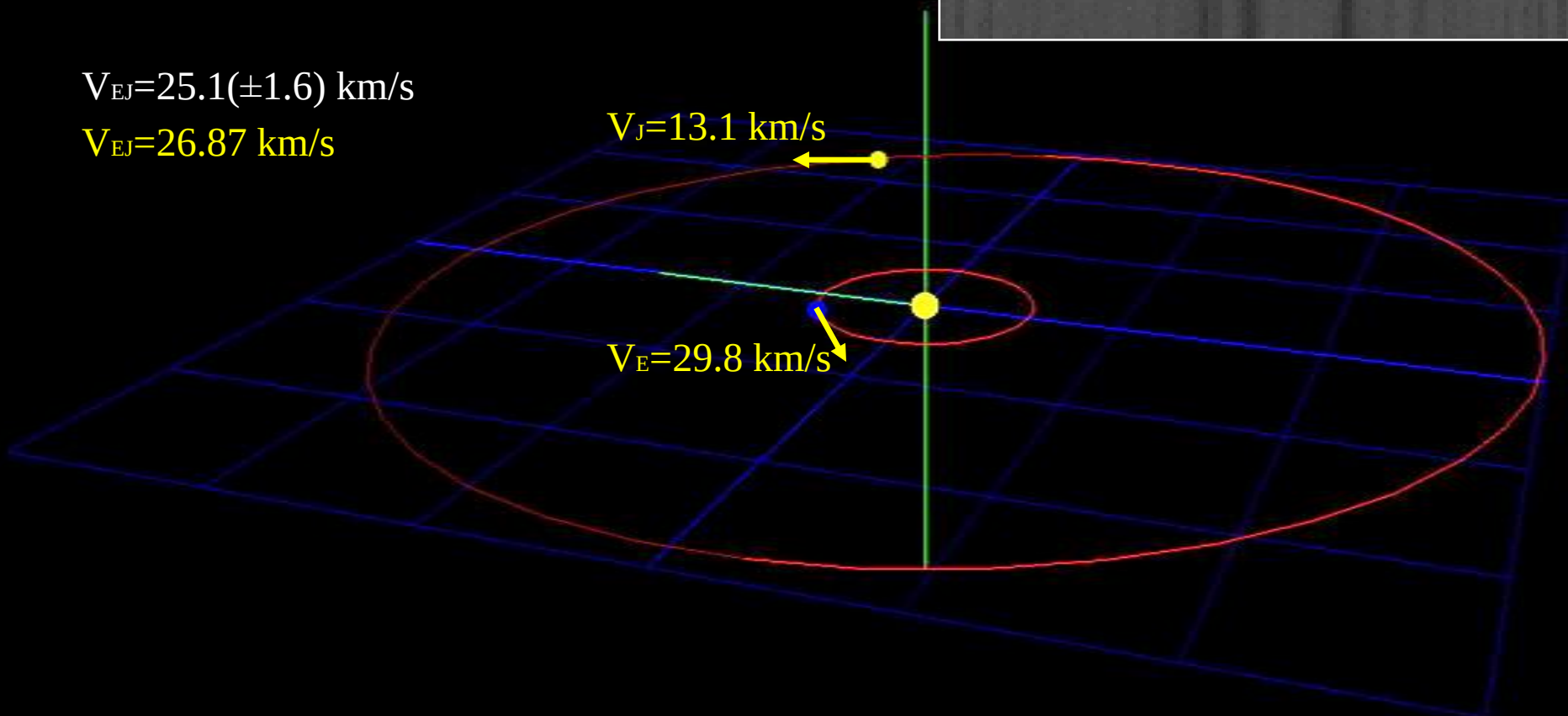


$V_{EJ}=25.1(\pm 1.6)$ km/s

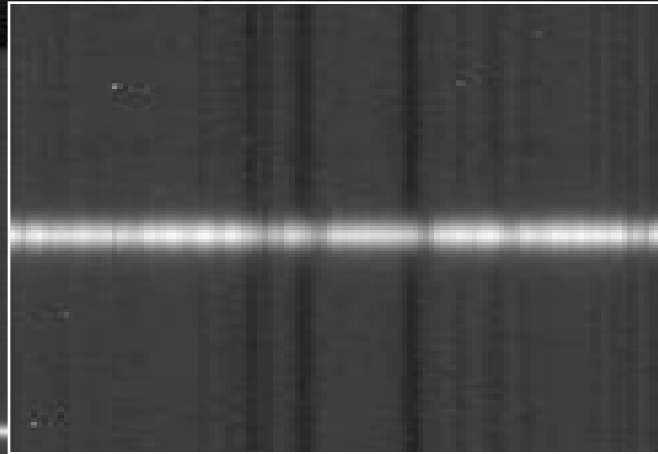
$V_{EJ}=26.87$ km/s

$V_J=13.1$ km/s

$V_E=29.8$ km/s



Ακτινική ταχύτητα αστέρων

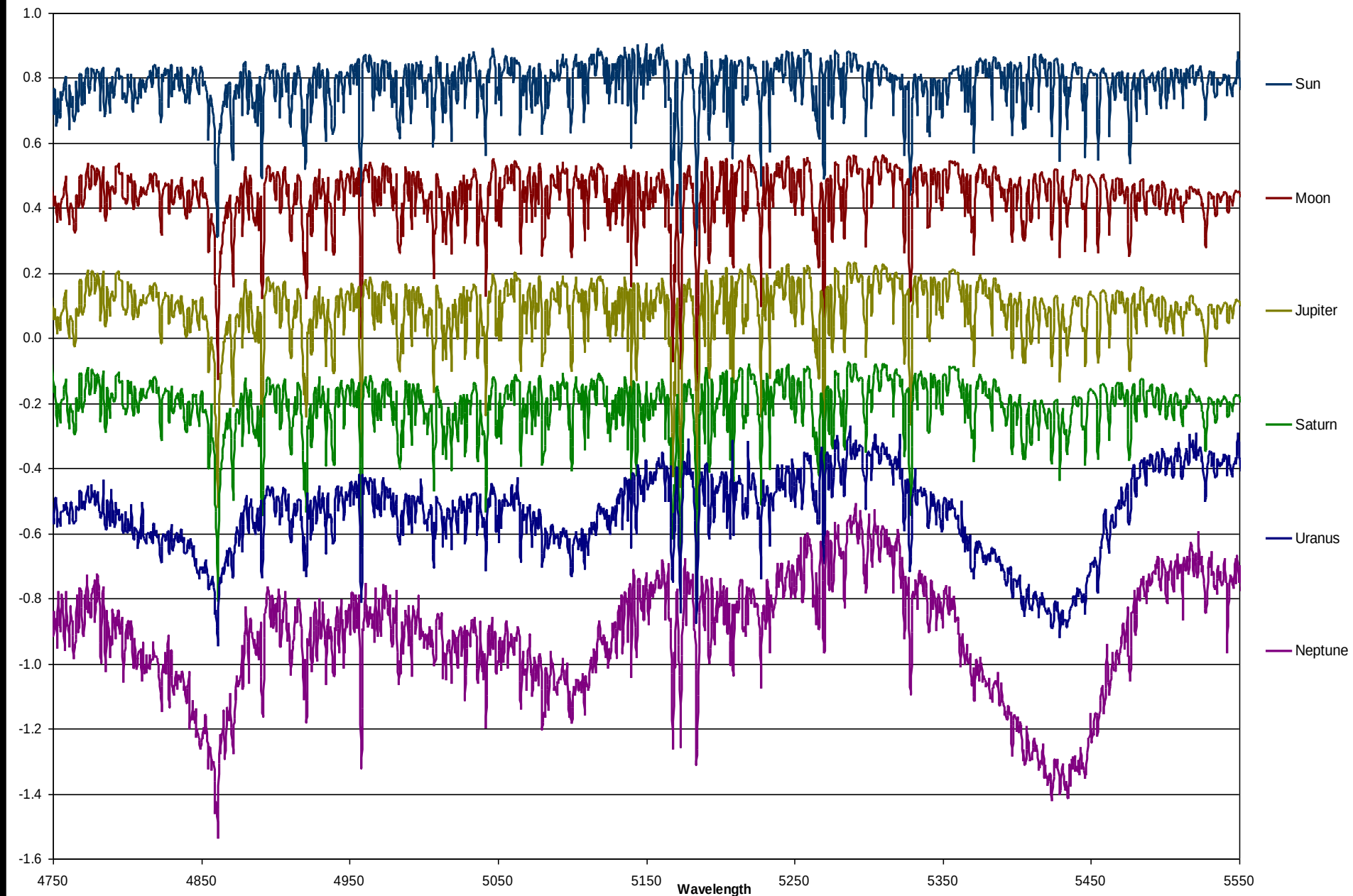


Λαμπαδίας (α *Tau*)

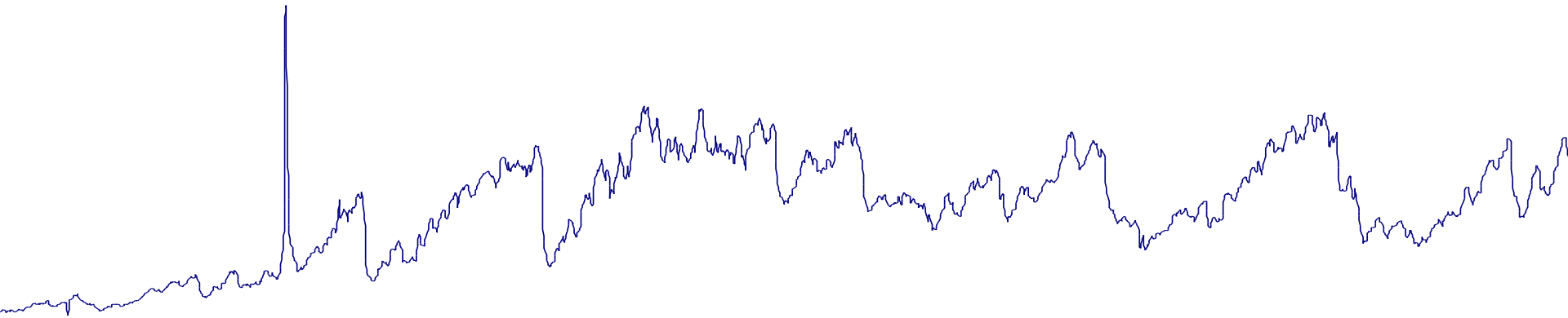
$\gamma = +52.5 (\pm 1.5) \text{ km/s}$

$\gamma = +53.8 \text{ km/s}$

Φάσματα Πλανητών Ηλιακού Συστήματος



χ Cyg (S6e - M0)



Ιδιόζουσες περιπτώσεις

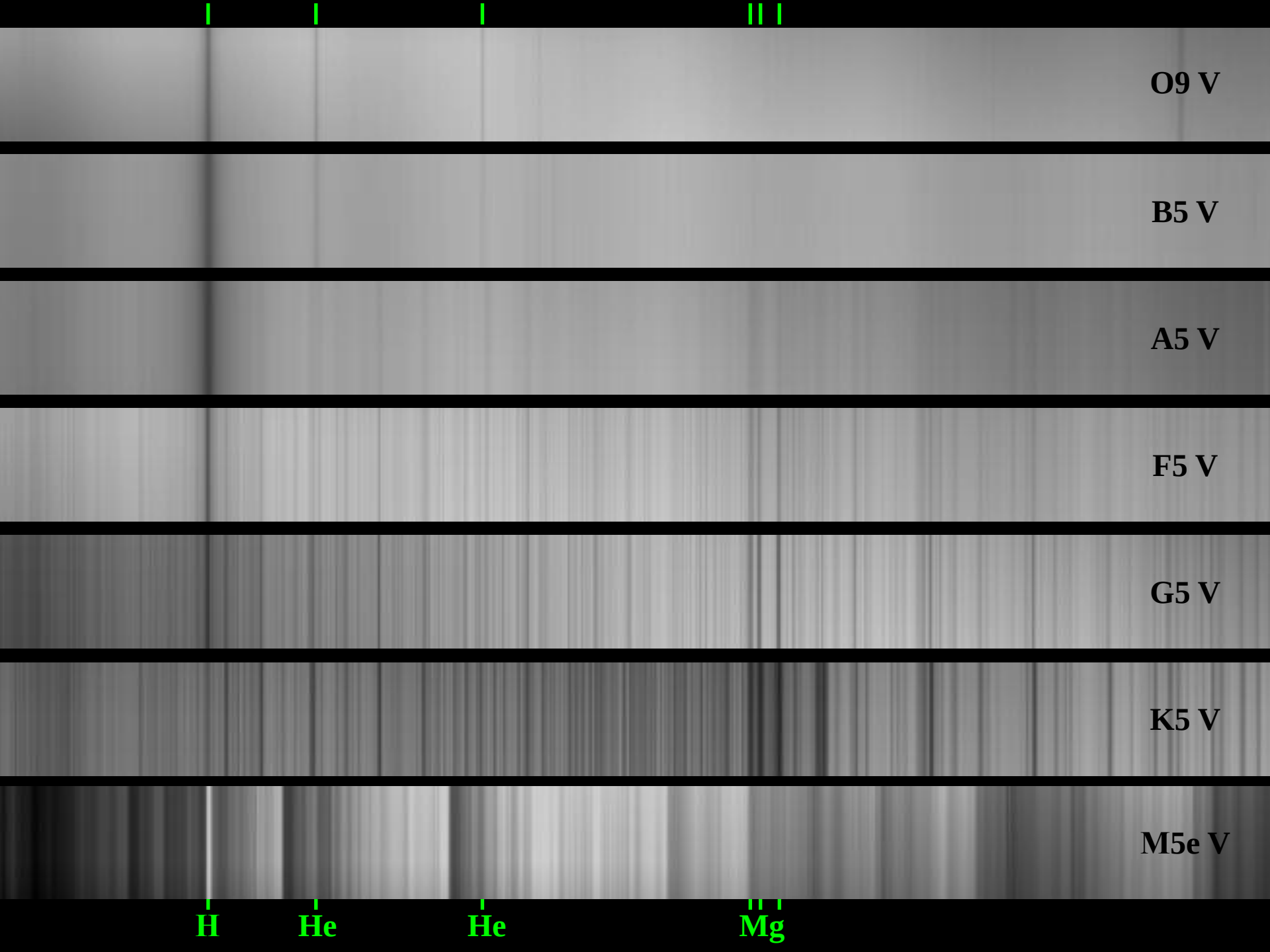
χ Aqr

χ Cyg

β Lyr

R And

W Cas



O9 V

B5 V

A5 V

F5 V

G5 V

K5 V

M5e V

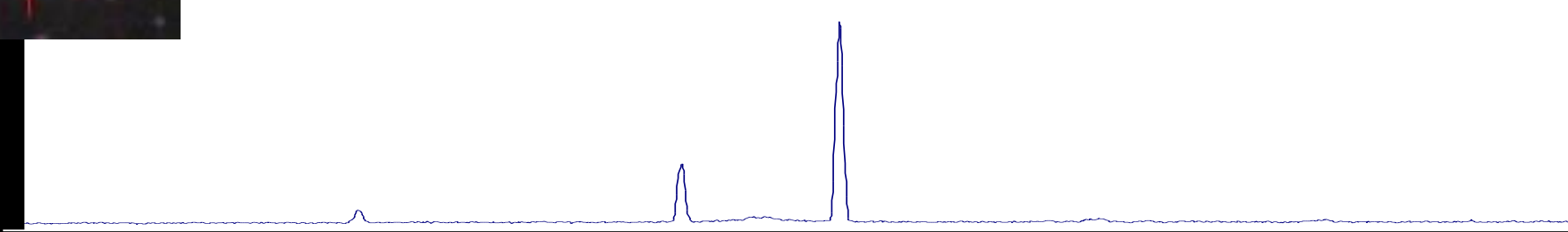
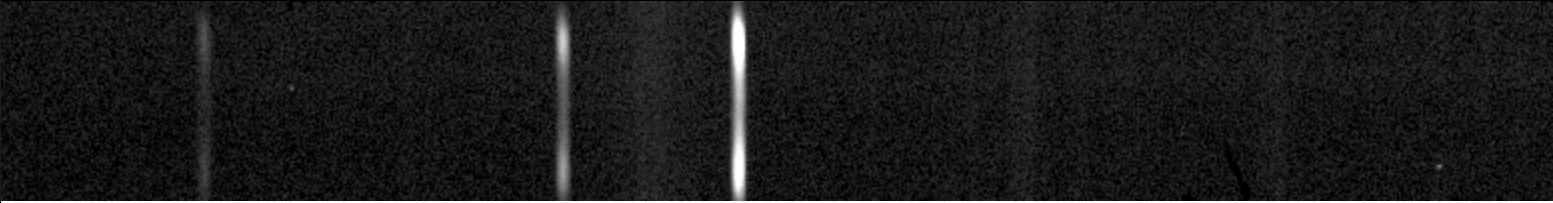
H

He

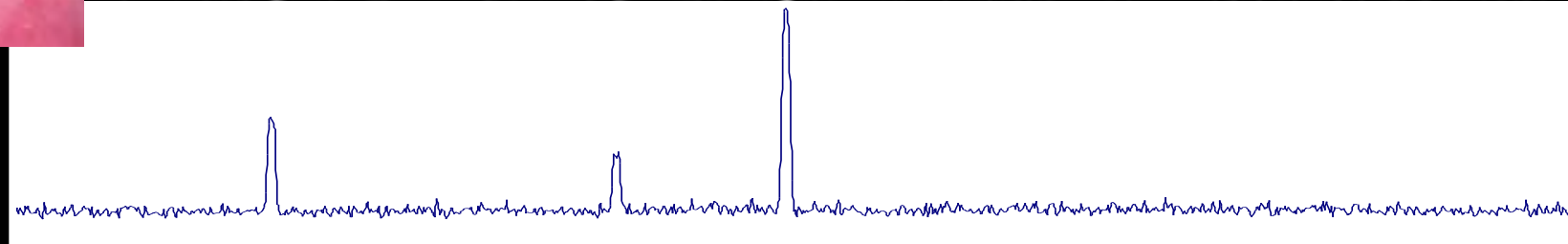
He

Mg

M57 (Ring nebula)



M42 (Orion nebula)

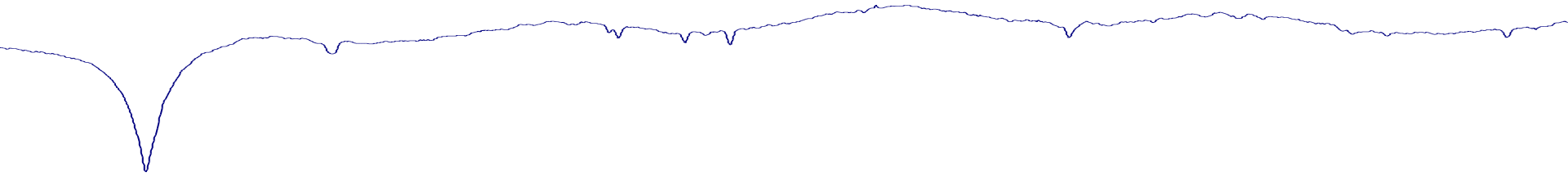


H β
(4861)

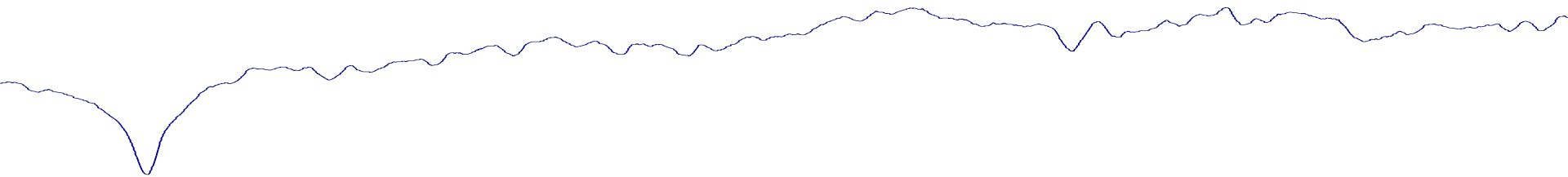
OIII
(4959)

OIII
(5007)

Algol (B8V) (2.9 mag)



Altair (A7V) (0.9 mag)



Εφαρμογές αστρονομικής φασματοσκοπίας

Stars

Stellar classification - temperature
Radial velocity
Chemical composition
Stellar winds
Doppler tomography (disk mapping)

- Μέτρηση χημικής σύστασης, θερμοκρασίας και ταχύτητας
- Φασματική ταξινόμηση αστέρων
- Μέτρηση αστρικών ανέμων
- Μέτρηση ακτινικών ταχυτήτων (περιστροφή μελών διπλού συστήματος, περιστροφή και περιφορά πλανητών, ακτινικές ταχύτητες γαλαξιών)
- Φάσματα εκτάκτων αστρονομικών φαινομένων (novae, supernovae, κομήτες, κατακλυσικοί αστέρες)
- Φάσματα νεφελωμάτων (χημική σύσταση και ταξινόμηση)
- Ταξινόμηση/Διαχωρισμός διπλών εκλειπτικών και παλλόμενων αστέρων

Exoplanets

Mass (stars, exoplanets)

Solar System

Asteroids/comets (chemical composition)
Planets (CH₄, H₂O)

Galaxies

Doppler shift
Hubble Law

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κοσμάς Γαζέας

ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

Μέρος Δ΄

- Multi slit/object spectroscopy
- Integral Field Spectrographs and Image slicers
- Spectral cubes

Multi-object Spectroscopy

- Λήψη φάσματος πολλών αντικειμένων με μία έκθεση.
- Αυτό μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους:
 - Τοποθετώντας ένα διάφραγμα στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου με πολλές σχισμές (ένα αντικείμενο σε κάθε σχισμή)
 - Χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες στο εστιακό επίπεδο, οι οποίες λαμβάνουν φως από διαφορετικές πηγές του ουρανού (οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν στη σειρά και να κατευθυνθούν μπροστά στη σχισμή του φασματογράφου)
- Οι τεχνικές αυτές έχουν αναπτυχθεί κατά τη δεκαετία του '80 και τελειοποιήθηκε κατά τη δεκαετία του '90.

509

21.366

1670

17.103

507

21.023

502

18.539

1613

17.296

1605

17.027

513

21.715

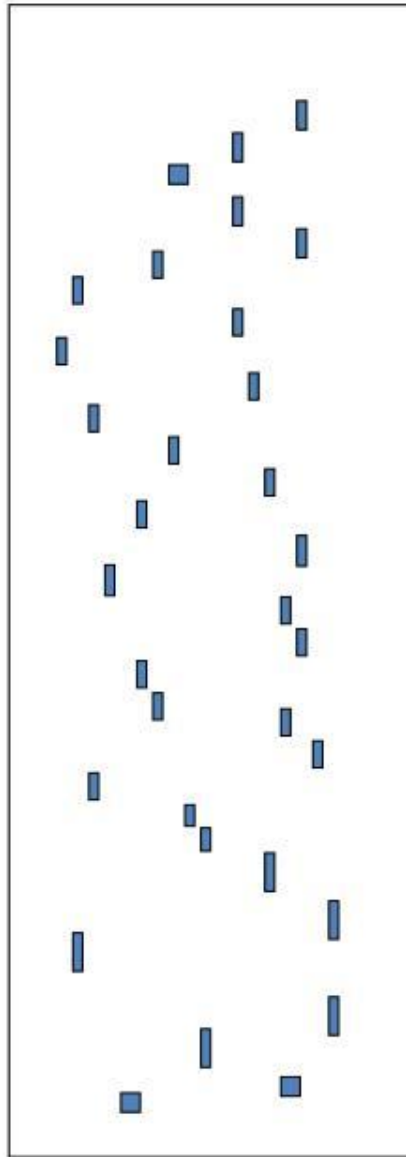
1539

17.259

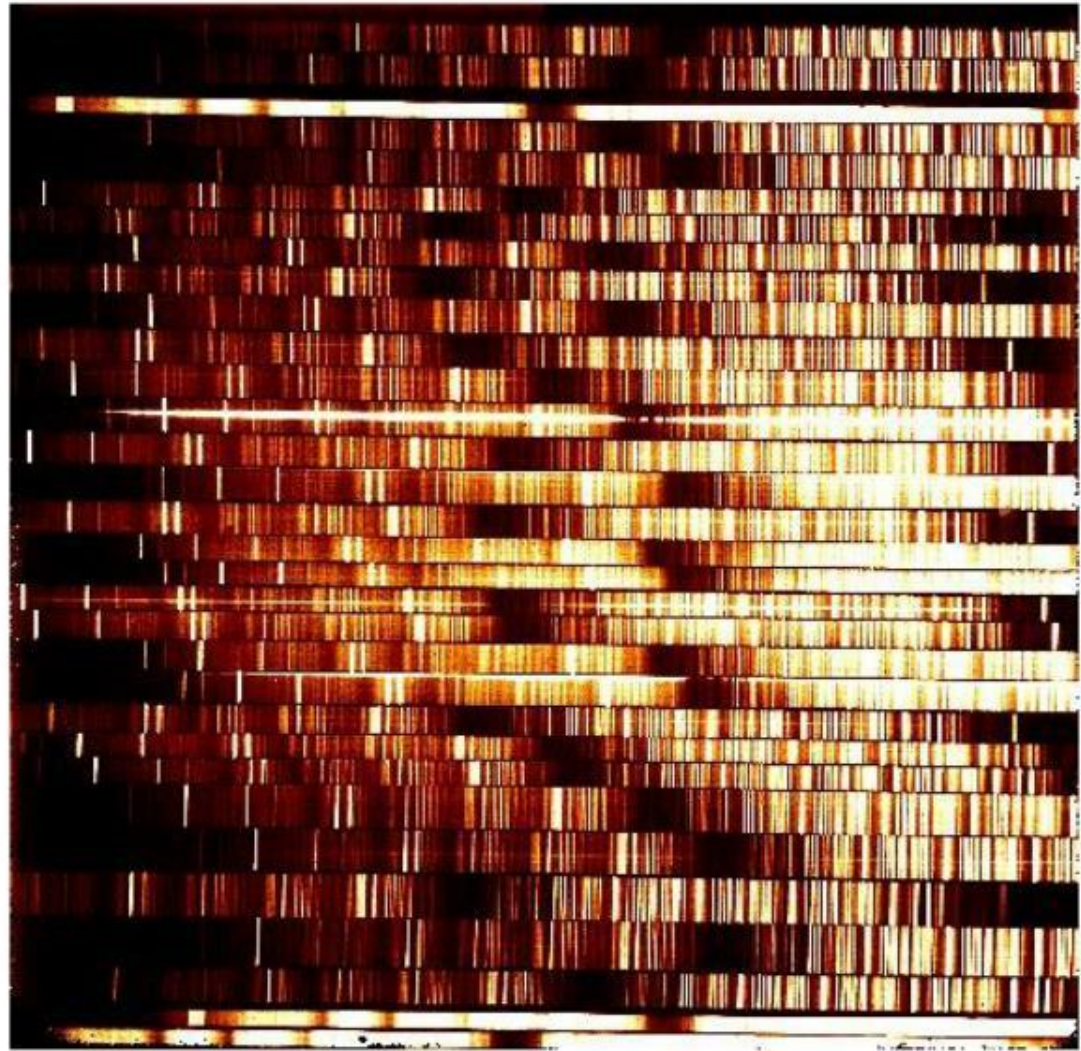
503

19.406

Multi-Slit Spectrograph



Slit Mask

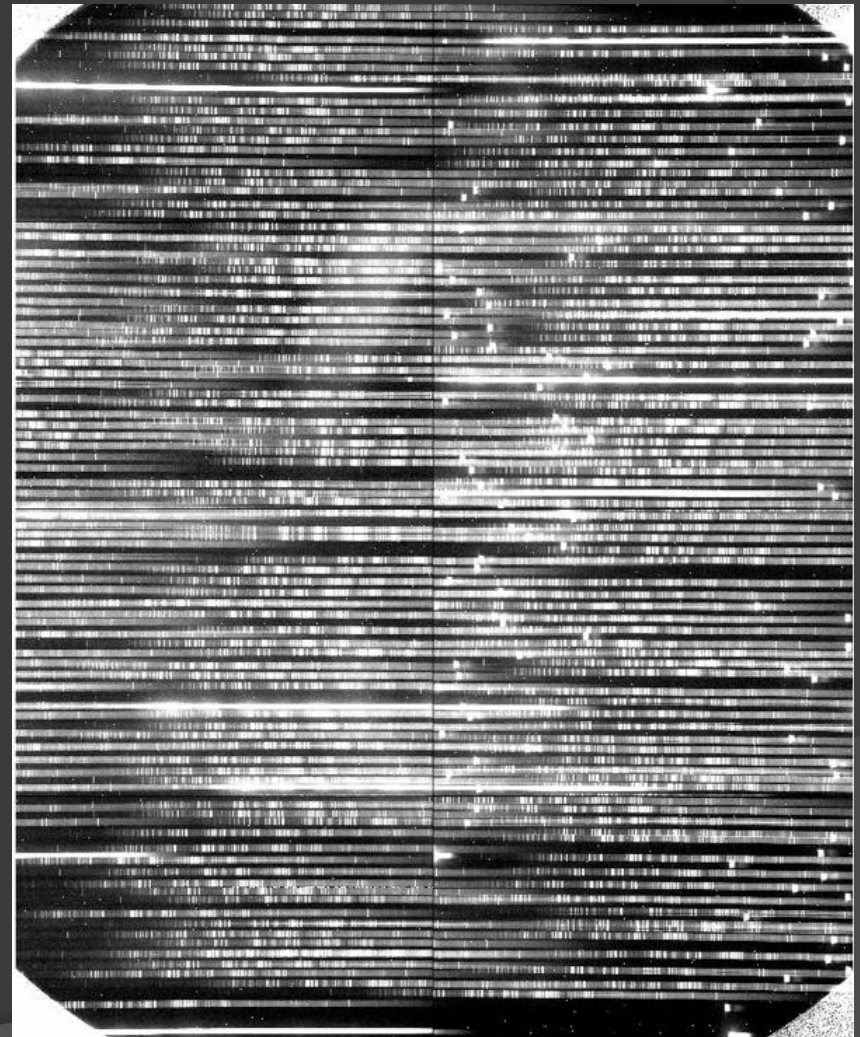


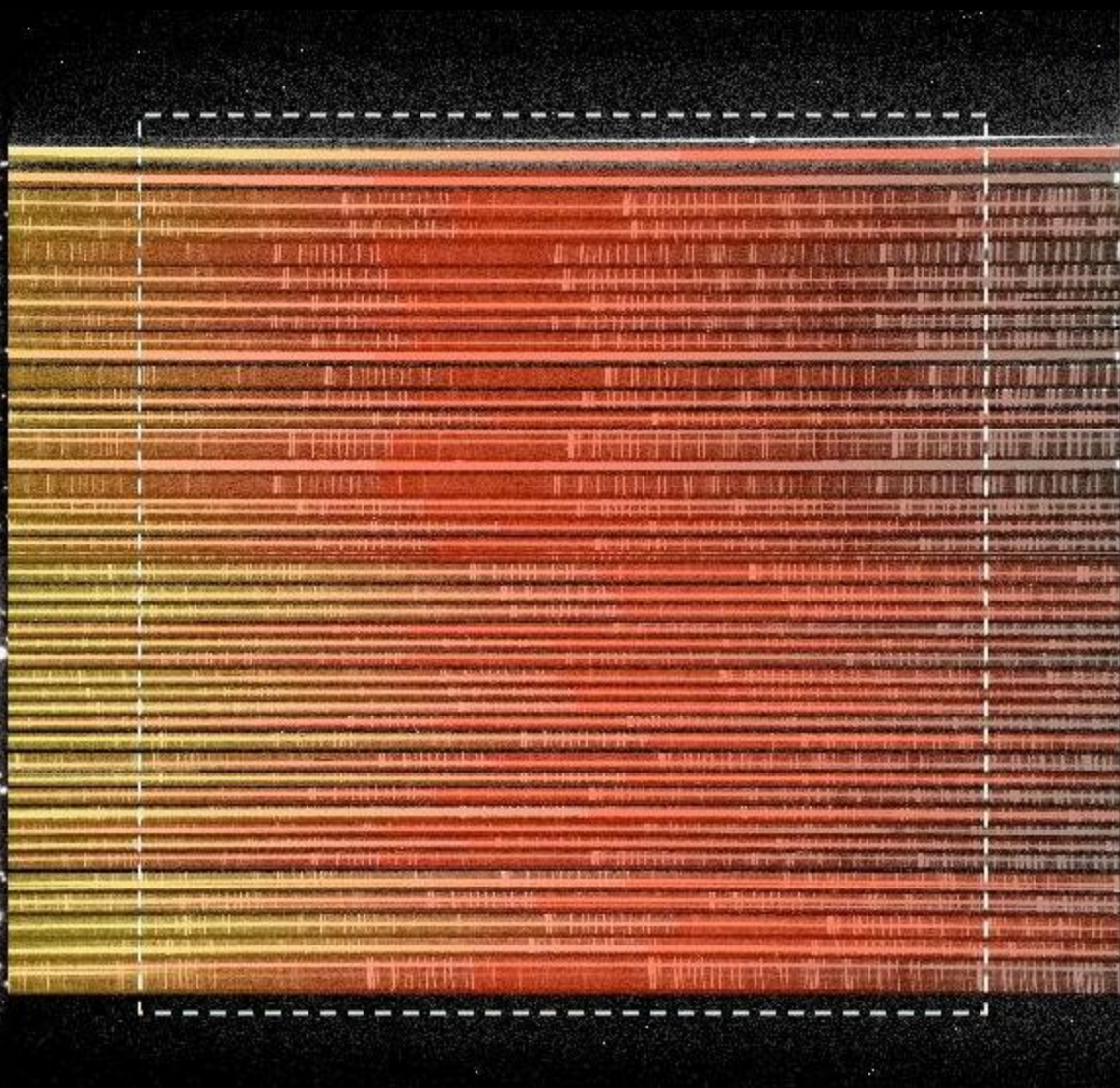
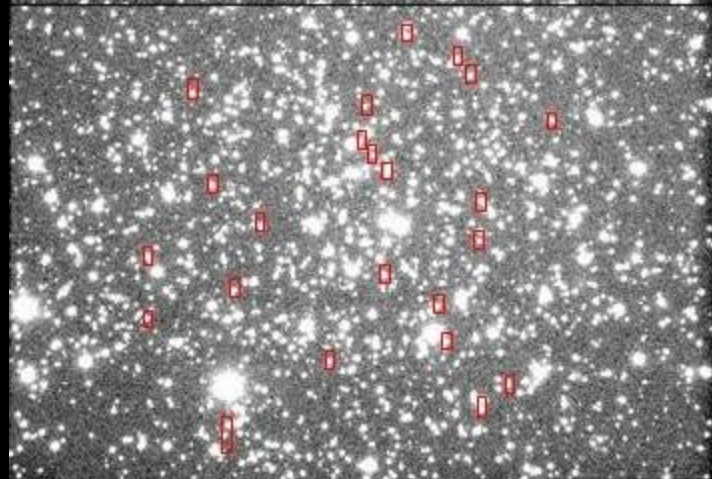
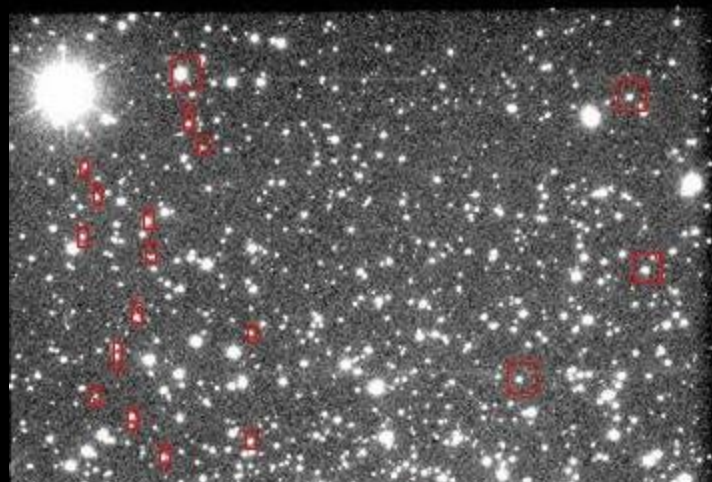
Detector

(Image from Flamingos)

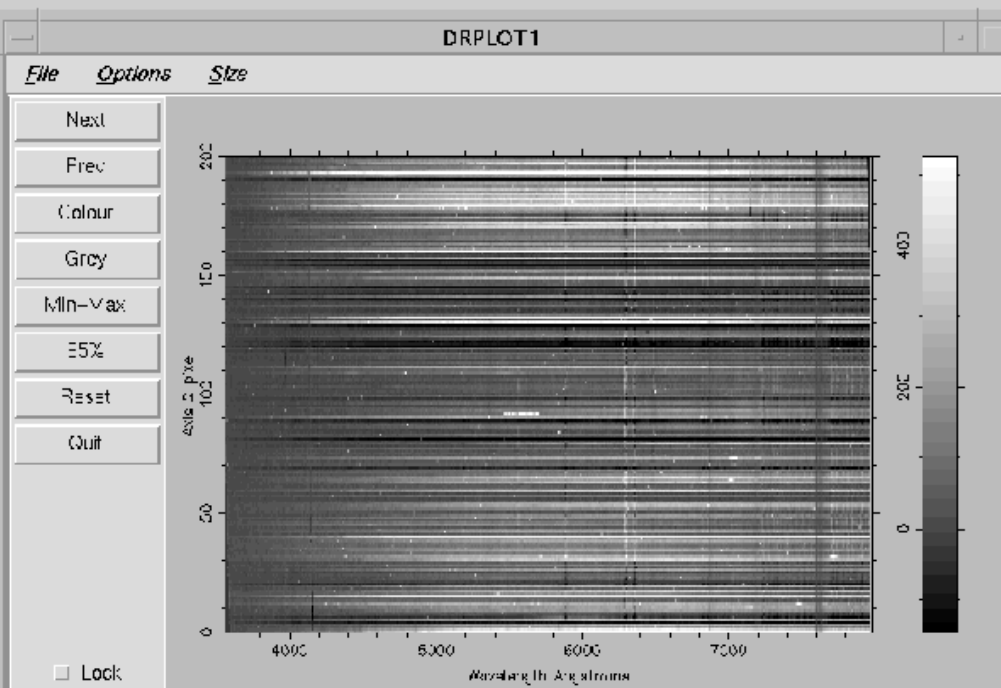
Multi-slit Spectroscopy

- Παράδειγμα εικόνας από φασματογράφο πολλαπλών σχισμών.
- Πολύ εύκολο να γίνει με μια εικόνα (τοποθετώντας σχισμές ή οπές στο εστιακό επίπεδο).
- Η προετοιμασία πριν την έκθεση είναι χρονοβόρα και περίπλοκη.
- Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι δε θα υπάρχει αλληλοεπικάλυψη φασμάτων.



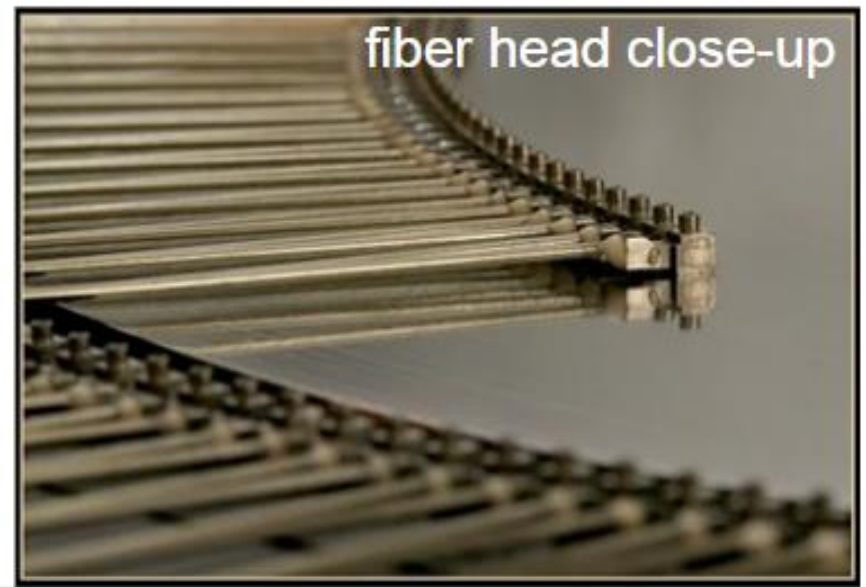
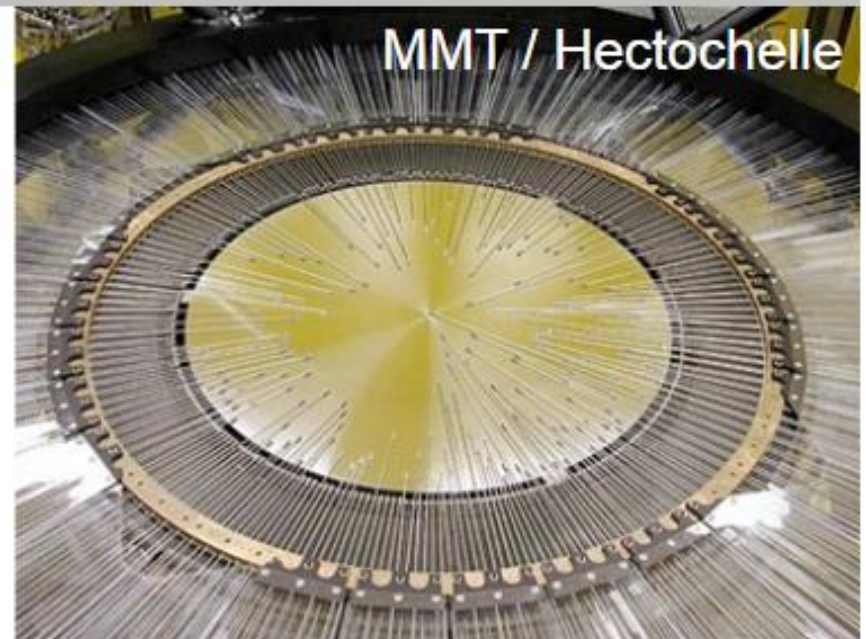


Multi-object spectrograph (MOS)



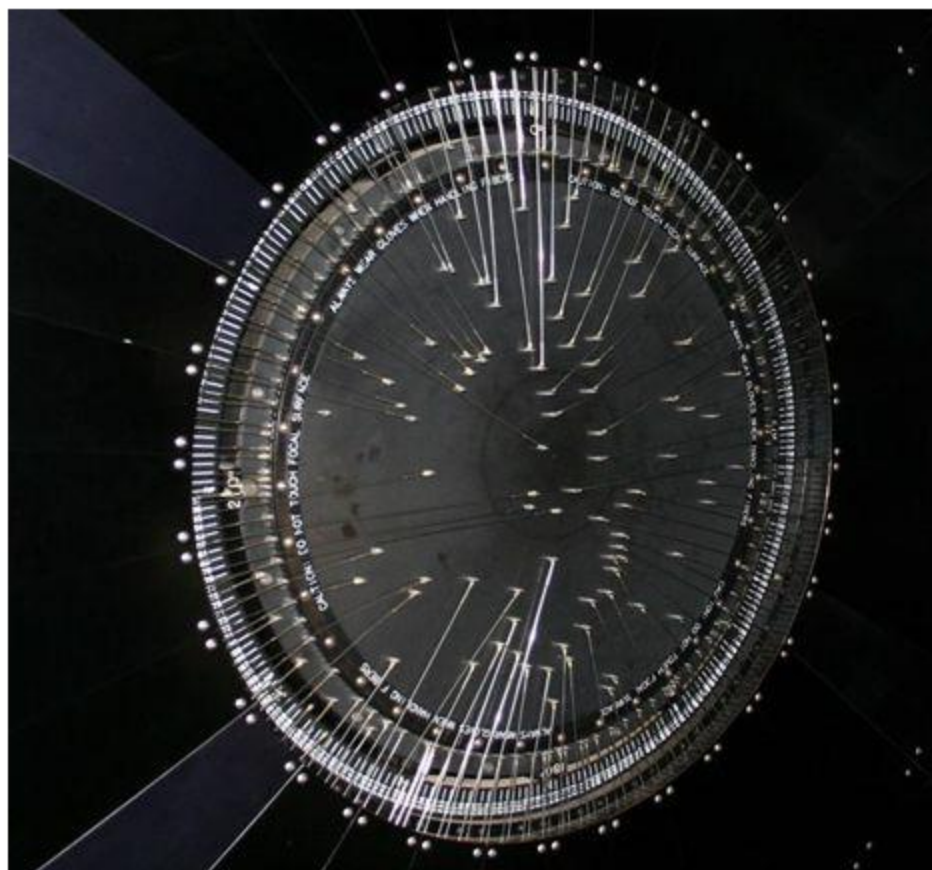
MOS with fibers

- instead of putting a slitlet on each source in the focal plane, position the head of a glass fiber on each source (movable)
- fibers pass light of each object into the instrument
- put the other end of all fibers in a row and feed light into spectrograph
- result: one spectrum for each source, all spectra “nicely” aligned: wavelength scale the same for all spectra, and spectra regularly spaced in spatial direction
- Disadvantage: no spatial info, background subtraction using “sky” fibers.



Multi-object Spectroscopy

- Observing one star at a time is inefficient
- when many stars are available in a field (say, a star cluster) use multi-object spectroscopy
- put an optical fiber at locations of stars to take spectra.
- Feed the optical fibers into a spectrograph.

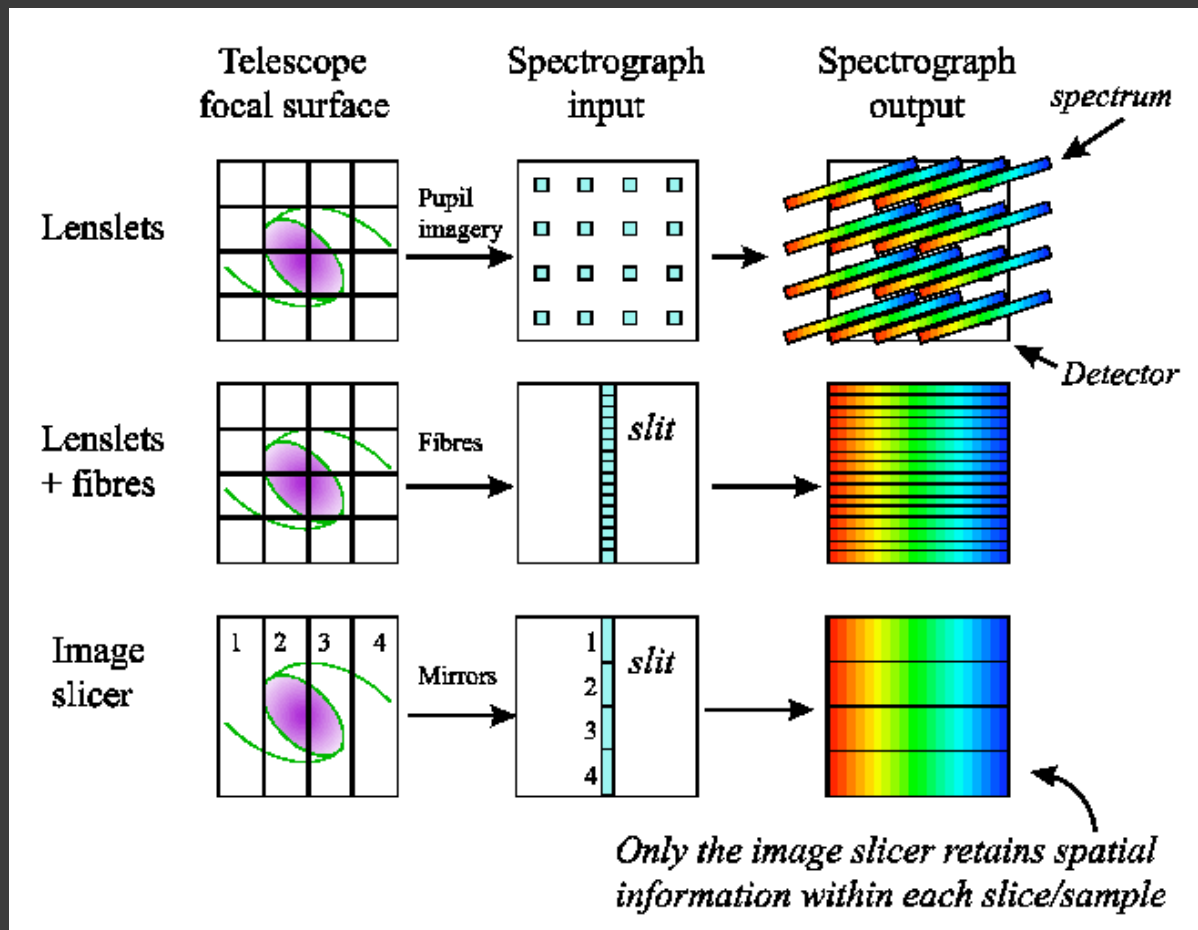


Integral Field Spectroscopy

- 1) Ένας φασματογράφος της κατηγορίας αυτής (multi-object spectrograph) είναι ιδανικός για την καταγραφή πολλών φασμάτων ταυτόχρονα.
- 2) Σε κάποιες περιπτώσεις θέλουμε να πάρουμε το φάσμα πολλών περιοχών ενός εκτεταμένου αντικειμένου ταυτόχρονα (πχ ενός γαλαξία).
- 3) Επομένως χρειάζεται να «καθοδηγήσουμε» το φως διαφόρων στόχων ή περιοχών της εικόνας στην είσοδο του φασματογράφου. Αυτό γίνεται με τεχνικές όπως:
 - i. Image slicer
 - ii. Lenslet
 - iii. Οπτικές ίνες
- 4) Αποτέλεσμα είναι η διακριτική ικανότητα της παρατήρησης αυτής είναι περιορισμένη για τεχνικούς λόγους (διαστάσεις φακών, οπτικών ινών κτλ)

Integral Field Spectroscopy

- Φασματοσκοπία εκτεταμένων αντικειμένων με τη λήψη πολλών φασμάτων.
- Δημιουργία μιας διάταξης 2D με σχισμές ή οπτικές ίνες (mirror slicer) με σκοπό τη λήψη φάσματος από κάθε περιοχή της εικόνας.



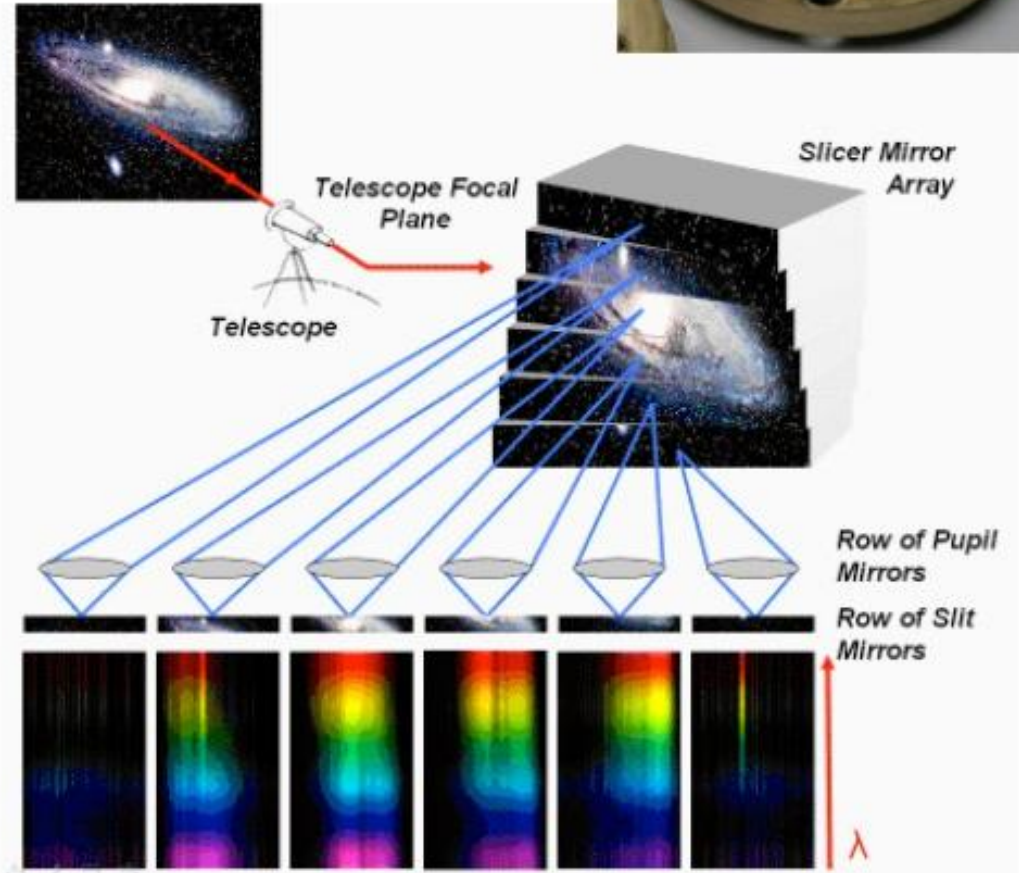
Tiger

SIFS

MPI's 3D

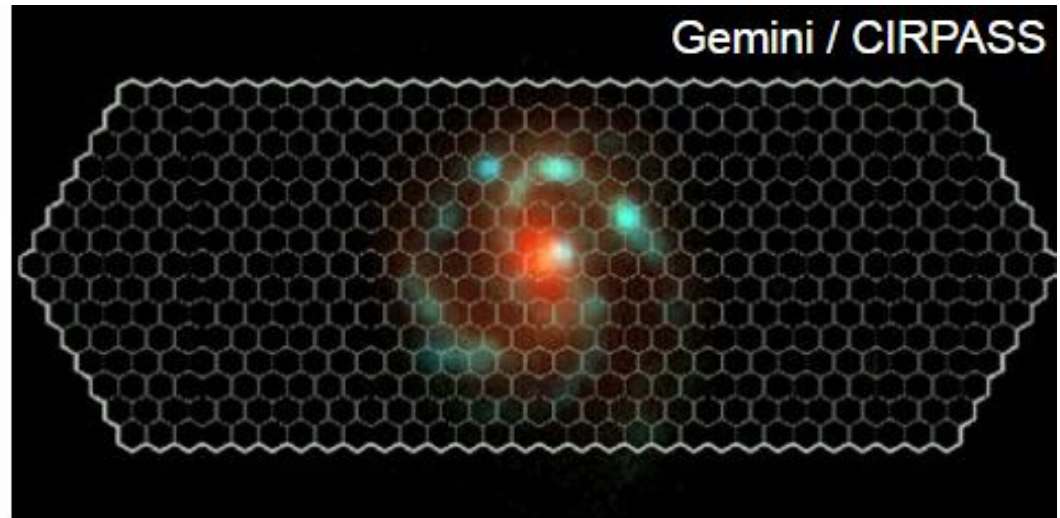
Image Slicer

- Many narrow (~spatial resolution element) long slits, each with slightly different tilt
- effectively, do a large number of longslits simultaneously, send each slit into a different direction
- slits imaged next to each other on detector



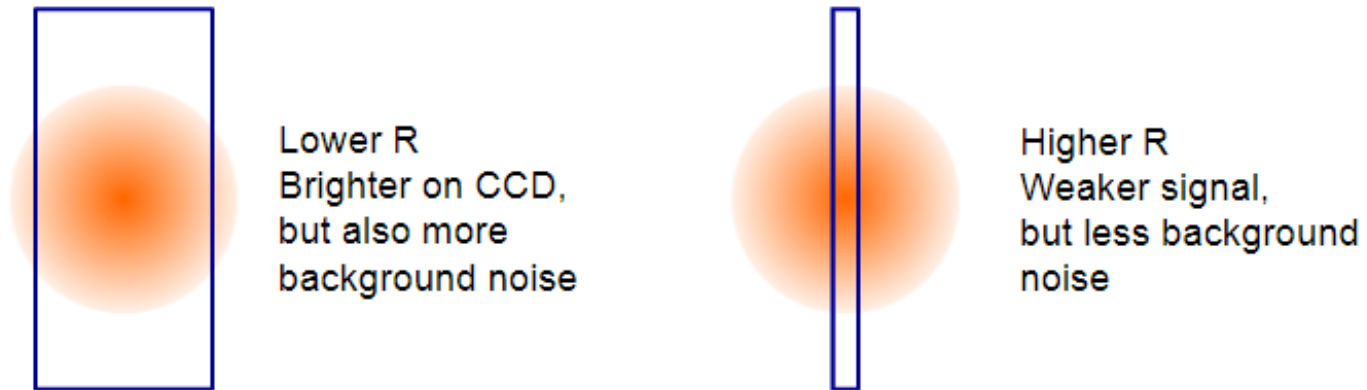
“Lenslets” & Fibers

- Focal plane filled with “lenslets”. Each lenslet injects (nearly) all light falling onto it into a fiber
- Fibers are fed into a spectrograph, in the same way as with the fiber Multiple Object Spectrograph



Η σχισμή του φασματογράφου

- Spectral resolution is limited by R of the spectrograph...
- ...but also by the slit width.
- Conversely: Slit width $\sim$ brightness of the spectrum on the CCD



- Optimum slit width is balance between low slit losses (wide slit) versus low background and high spec. res. (narrow slit)
- In general: Higher R requires longer exposure for same Signal-to-Noise ratio

Ευαίσθησία φασματογράφων

- 1) Καιρικές συνθήκες (διαύγεια)
- 2) Υγρασία
- 3) Υψόμετρο
- 4) Ατμοσφαιρική διαταραχή (seeing)
- 5) Θερμοκρασιακές μεταβολές
- 6) Άνεμοι
- 7) Φωτορρύπανση

επίδραση

μεγάλη

μεγάλη

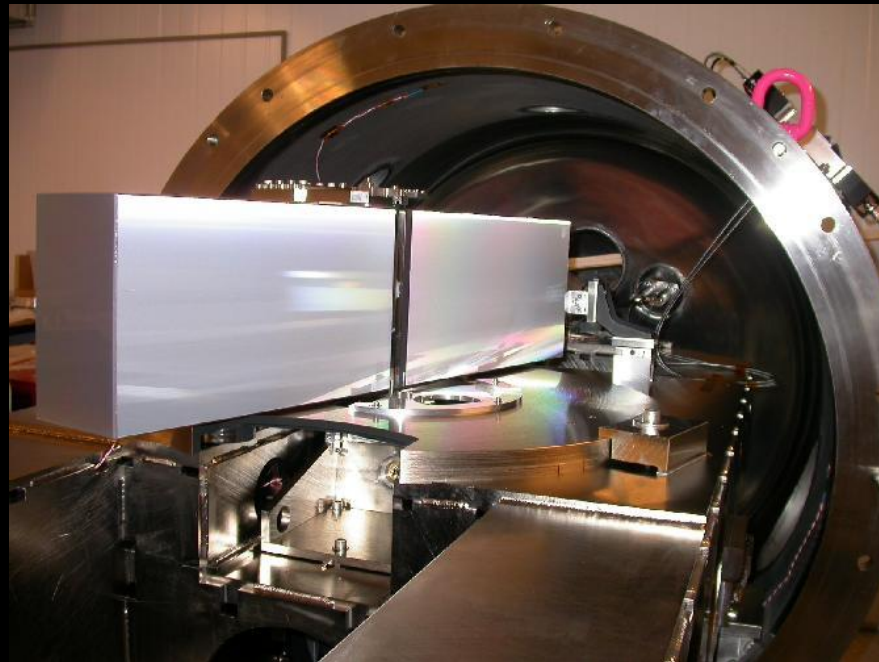
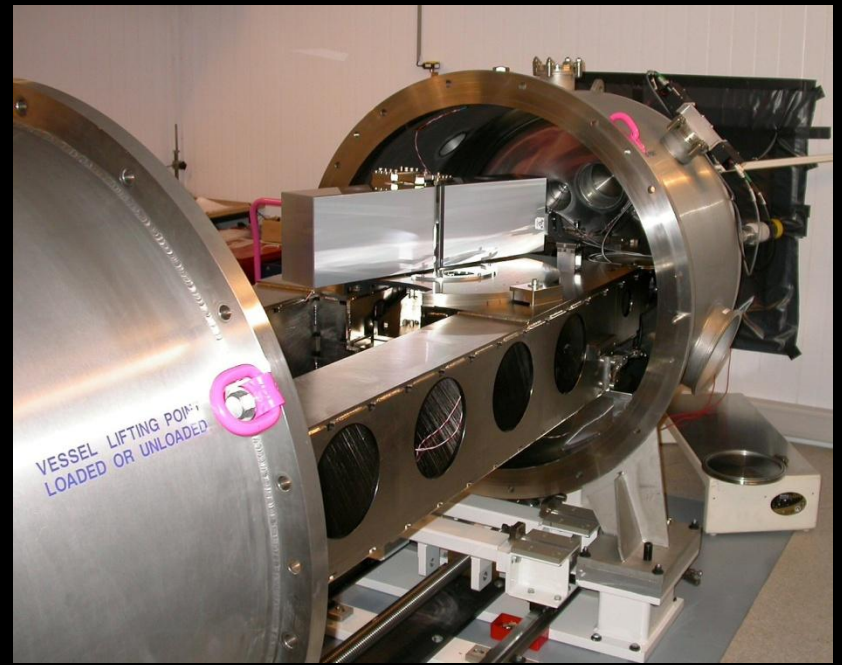
μεγάλη

μεγάλη

μεγάλη

μεγάλη

μικρή



Φασματογράφος HARPS

Αστεροσκοπείο La Silla, Chile

Spectral Cube

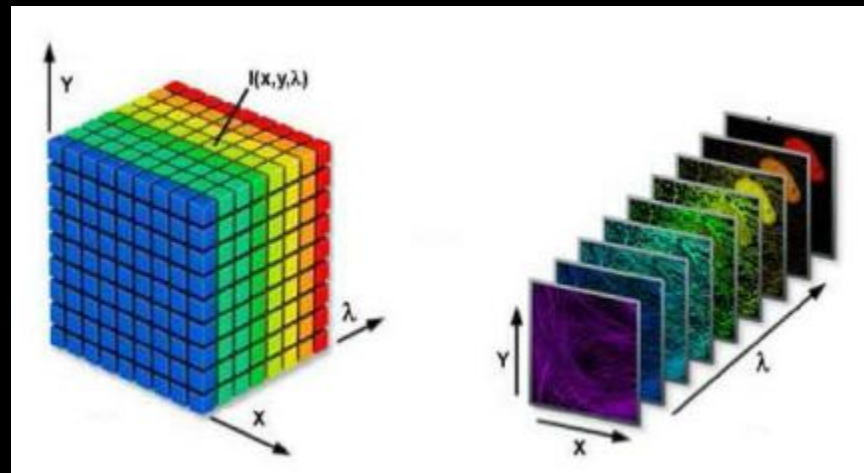
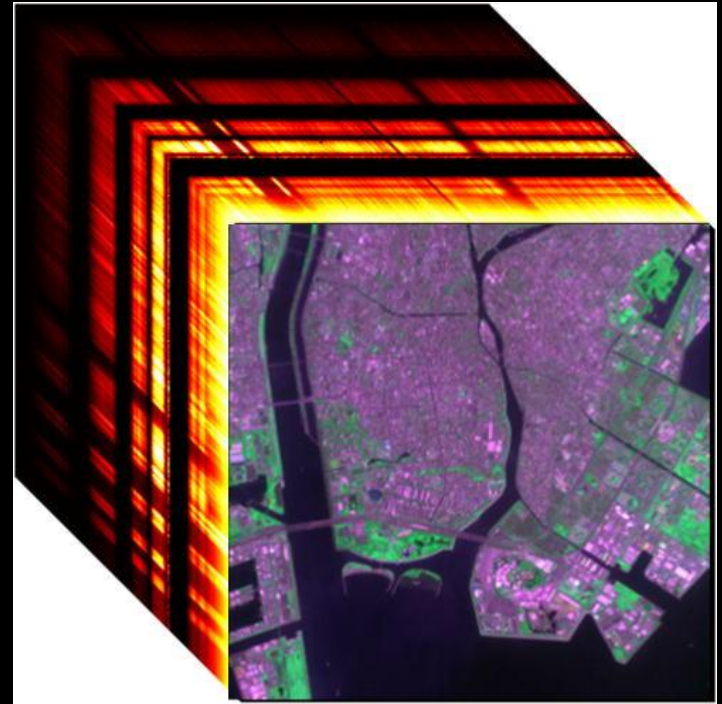
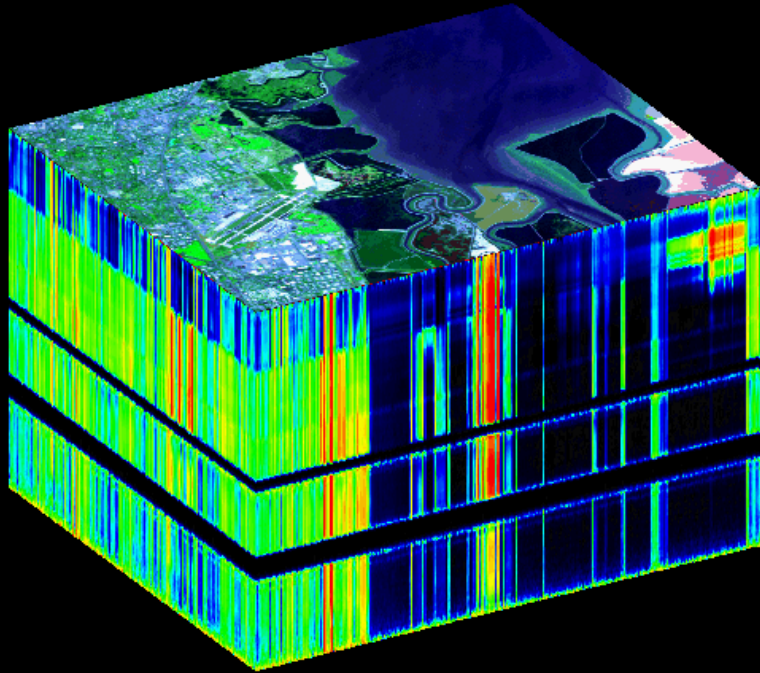


Image slice at a single
infrared wavelength

Spectral slice showing the
spectra across the entire
galactic nucleus

Galactic nucleus
seen in
combined
infrared light

