



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κοσμάς Γαζέας

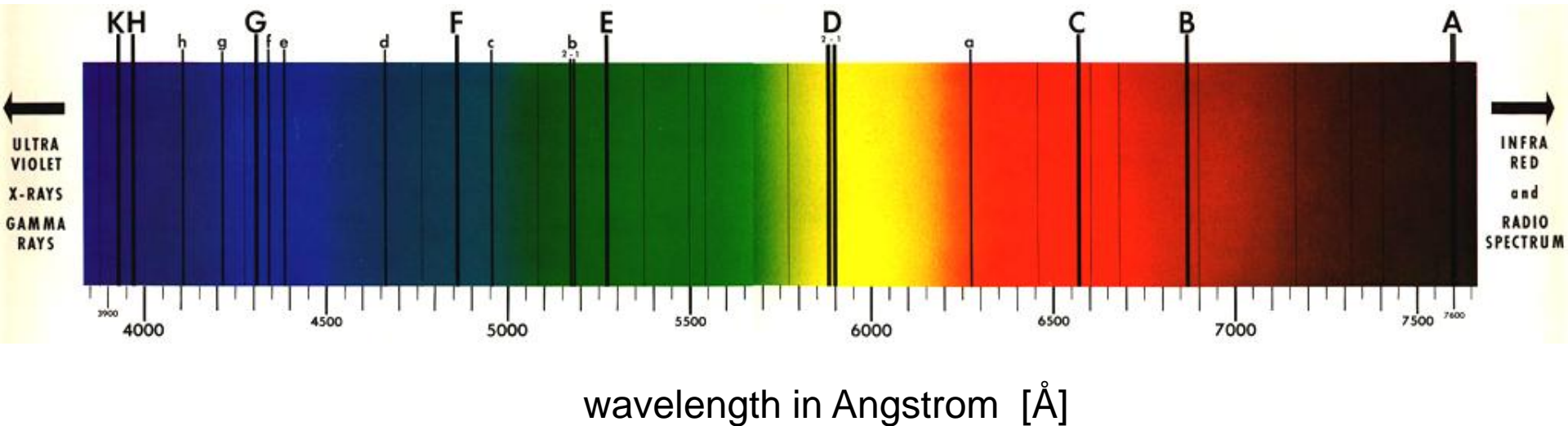
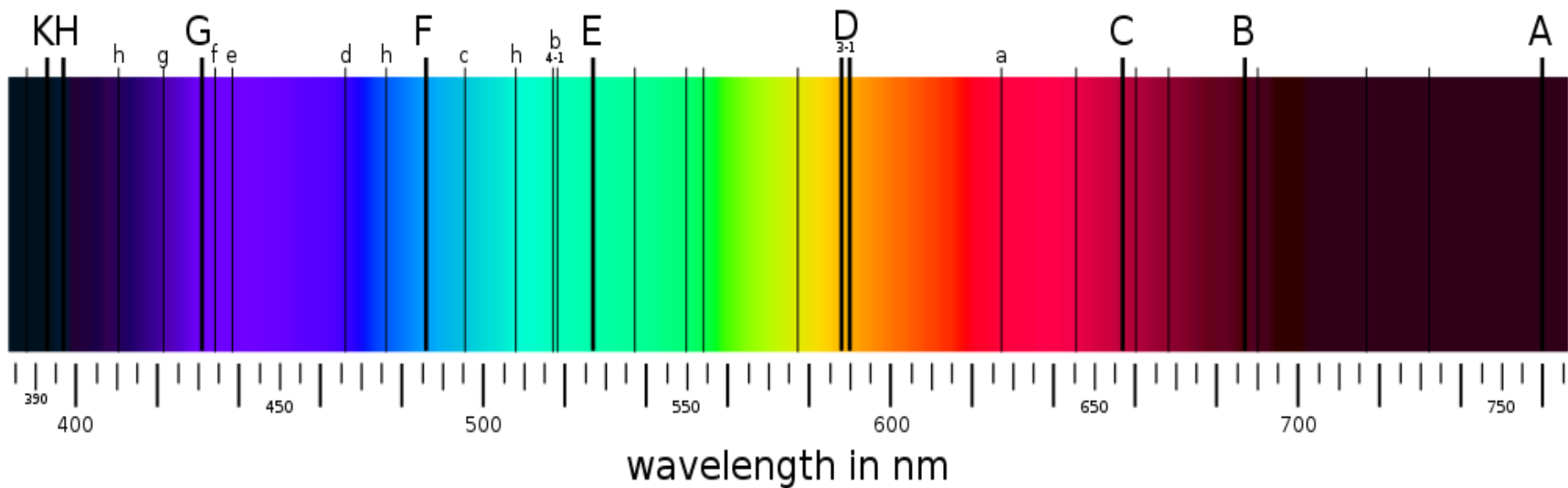
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

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

- **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

- 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 ηλιακό φως επάνω στην ατμόσφαιρά της.



- **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:

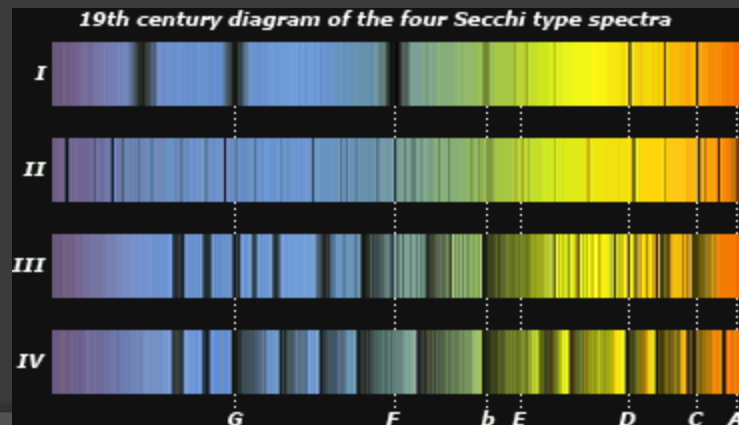
Type I – φάσματα από γαλανόλευκους αστέρες με γραμμές απορρόφησης κυρίως από ήλιο και υδρογόνο.

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.

• Ιστορική αναδρομή

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

A – φάσματα κυανόλευκων αστέρων με εμφανείς γραμμές υδρογόνου

B – φάσματα κυανόλευκων αστέρων με γραμμές υδρογόνου και ηλίου

C – φάσματα κυανόλευκων αστέρων με διπλές γραμμές υδρογόνου

D – φάσματα κυανόλευκων αστέρων με γραμμές εκπομπής

E – φάσματα με γραμμές CaII και υδρογόνου

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

G – φάσματα κίτρινων αστέρων 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 αστέρων με εμφανείς ζώνες απορρόφησης

L – ιδιόμορφα φάσματα του τύπου K

M – φάσματα πορτοκαλί-κόκκινων αστέρων με μοριακές ζώνες απορρόφησης

N – φάσματα κόκκινων αστέρων με γραμμές απορρόφησης άνθρακα

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

P – φάσματα πλανητικών νεφελωμάτων

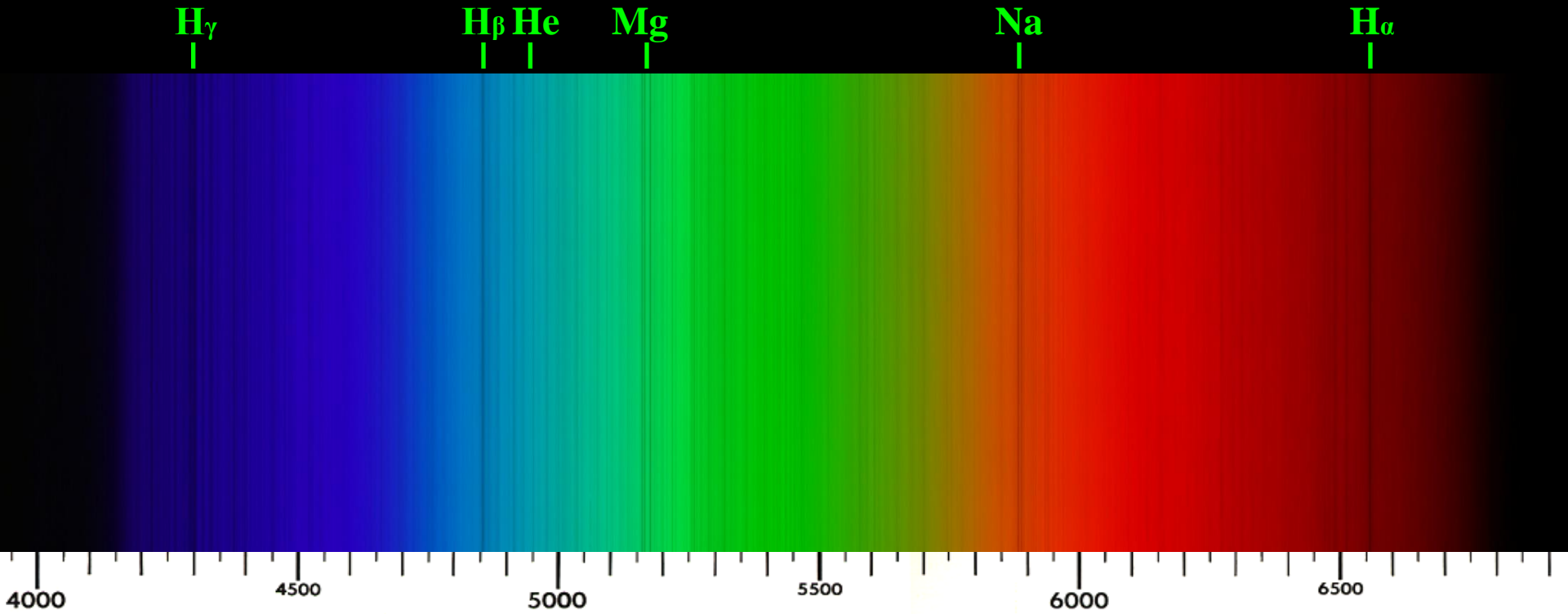
Q – φάσματα όλων των υπολοίπων κατηγοριών (καινοφανών κτλ)

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 *Στάχυς (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 (Call). (π.χ. *Προκύων*).
- **Τύπος G:** αστέρες με θερμοκρασίες 5.000 - 6.000 K και κίτρινο χρώμα με γραμμές απορρόφησης Call 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 *Βούτη*).
- **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.

Το ηλιακό φάσμα (G2V)

Διακρίνονται οι γραμμές απορρόφησης Fraunhofer



Αστέρες Φασματικού Τύπου O, B, A, F, G, K

| | | |||

O9 V

B5 V

A5 V

F5 V

G5 V

K5 V

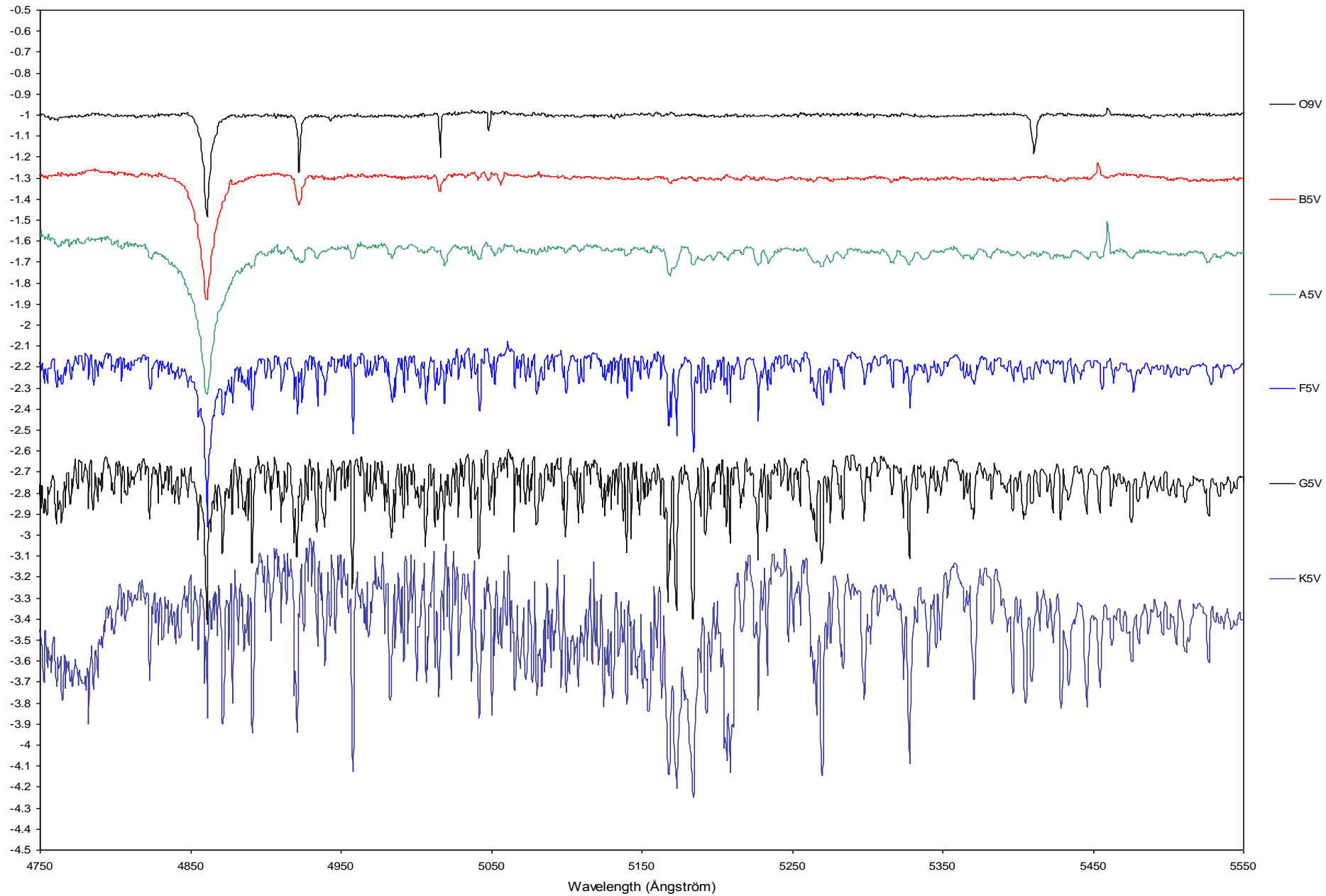
|
H β

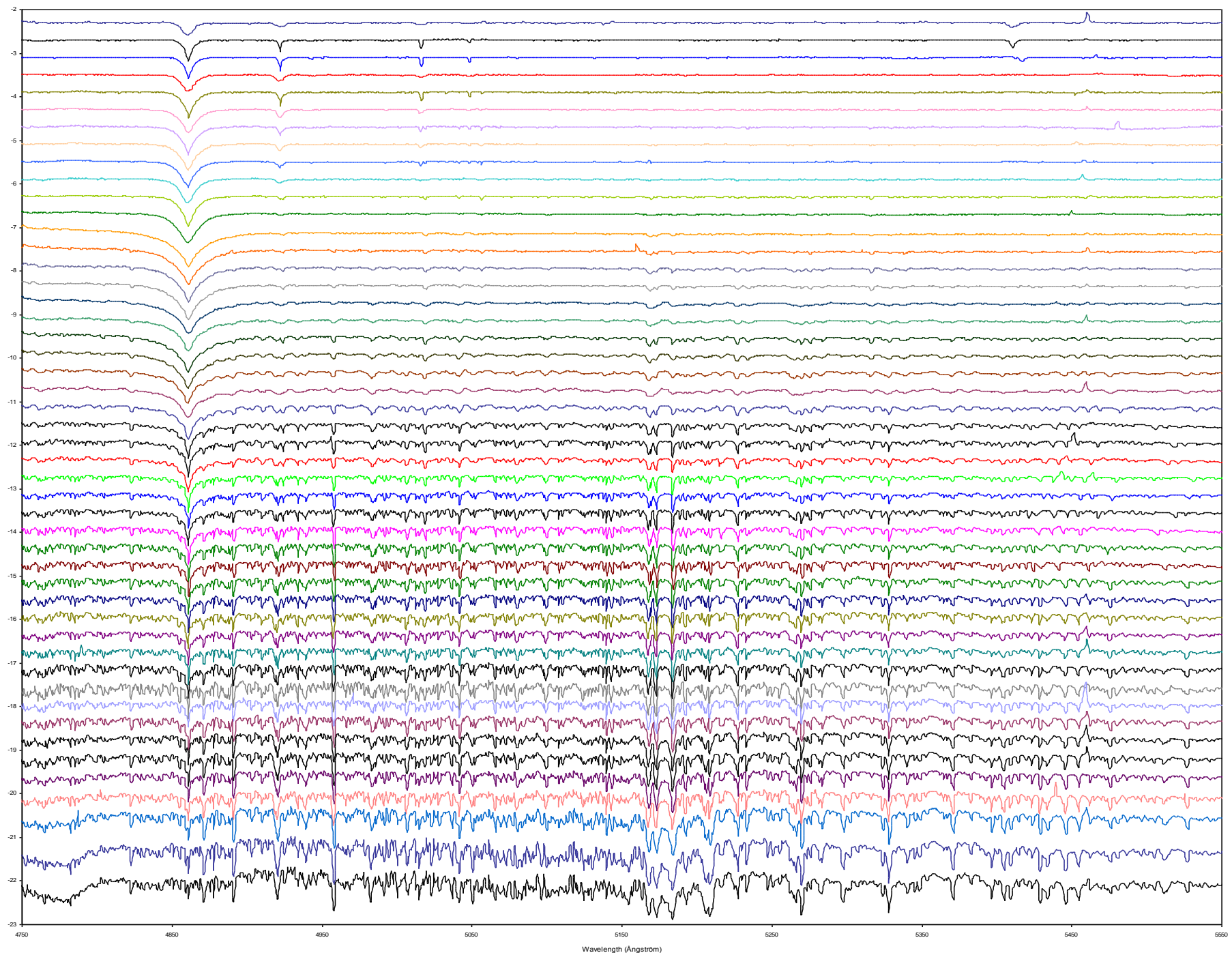
|
He

|
He

|||
Mg

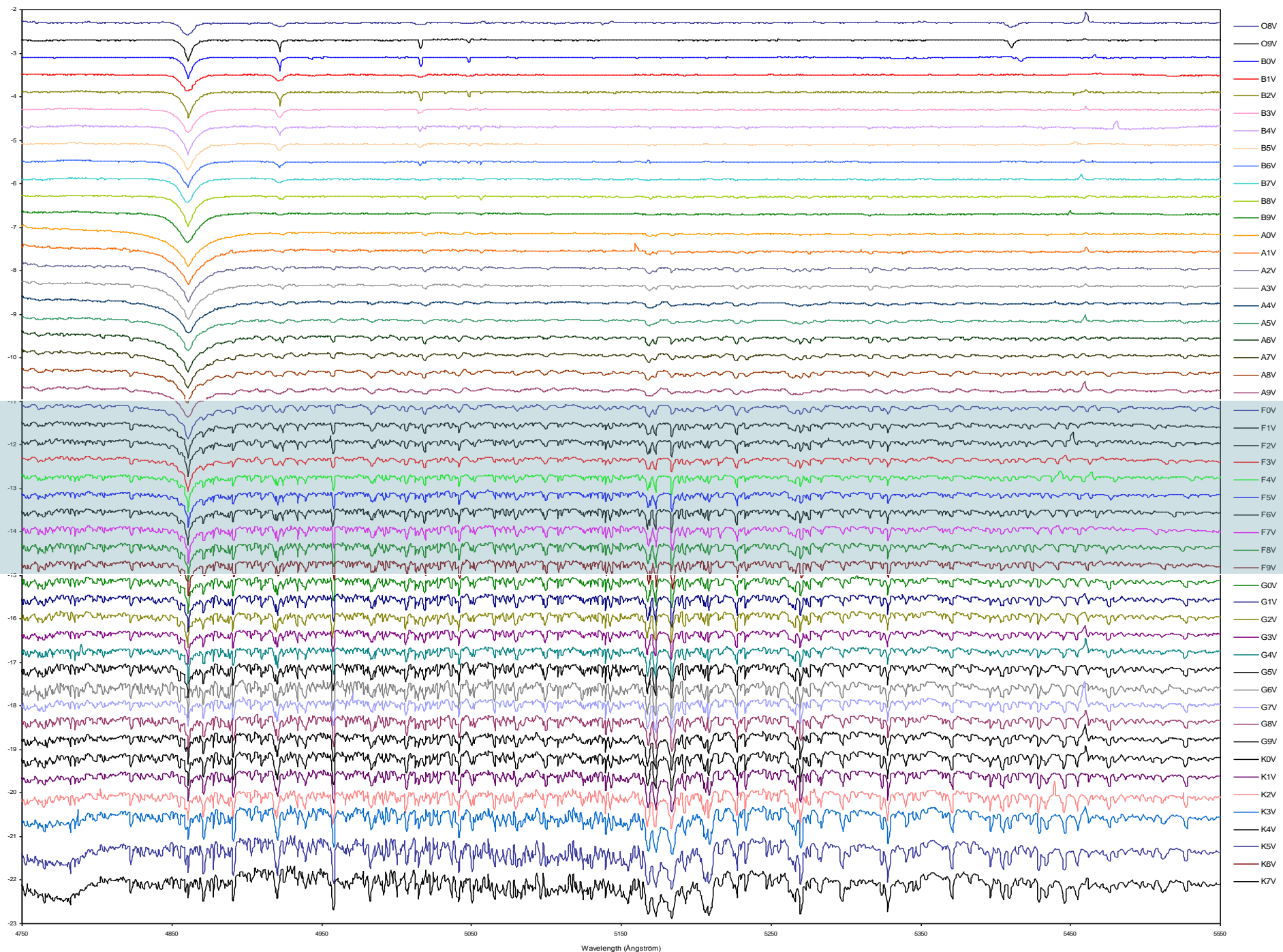
Φασματοφωτομετρία Αστέρων O, B, A, F, G, K



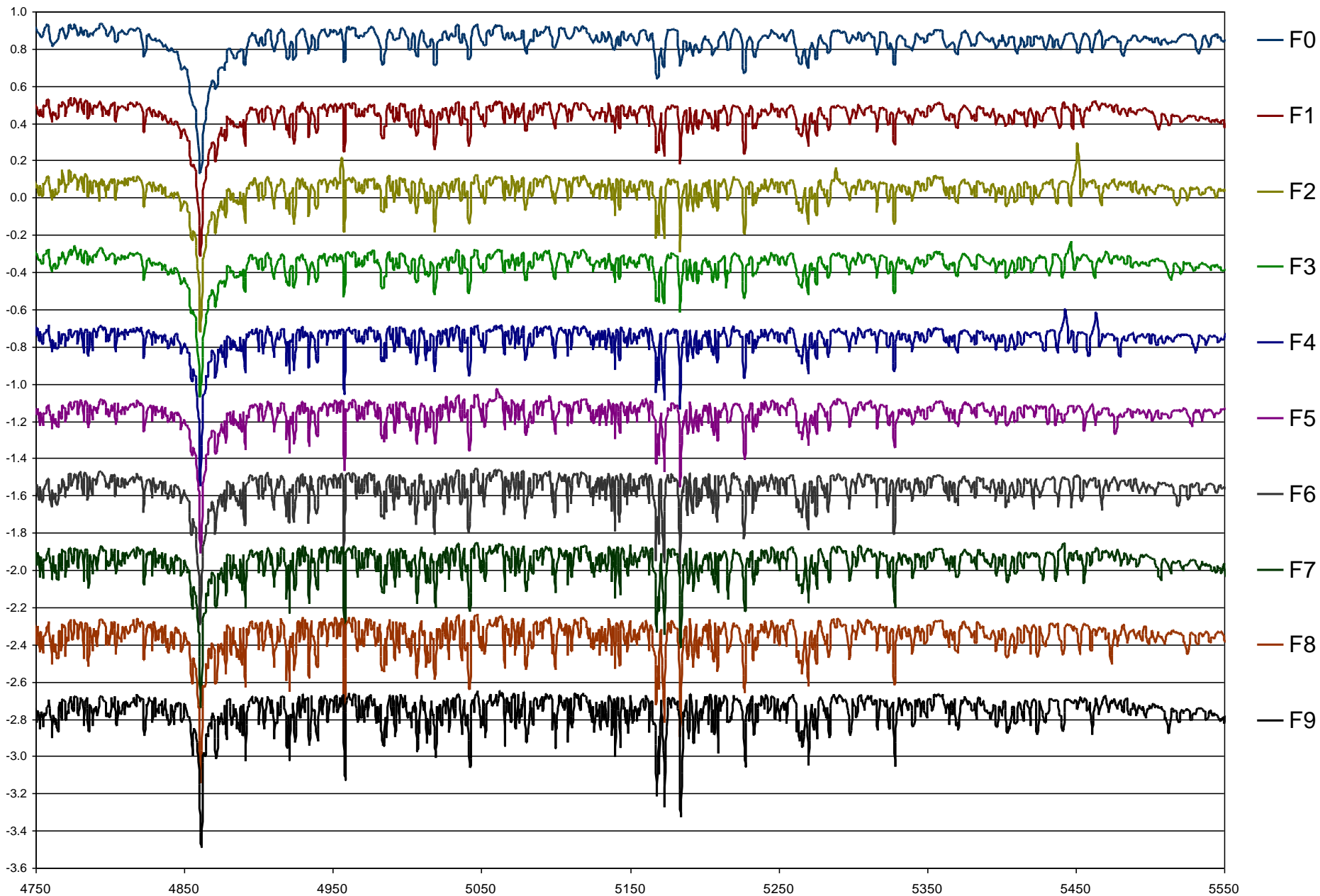


- O6V
- O9V
- B0V
- B1V
- B2V
- B3V
- B4V
- B5V
- B6V
- B7V
- B8V
- B9V
- A0V
- A1V
- A2V
- A3V
- A4V
- A5V
- A6V
- A7V
- A8V
- A9V
- F0V
- F1V
- F2V
- F3V
- F4V
- F5V
- F6V
- F7V
- F8V
- F9V
- G0V
- G1V
- G2V
- G3V
- G4V
- G5V
- G6V
- G7V
- G8V
- G9V
- K0V
- K1V
- K2V
- K3V
- K4V
- K5V
- K6V
- K7V

Wavelength (Angstrom)



Αστέρες Φασματικού Τύπου F(0-9) V



• 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:

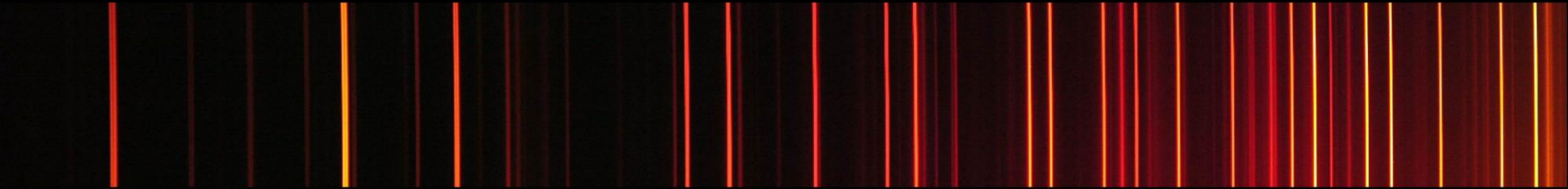
Διεύρυνση λόγω φαινομένου Doppler: τα άτομα βρίσκονται σε διαρκή θερμική ή τυρβώδη κίνηση μέσα στο αέριο. Αυτό προκαλεί διεύρυνση 0.02 nm στις γραμμές του υδρογόνου. Επίσης οι αστέρες και τα ουράνια σώματα γενικότερα κινούνται στο χώρο. Η περιστροφή των αστέρων έχει σαν αποτέλεσμα τη διεύρυνση των φασματικών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

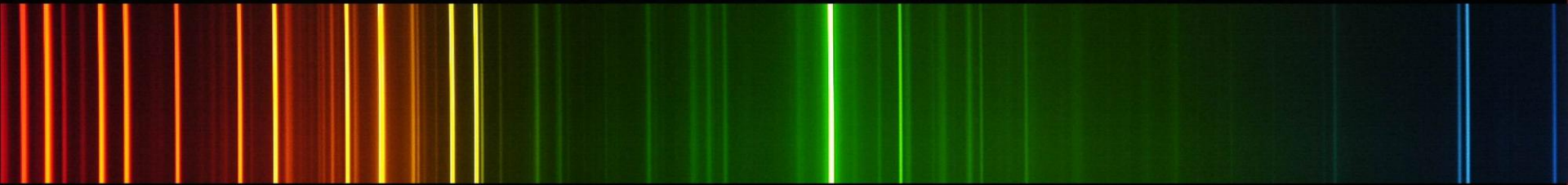
Μαγνητική διεύρυνση (Zeeman): το μαγνητικό πεδίο διασπά τις ενεργειακές στάθμες σε περισσότερες από μία, προσθέτοντας (ή αφαιρώντας) ενέργεια στο spin του ηλεκτρονίου.

Το φάσμα βαθμονόμησης (Hg – Ne – Xe)



7032 Å

A horizontal strip of a spectral calibration source showing a series of vertical emission lines. The lines are primarily in the red and orange-red range, with some yellow and green lines interspersed. The background is black.



5461 Å

A horizontal strip of a spectral calibration source showing a series of vertical emission lines. The lines are primarily in the green and blue-green range, with some yellow and orange lines interspersed. The background is black.



4358 Å

A horizontal strip of a spectral calibration source showing a series of vertical emission lines. The lines are primarily in the blue and blue-violet range, with some purple and orange lines interspersed. The background is black.

4047 Å

• Το μέλαν σώμα

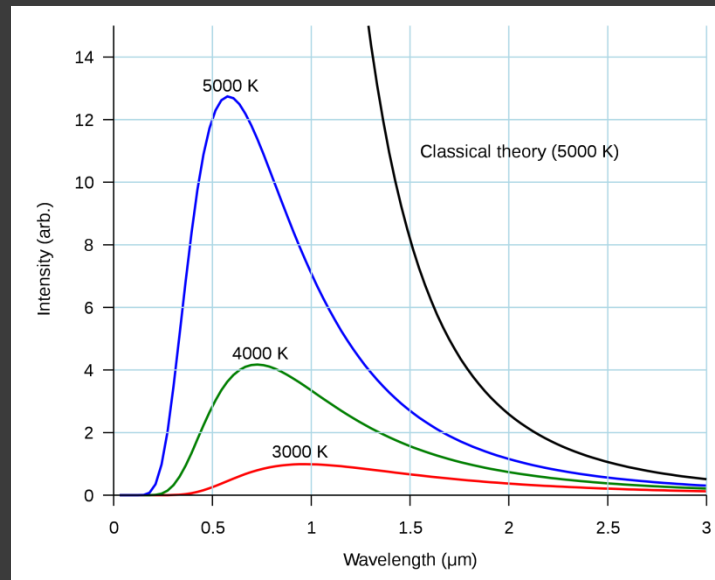
- Οι αστέρες είναι πύρινες σφαίρες που αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο.
- Κάτω από την πίεση της βαρύτητας, η θερμοκρασία του κέντρου των αστερων φτάνει τους 10^6 K, ενεργοποιώντας τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα.
- Τέσσερα άτομα υδρογόνου συντήκονται και παράγουν ένα άτομο ηλίου, 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.

• Το μέλαν σώμα

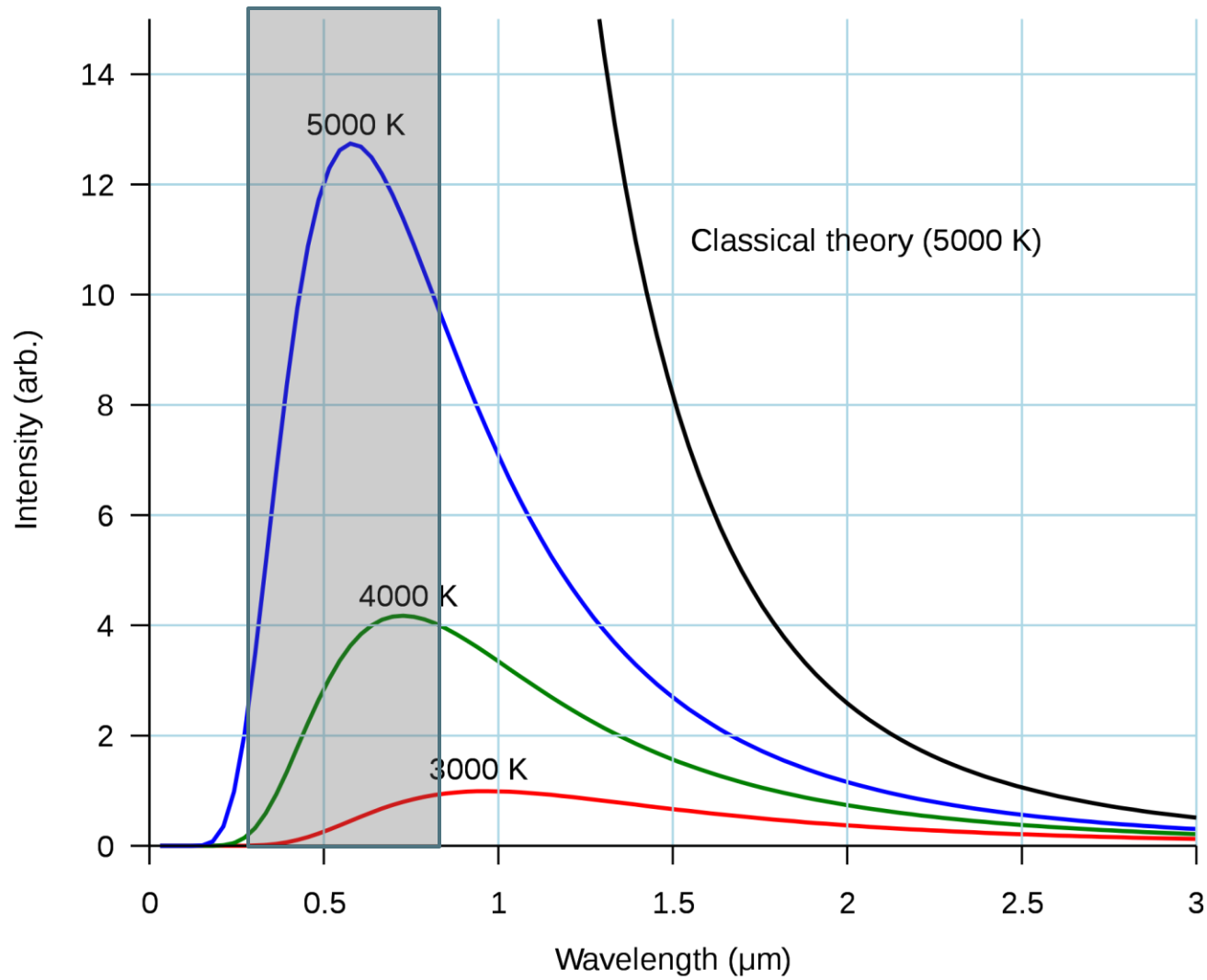
- Σύμφωνα με το νόμο του Planck η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός θερμού σώματος (το οποίο εκπέμπει ως μέλαν σώμα) υπακούει τη σχέση:

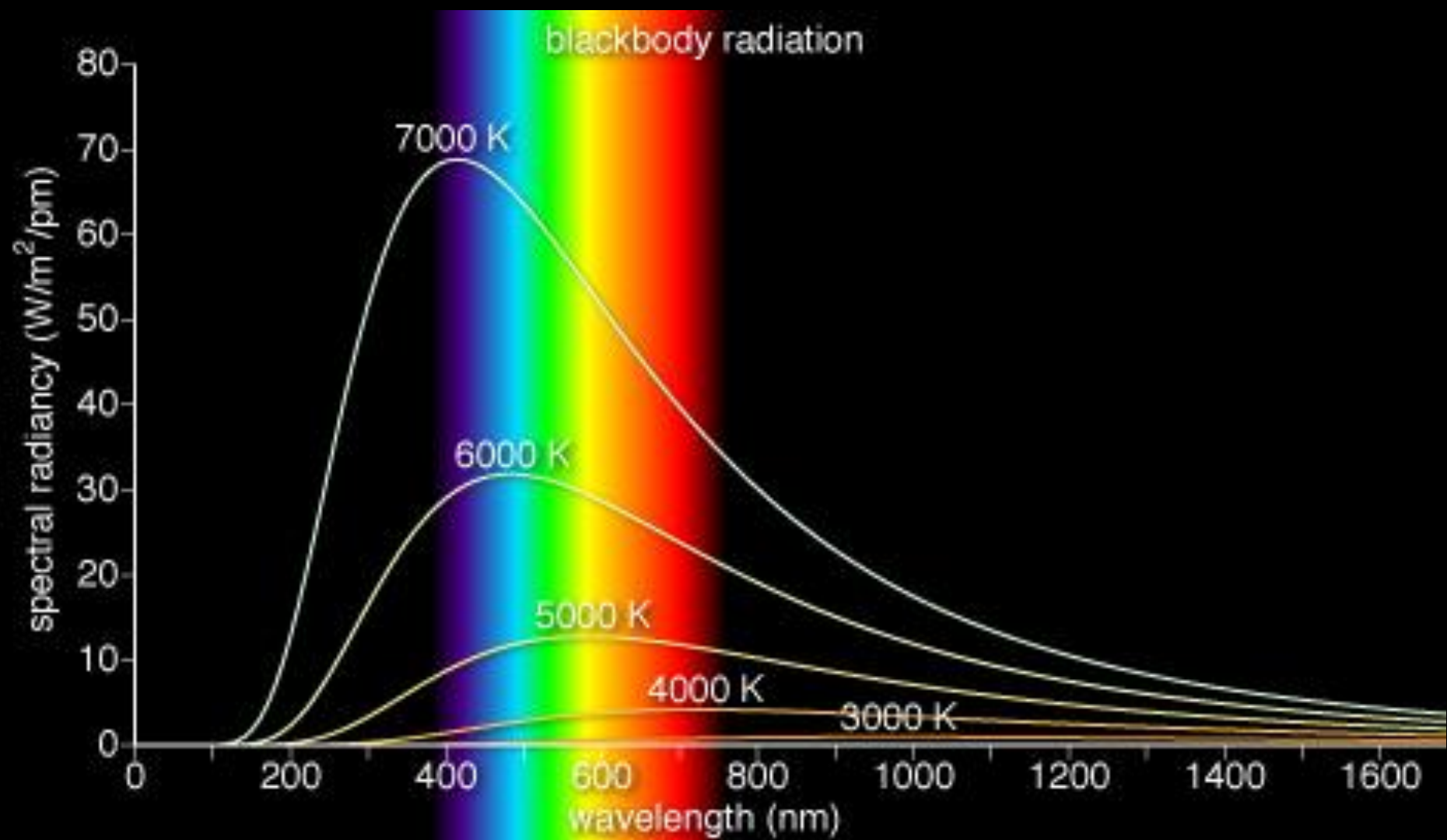
$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}, \text{ or } B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

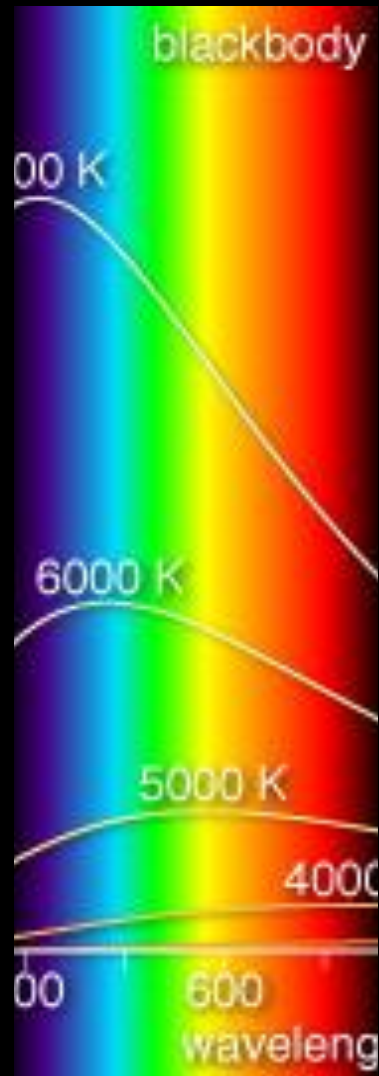
- Αυτή έχει τη χαρακτηριστική μορφή του σχήματος:



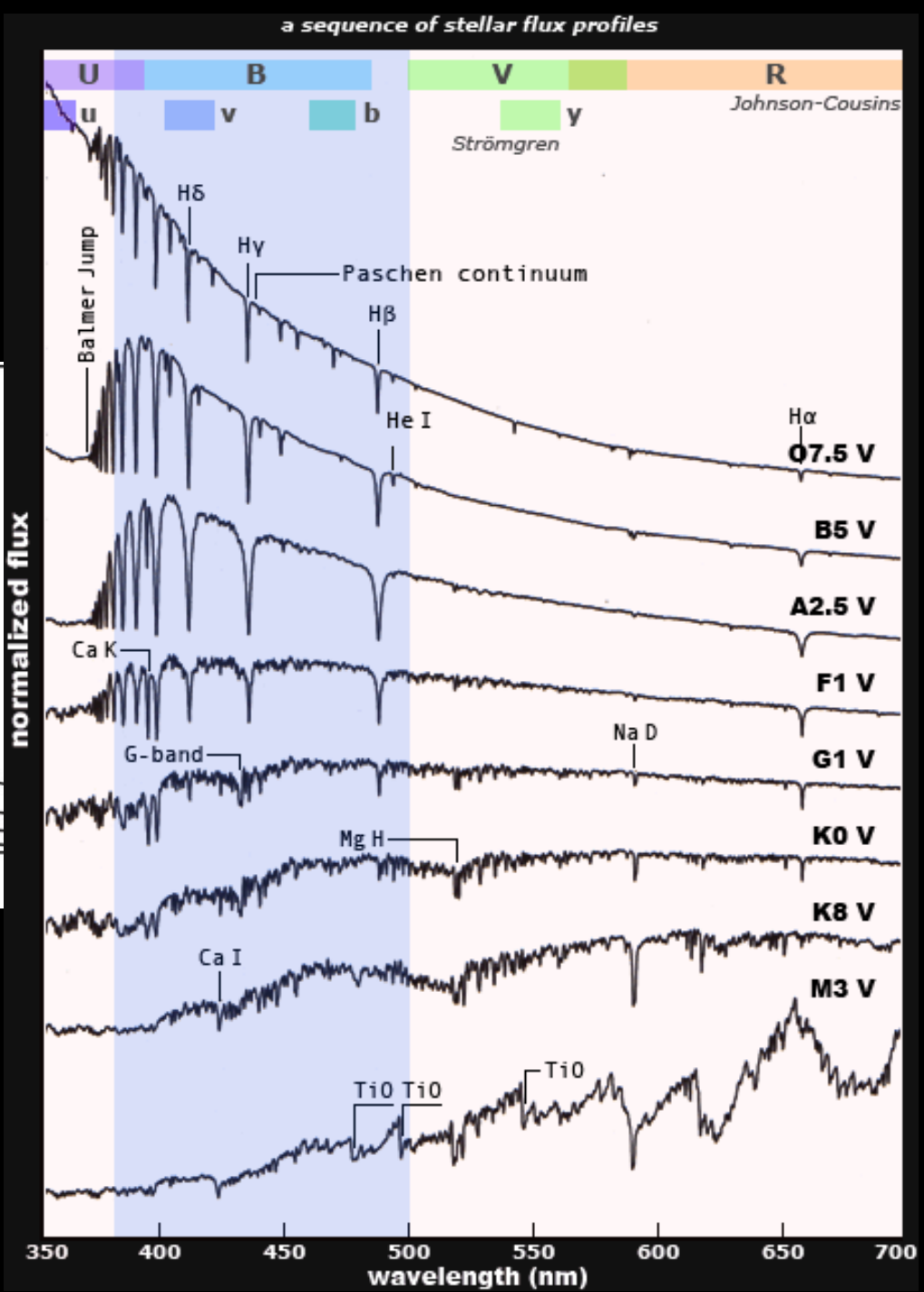
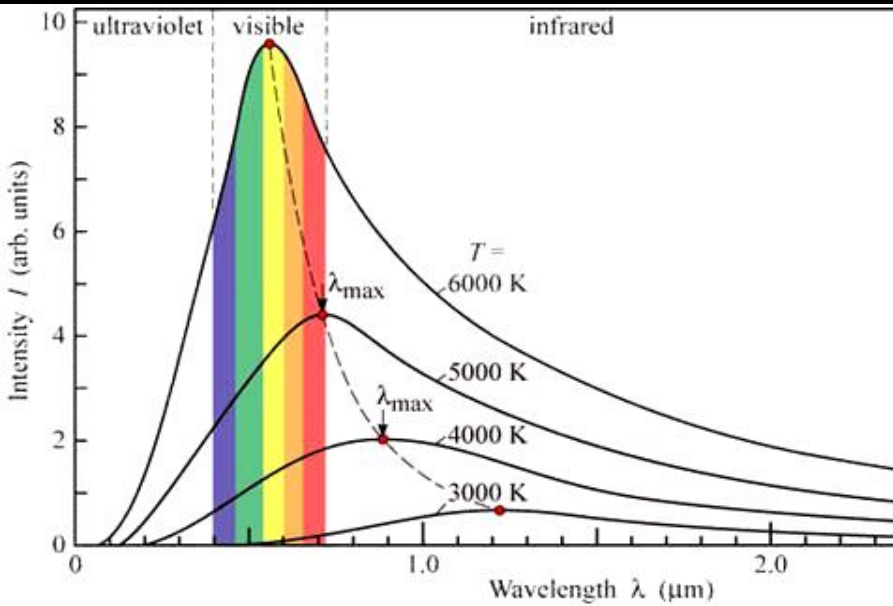
- Όλοι οι αστέρες ακολουθούν την κατανομή αυτή, επάνω στην οποία προστίθενται οι φασματικές γραμμές (εκπομπής ή απορρόφησης).



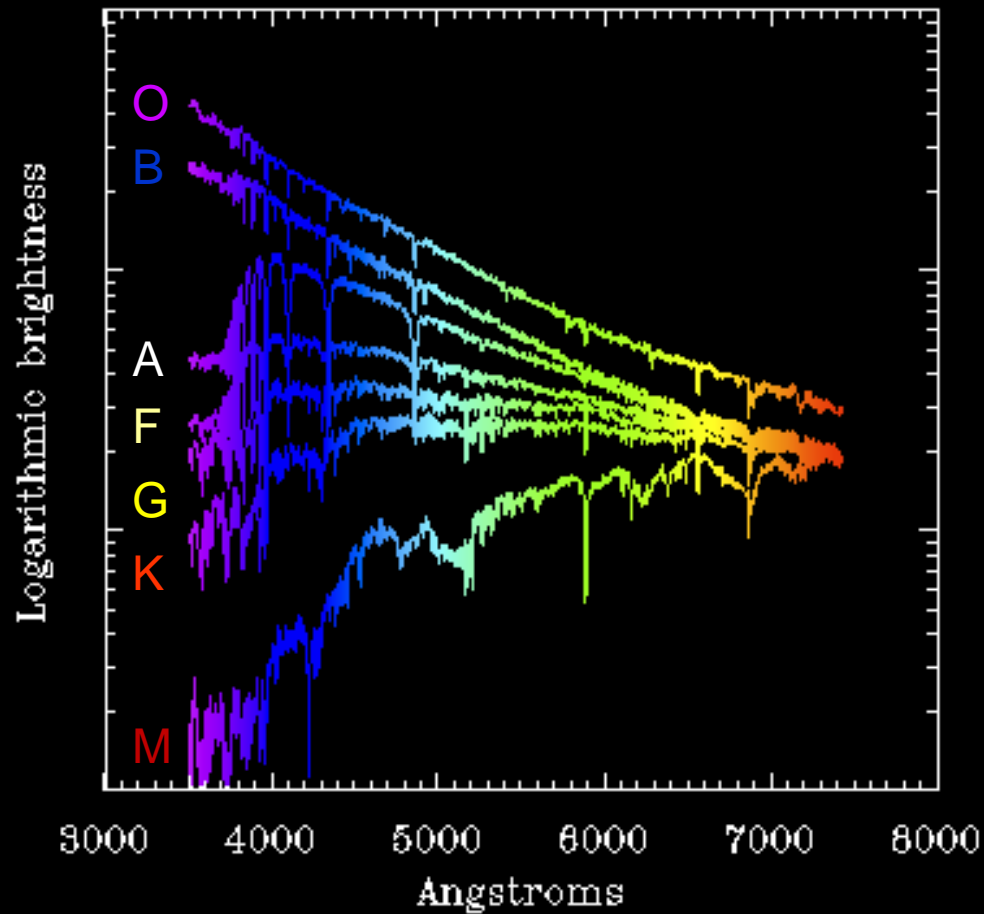




↔ Ορατό φάσμα

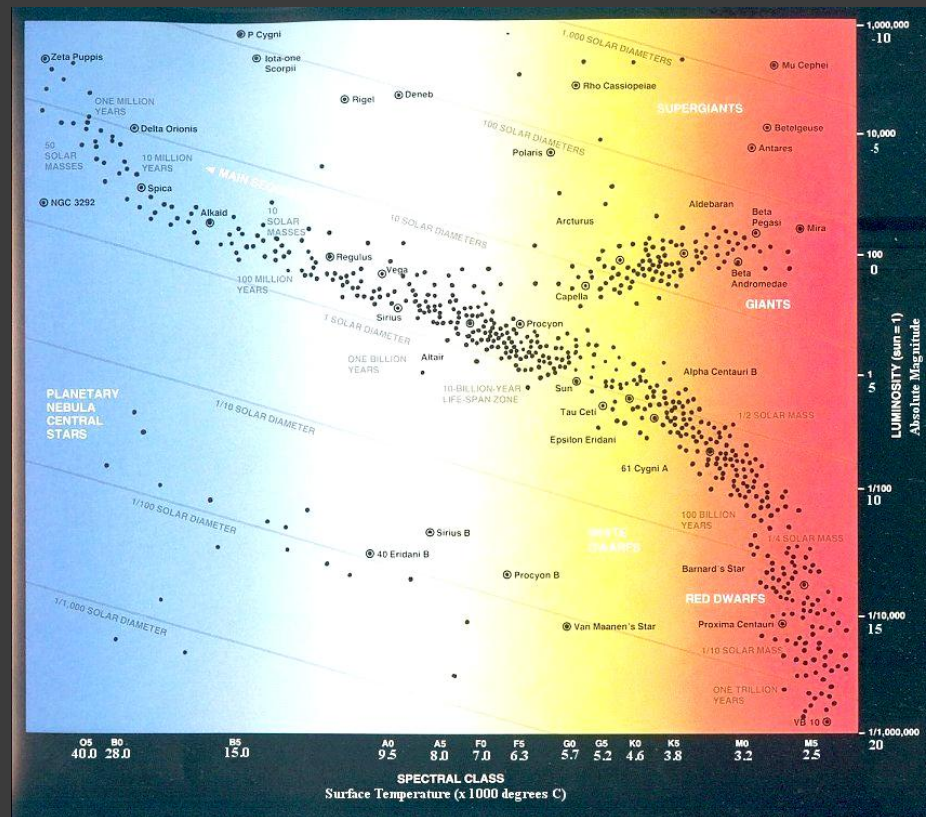


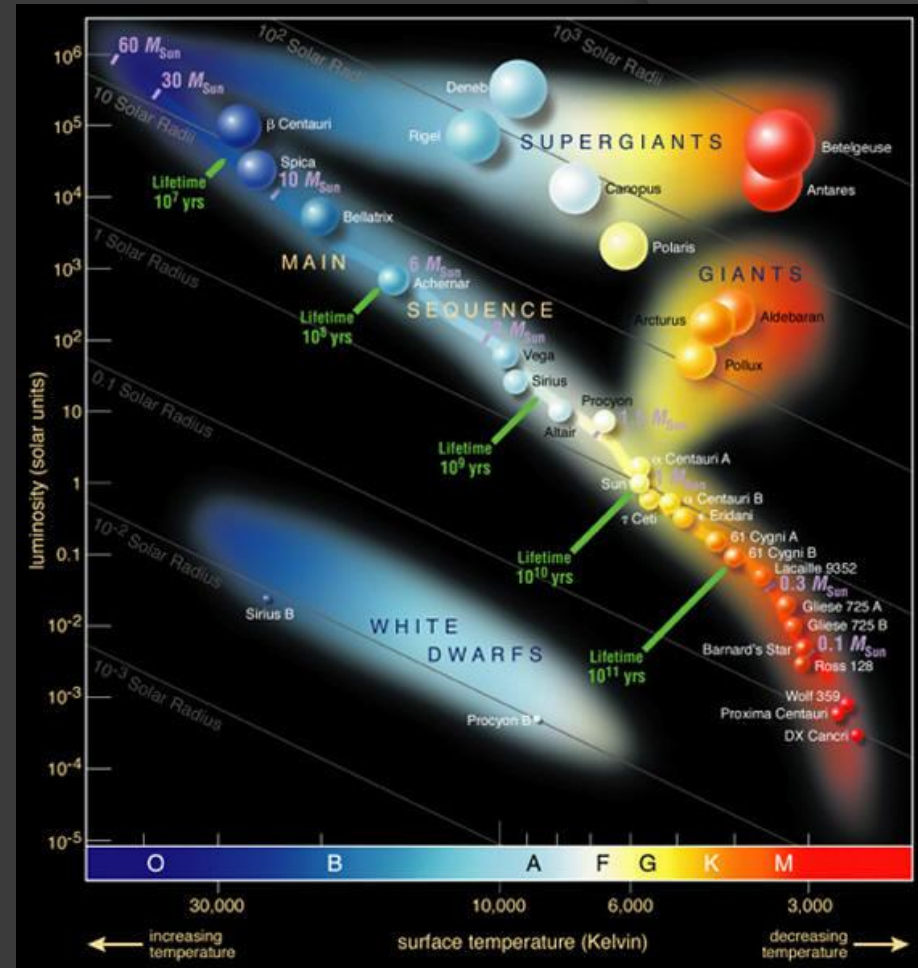
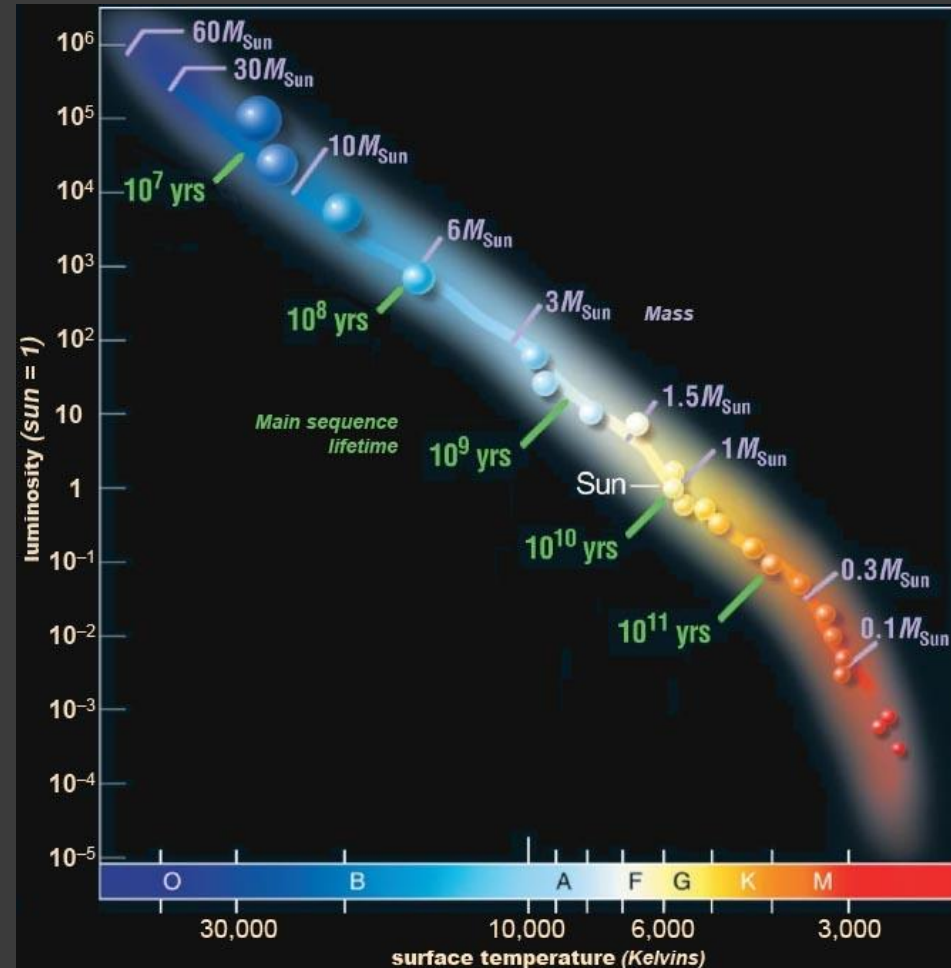
- Το χρώμα των αστέρων



• 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.





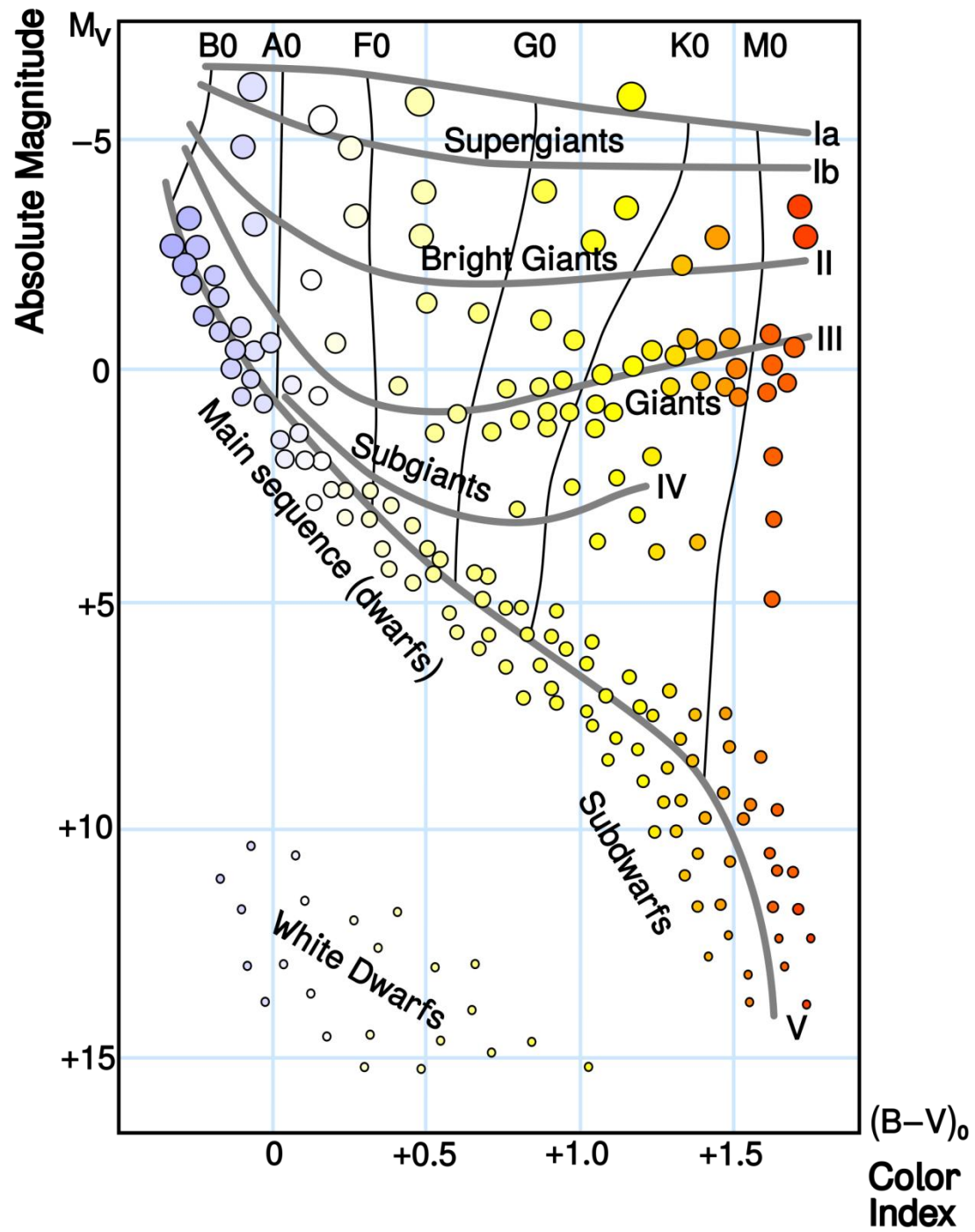
άξονας-x

φασματικός τύπος / χρώμα (B-V) / ενεργός θερμοκρασία

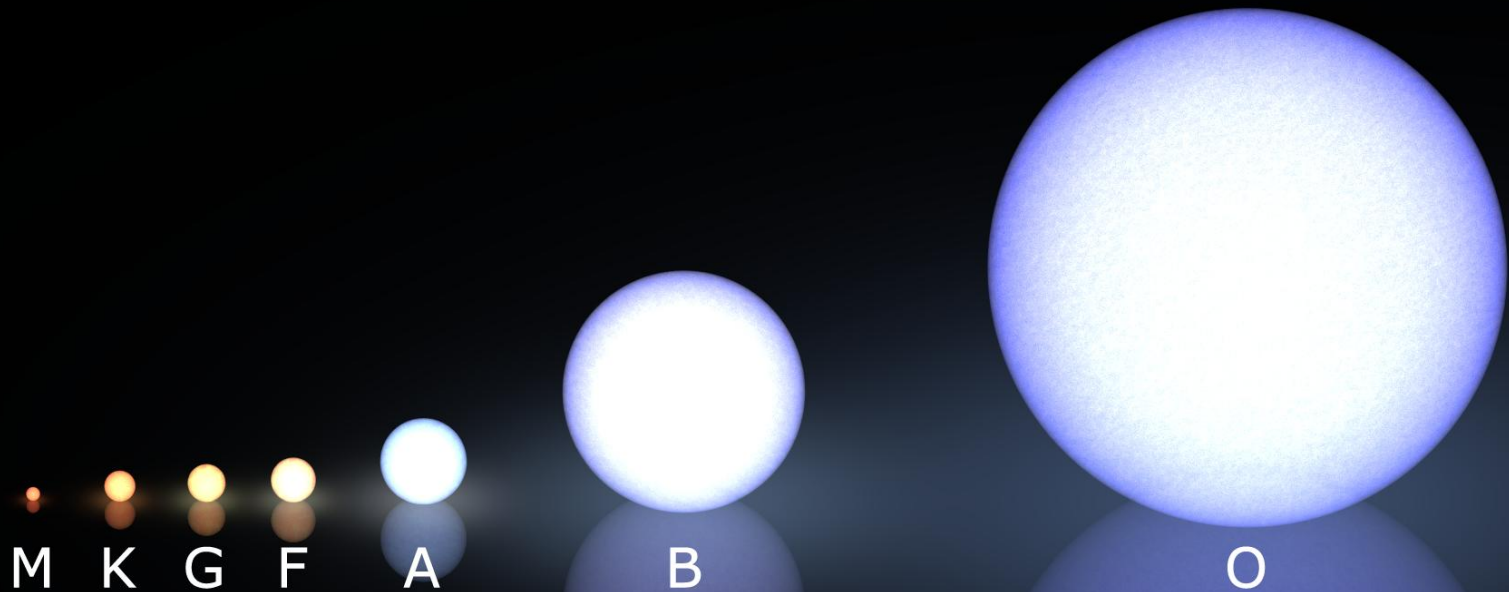
άξονας-y

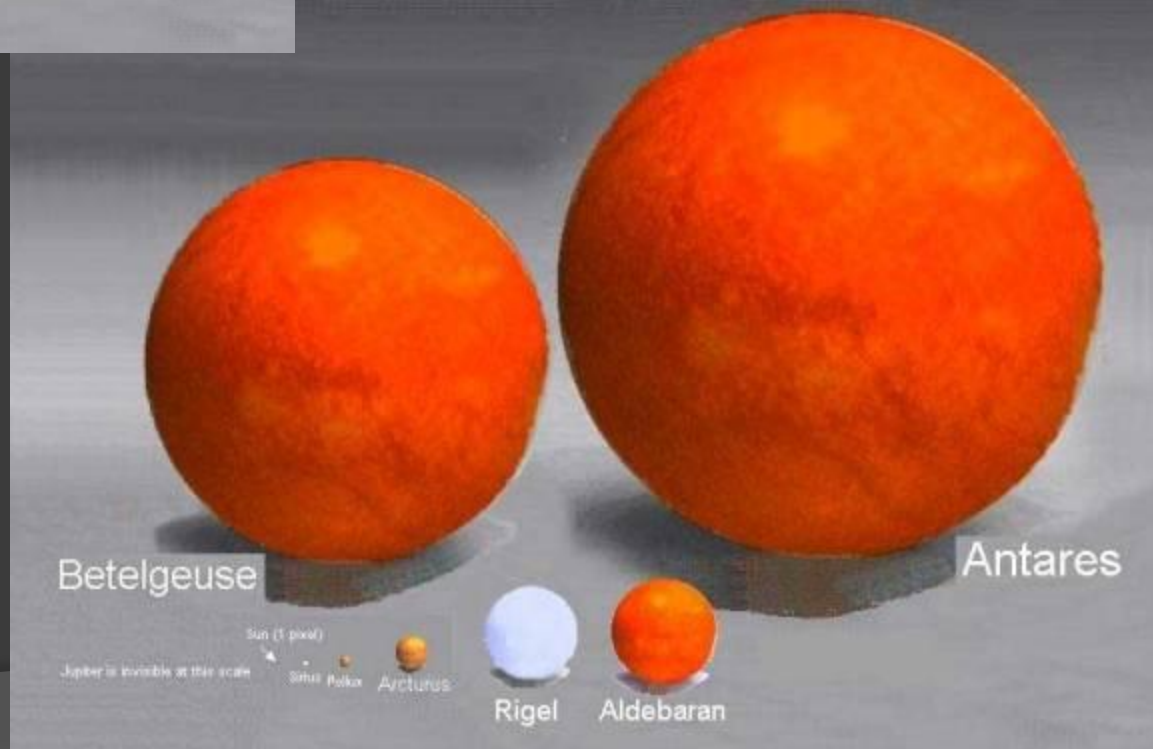
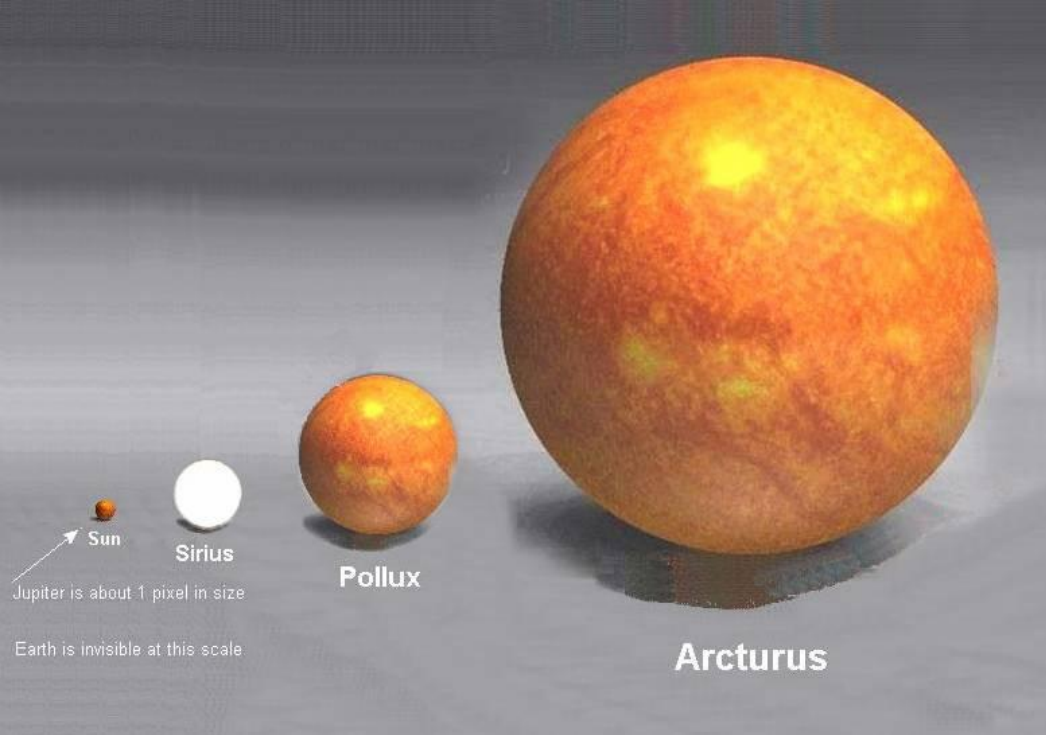
απόλυτο μέγεθος / λαμπρότητα

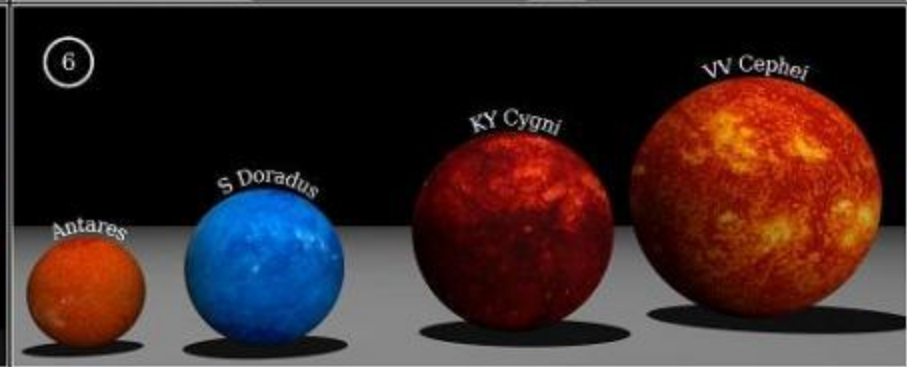
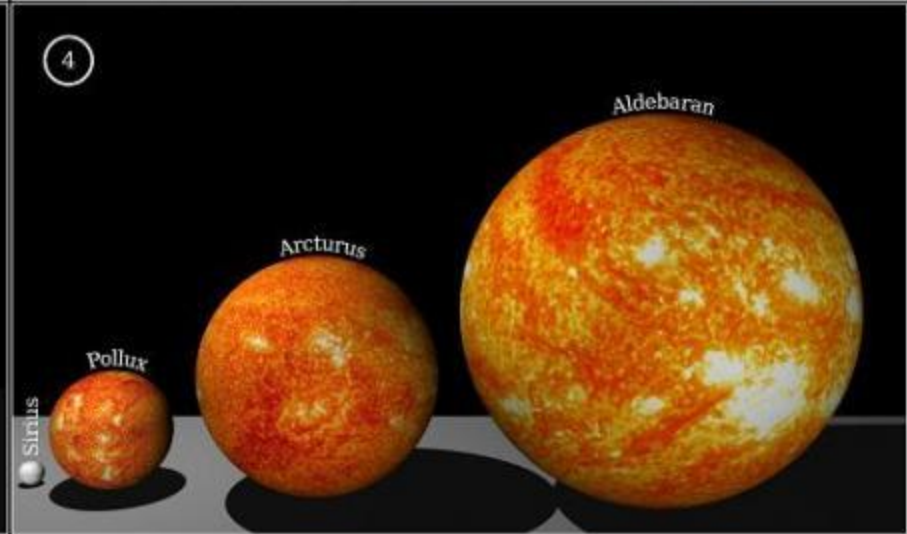
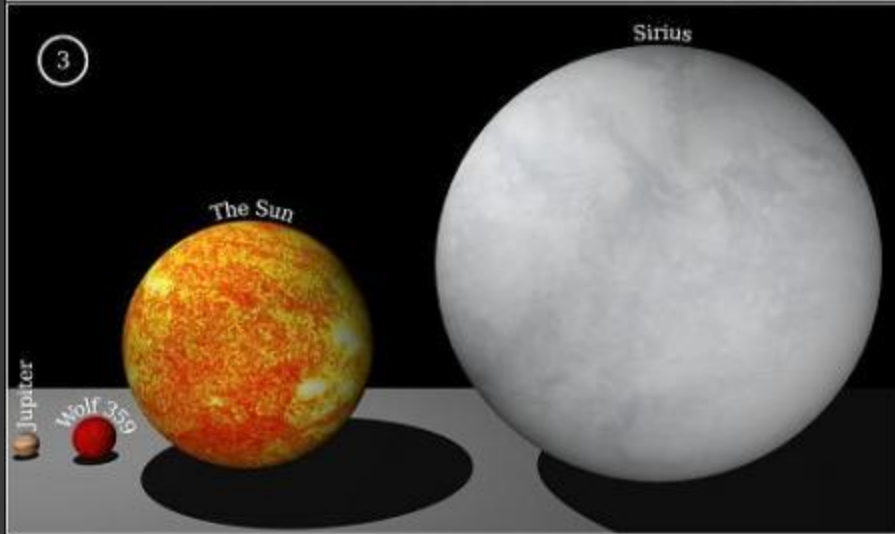
Το διάγραμμα αυτό αποκαλείται και: Color - Magnitude Diagram (CMD)



Το χρώμα και το μέγεθος των αστέρων







Ερυθρομετατόπιση (redshift)

- Η ταχύτητα απομάκρυνσης (v) ενός γαλαξία μετράται με τη χρήση του φαινομένου Doppler:

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

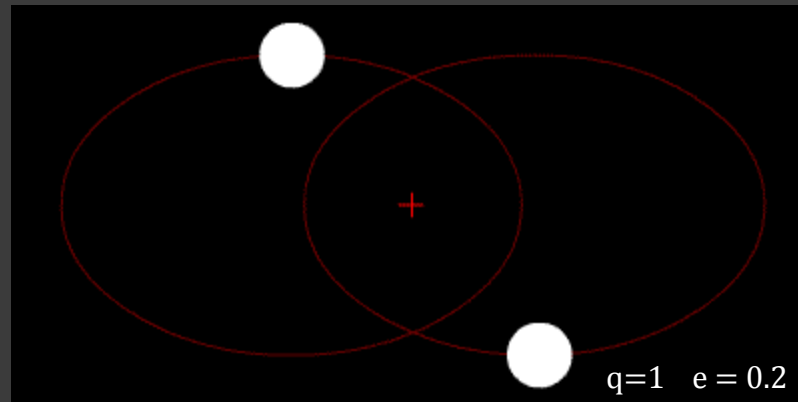
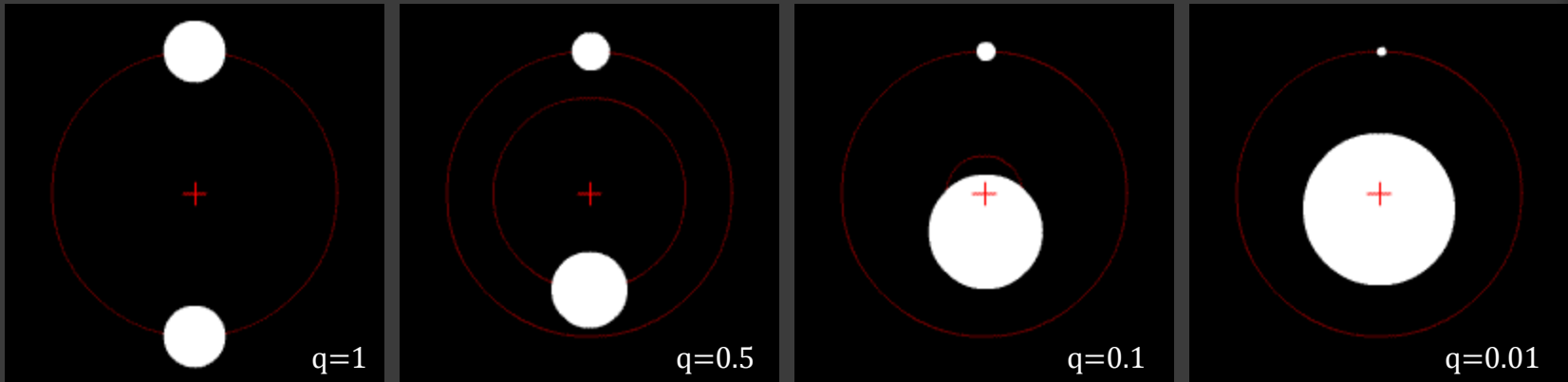
όπου z η ερυθρομετατόπιση (redshift), $\Delta\lambda$ η διαφορά του παρατηρούμενου μήκους κύματος (λ) από το μήκος κύματος λ_0 της ίδιας ακτινοβολίας στο εργαστήριο και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

- Για σχετικιστικές ταχύτητες, η ερυθρομετατόπιση σχετίζεται με την ταχύτητα μέσω του τύπου

$$z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

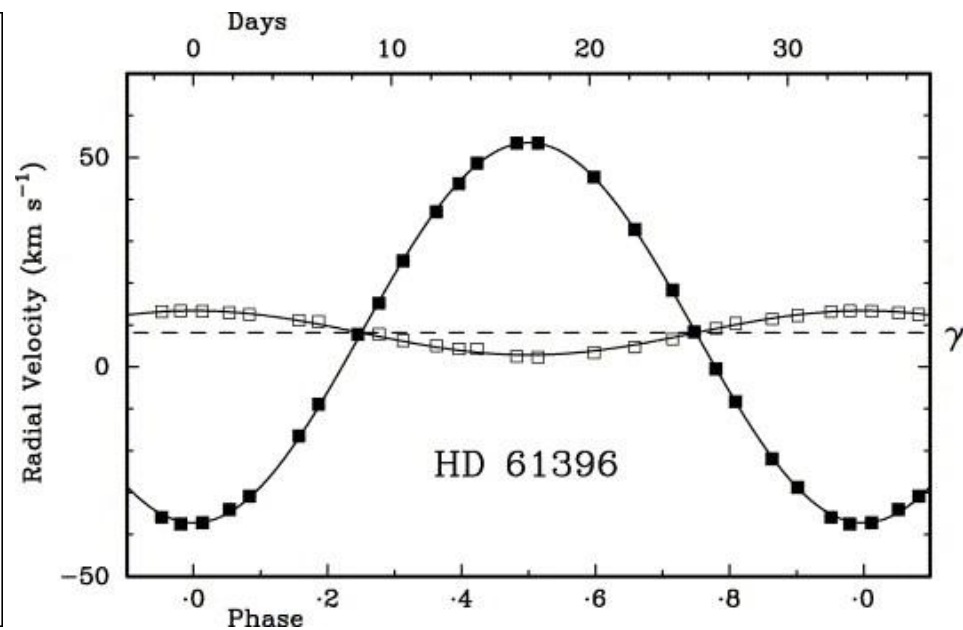
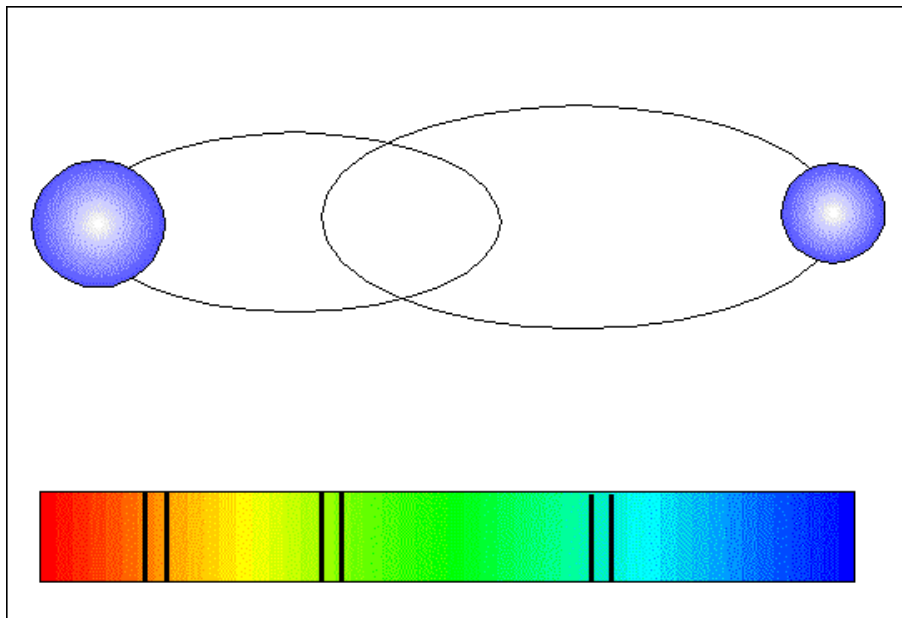
• Φάσματα διπλών αστέρων

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



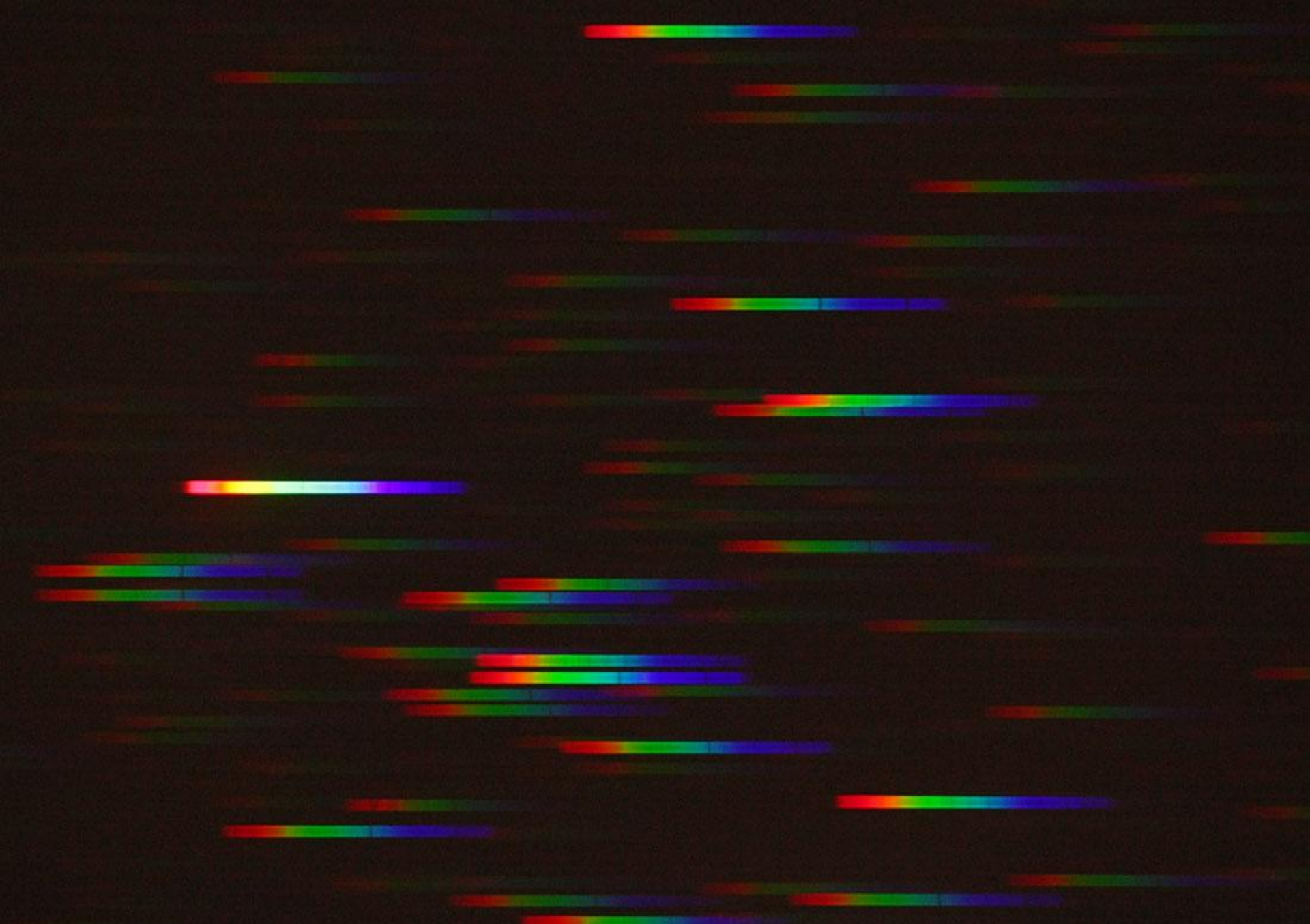
• Φάσματα διπλών αστέρων

- 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.

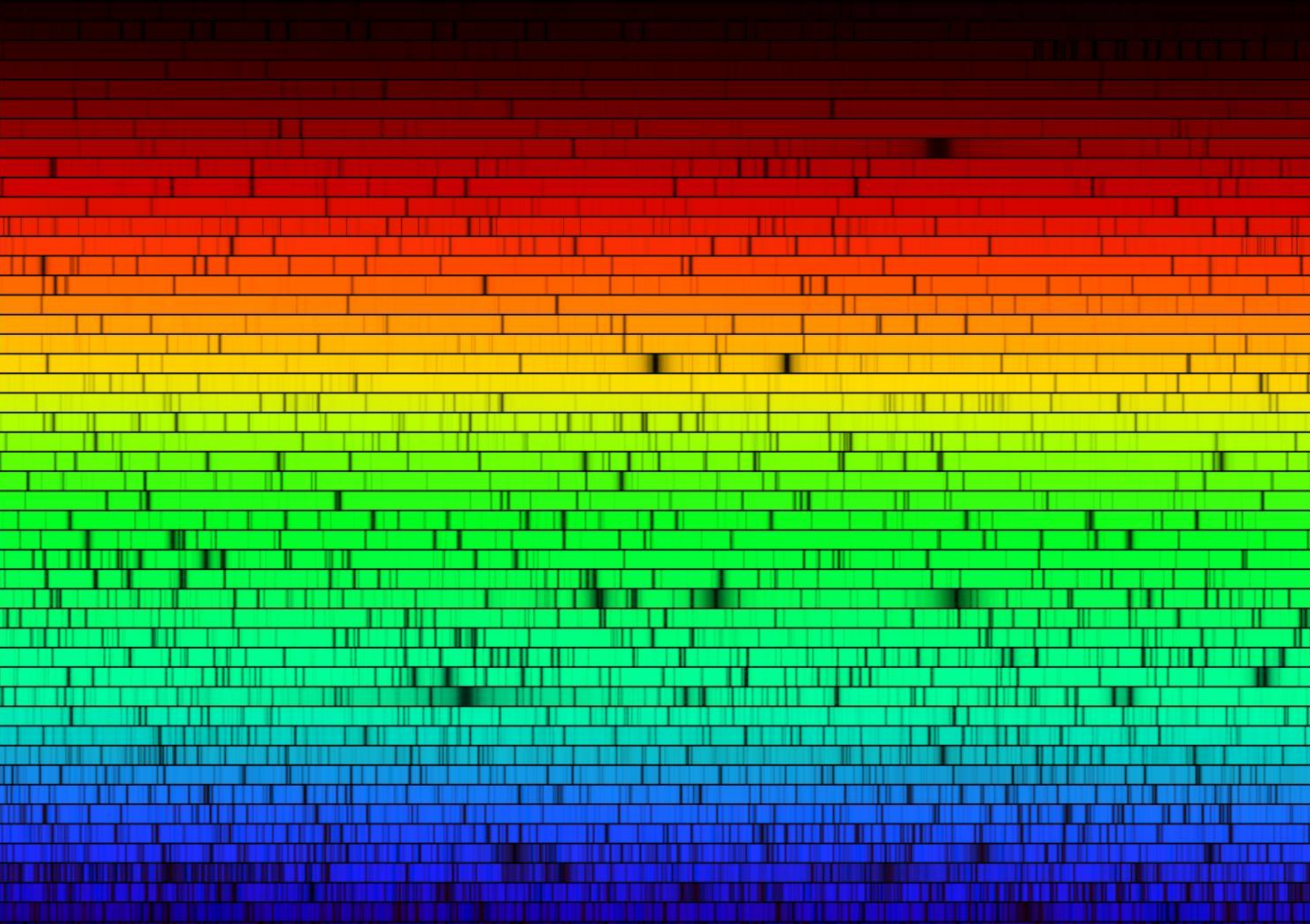


• Η σημασία της φασματοσκοπίας

- Η φασματοσκοπία είναι η πιο σημαντική μέθοδος αστρονομικής παρατήρησης.
- Χάρη στους **φασματογράφους** συλλέγουμε πολύτιμες πληροφορίες για τη χημική σύσταση των ουρανίων σωμάτων, τη σχετική προς τη Γη ταχύτητα και απόστασή τους, τη λαμπρότητα, την κατάσταση ιονισμού τους, καθώς και την κινητική κατάσταση της επιφάνειάς τους.
- Έμμεσα συλλέγουμε πληροφορίες για την ηλικία, τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και τη μάζα των αστέρων.
- Ανάλογα με τη χρήση τους χωρίζονται σε:
 - ✓ **ηλιακούς φασματογράφους**
 - ✓ **φασματοηλιογράφους**
 - ✓ **αστρικούς φασματογράφους**
 - ✓ **φασματογράφους ακτίνων-Χ**
 - ✓ **κτλ**



φάσμα με αντικειμενικό πρίσμα



φάσμα με φασματογράφο υψηλής ανάλυσης Eschelle

Γεροσταθούλειο Πανεπιστημιακό Αστεροσκοπείο, Αθήνα



DFM ENGINEERING INC.
LINDSEY COLLEGE, USA
175.9
818



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κοσμάς Γαζέας

Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής

3^{ος} όροφος, δυτική πτέρυγα, Γραφείο 18

kgaze@phys.uoa.gr

<http://www.users.uoa.gr/~kgaze>