



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Εισαγωγή στην Αστροφυσική

Ενότητα 1: Φυσική των Αστέρων

Ξενοφών Δ. Μουσάς
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής



Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

*Εισαγωγή στην Αστροφυσική
δείκτης χρώματος
Φασματική ταξινόμηση*

Ξενοφών Δ. Μουσάς,
Καθηγ. Φυσικής Διαστήματος

ΑΘΗΝΑ 2014

Εικόνα με φάσμα άστρων όλων των φασματικών τύπων
Έργο του αστεροσκοπείου NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html
http://www.noao.edu/image_gallery/images/d3/stars.jpg

Βιβλιογραφία:

- **Μάνου Δανέζη και Στράτου Θεοδοσίου, Το Σύμπαν που αγάπησα, Εκδ. Δίαυλος, Αθήνα, 2012, ISBN: 978-960-531-288-6**
- **Χαράλαμπου Βάρβογλη και Γιάννη Χ. Σειραδάκη, Εισαγωγή στη σύγχρονη αστρονομία, Εκδότης: Γαρταγάνης, Αριθμός Σελίδων: 352, 1994**
- **Σταύρου Ι. Αυγολούπη και Ιωάννη Χ. Σειραδάκη, Παρατηρησιακή Αστρονομία, Εκδότης Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, 2004, Αριθμός Σελίδων 246, ISBN 960-86810-3-0**
- **B. W. Carroll and D. A. Ostlie *An Introduction to Modern Astrophysics*, εκδ. Addison-Wesley, 1996 και 2013, ISBN-13: 978-1292022932**



Βιβλιογραφία:

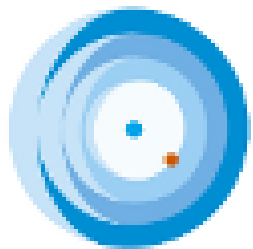
Επίσης:

- <http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/ast551/lectures/LECTURE2/lec2b.html>
- <http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/Stars.html>
- http://www.astro.washington.edu/users/anamunn/Astro101/Project1/stellar_spectroscopy_introduction.html
- <http://handprint.com/ASTRO/>
- <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/sptypes.html>

Γενικώς μπορείτε να βρίσκετε επιστημονικά άρθρα σε οποιοδήποτε αντικείμενο, αστροφυσικής, φυσικής, μαθηματικών, φιλοσοφίας ή οτιδήποτε, στην ιστοσελίδα:

- scholar.google.gr/
- Τα **άρθρα παρουσιάζονται με αξιολόγηση** και πρώτα αναφέρονται τα πιο χρησιμοποιημένα, τα κατά τεκμήριο πιο σημαντικά.





Εύδοξος
Ηλεκτρονική Υπηρεσία Ολοκληρωμένης Διαχείρισης
Συγγραμμάτων και Λοιπών Βοηθημάτων

ΒΙΒΛΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 22684958

Έκδοση: Πανεπιστημιακή Έκδοση/2012

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-288-6

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 12212

Αριθμός τόμου: Τόμος 1

Έκδοση: 3η έκδ./1999

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-062-2

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

Το σύμπαν που αγάπησα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 12213

Αριθμός τόμου: Τόμος 2

Έκδοση: 3η έκδ./1999

Συγγραφείς: Δανέζης Μάνος, Θεοδοσίου Στράτος

ISBN: 978-960-531-063-9

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

1. Φυσική των Αστέρων

Εισαγωγή στην αστροφυσική

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 42022440

Έκδοση: 1η/2014

Συγγραφείς: Αλυσσανδράκης Κ.

ISBN: 978-960-02-3058-1

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΖΗΣΗ ΑΕΒΕ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 22846310

Έκδοση: Α' ΕΚΔΟΣΗ/2012

Συγγραφείς: ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΑΡΑΤΖΟΓΛΟΥ ΦΙΛΑΡΕΤΗ

ISBN: 978-960-530-148-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας

Πανεπιστημίου Πατρών

Διαθέτης (Εκδότης): ΔΙΑΥΛΟΣ Α.Ε. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ ΤΟΜΟΣ Ι

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 280

Αριθμός τόμου: Ι

Έκδοση: 1η/2009

Συγγραφείς: SHU FRANK

ISBN: 978-960-7309-16-7

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΡΕΥΝΑΣ-

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ ΤΟΜΟΣ ΙΙ

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 282

Αριθμός τόμου: ΙΙ

Έκδοση: 1η/2009

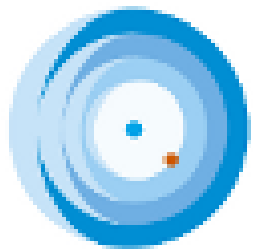
Συγγραφείς: SHU FRANK

ISBN: 978-960-7309-17-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΡΕΥΝΑΣ-

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ



Εύδοξος

Ηλεκτρονική Υπηρεσία Ολοκληρωμένης Διαχείρισης
Συγγραμμάτων και Αισιτών Βοηθημάτων

ΒΙΒΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Αστροφυσική Πλάσματος

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 50661503

Έκδοση: 2η Έκδοση/2015

Συγγραφείς: Κανάρης Τσίγκανος

ISBN: 978-960-91748-2-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΚΑΝΑΡΗΣ ΤΣΙΓΚΑΝΟΣ

Αστροφυσική Πλάσματος

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 42116553

Έκδοση: 1η Έκδοση/2015

Συγγραφείς: Κανάρης Τσίγκανος

ISBN: 978-960-91748-2-4

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΚΑΝΑΡΗΣ ΤΣΙΓΚΑΝΟΣ

Κοσμική Ακτινοβολία

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 45309

Έκδοση: 1η έκδ./2009

Συγγραφείς: Μαυρομιχαλάκη - Χριστοπούλου Ελένη

ISBN: 978-960-266-251-9

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): Σ.ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ & ΣΙΑ Ο.Ε.

Γενική Σχετικότητα

Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 6236

Έκδοση: 3/2007

Συγγραφείς: Bernard F. Schutz

ISBN: 960-7122-21-6

Τύπος: Σύγγραμμα

Διαθέτης (Εκδότης): ΤΡΑΥΛΟΣ & ΣΙΑ ΟΕ



Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες Ευχαριστίες οφείλονται στη NASA, ESA, ESO, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF, SDO, SOHO

στους Ερευνητές και λοιπούς συντελεστές των επιγείων τηλεσκοπίων και διαστημικών πειραμάτων, στους κυρίους **Πάνο Παπασπύρου** Στράτο Κουφό, Νίκο Πασχάλη, για τις εικόνες που χρησιμοποιούνται σε αυτό το μάθημα, σε αυτούς που μας έδωσαν μετρήσεις ή συμβουλές, στην Wikipedia για πολλές πολύτιμες εικόνες που προσφέρονται χωρίς δικαιώματα χρήσης και συνεπώς είναι πολύτιμες σε κάθε δάσκαλο.

Ενέργεια φωτονίου

$$E = hf = hc/\lambda.$$



Fig. 1. (1st type: Sirius, Vega, Altair, Regulus, etc.)



Fig. 2. (2nd type: Sun, Pollux, Arcturus, Procyon, etc.)



Fig. 3. (3rd type: α Hercules, β Pegasus, α of Orion, Antares, etc.)

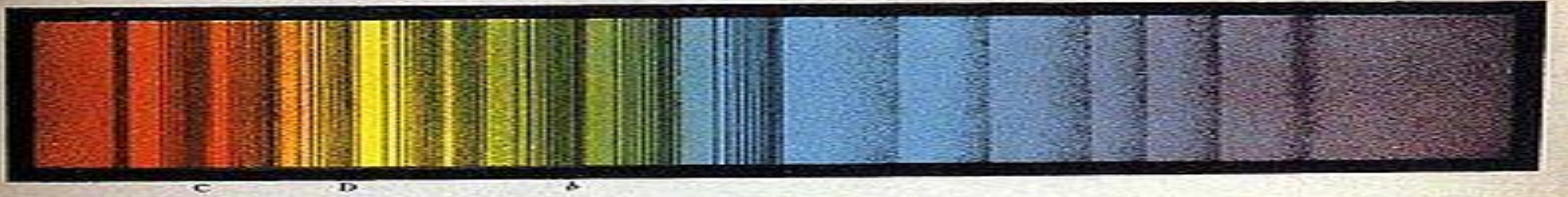
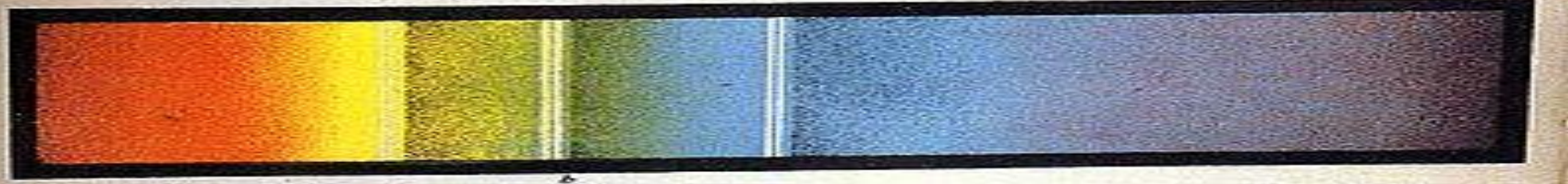
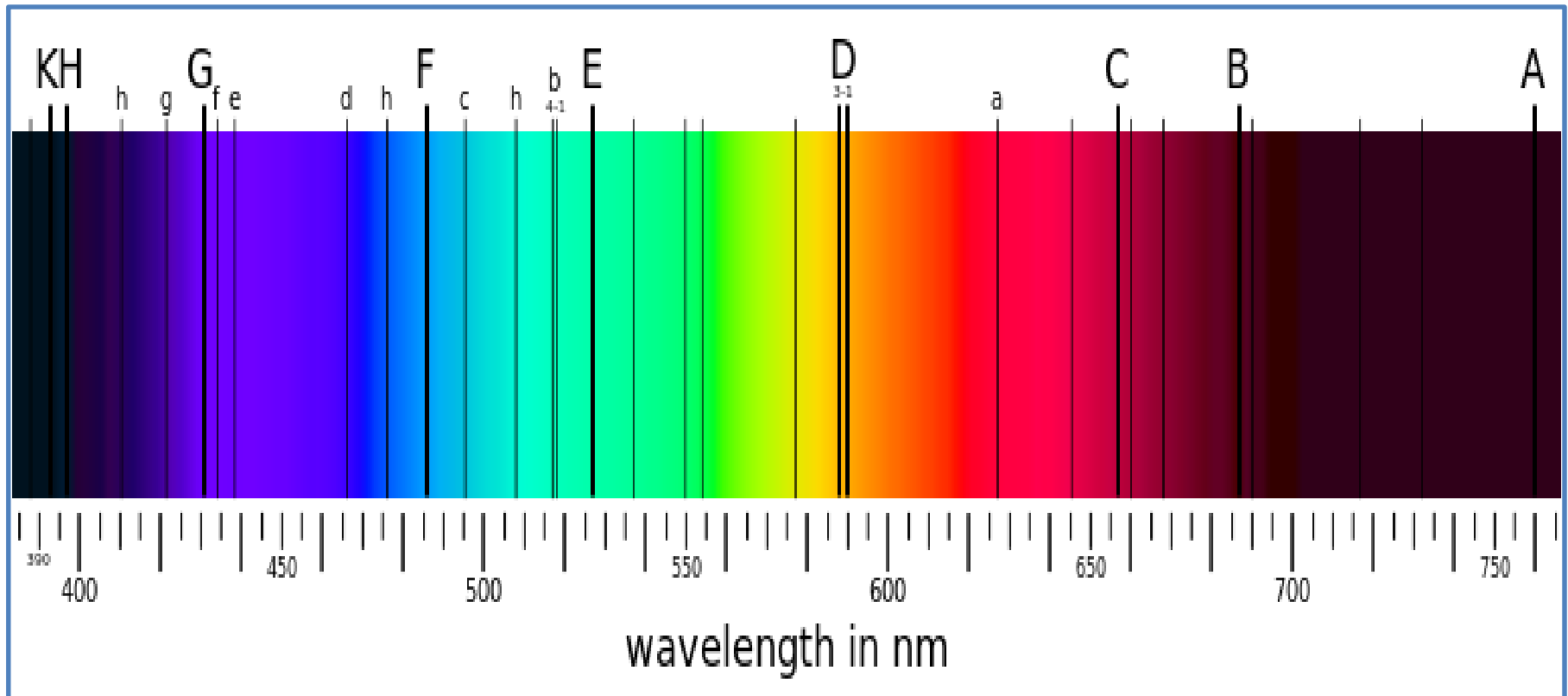


Fig. 4. (4th type: 15c of Schjellerup.)



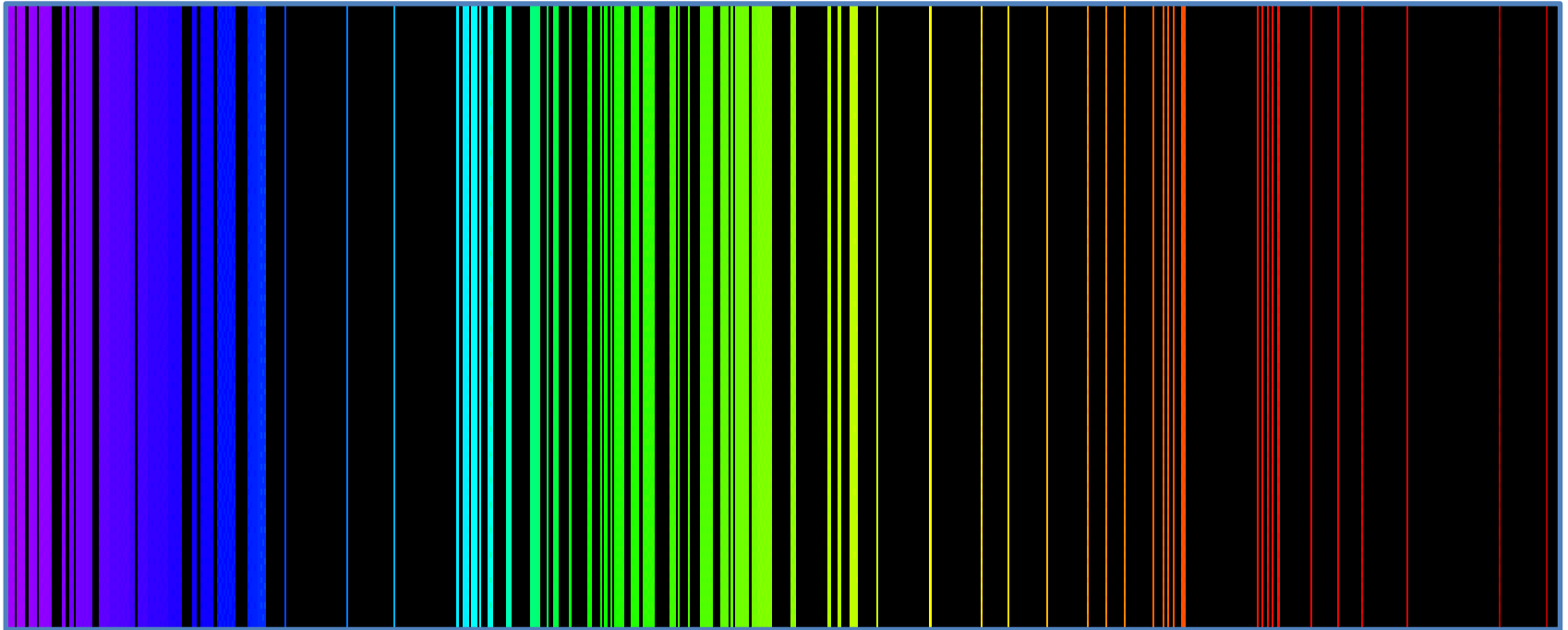
Αστρικά φάσματα του Secchi

Φάσμα ηλίου, γραμμές Fraunhofer



Γραμμές εκπομπής σιδήρου,

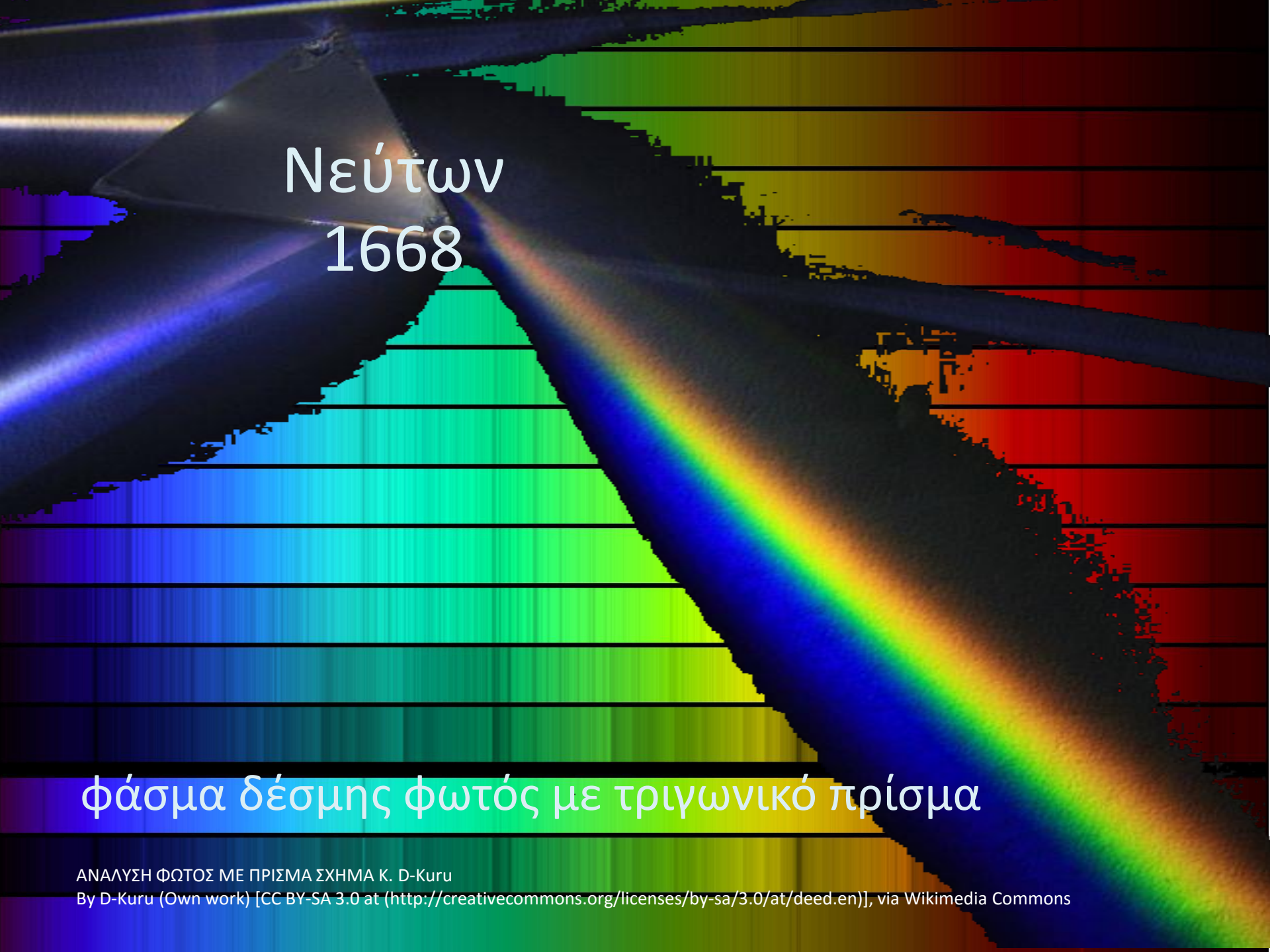
σχήμα του κ. Artem Karimov



Φασματοσκοπία

A vibrant rainbow arches across a cloudy sky. At the top of the image, there is a horizontal bar showing a color spectrum from green on the left to red on the right, with yellow and orange in between. The rainbow's colors correspond to this spectrum.

- Αρχαίοι έλληνες:
- Το ουράνιο τόξο δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης του ηλιακού φωτός με τις σταγόνες της βροχής

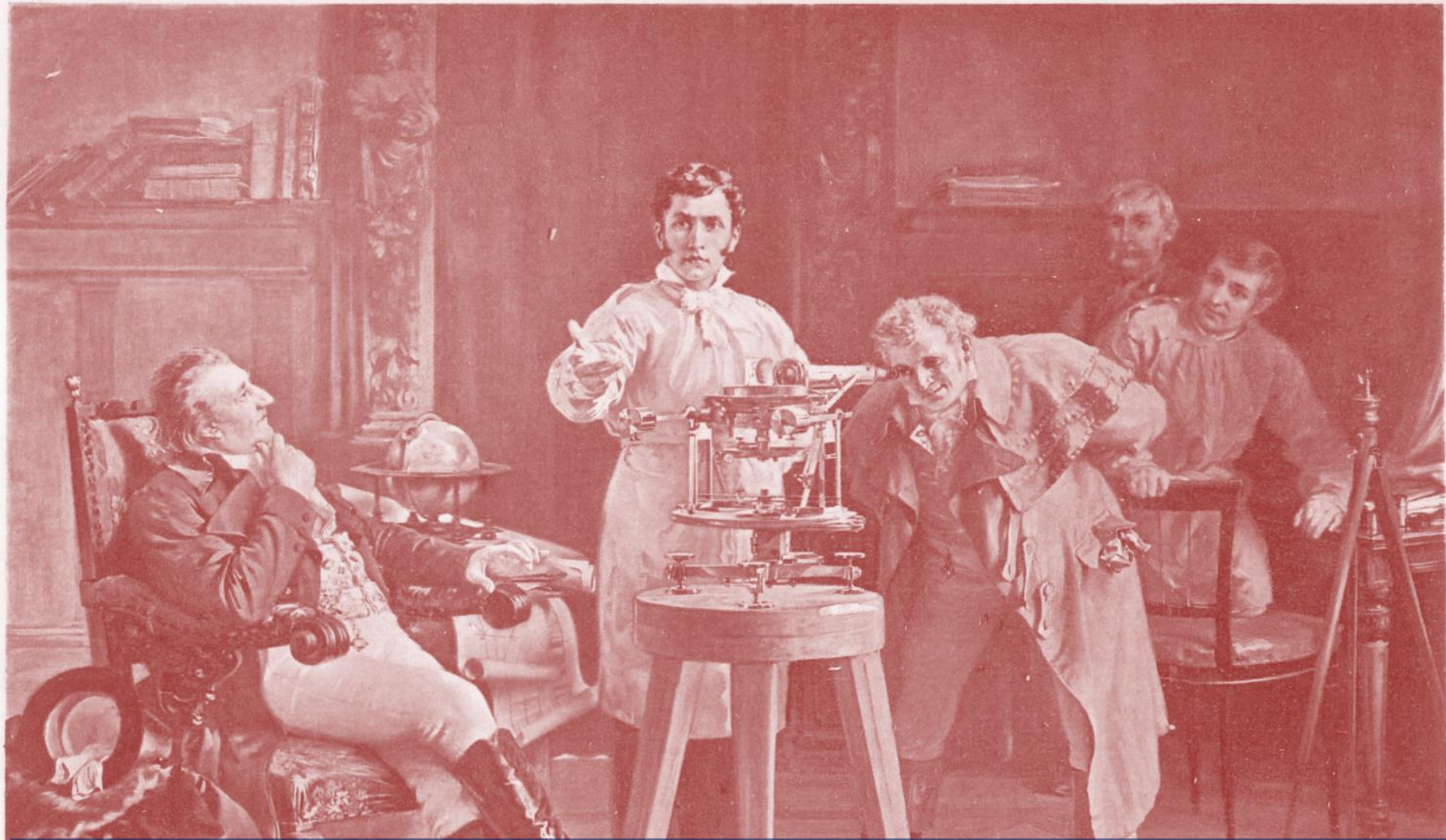


Νεύτων
1668

φάσμα δέσμης φωτός με τριγωνικό πρίσμα

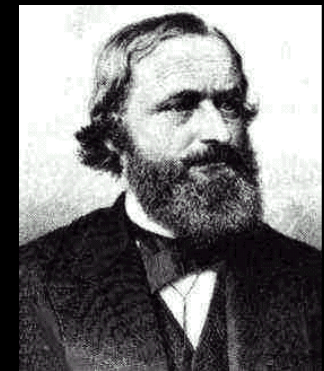
ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕ ΠΡΙΣΜΑ ΣΧΗΜΑ Κ. D-Kuru

By D-Kuru (Own work) [CC BY-SA 3.0 at (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/at/deed.en>)], via Wikimedia Commons



Ο Joseph von Fraunhofer δείχνει την λειτουργία φασματοσκοπίου. Από εικόνα του Richard Wimmer, από το βιβλίο του Richard Wimmer - "Essays in astronomy" - D. Appleton & company, 1900 (LCCN 00004435)

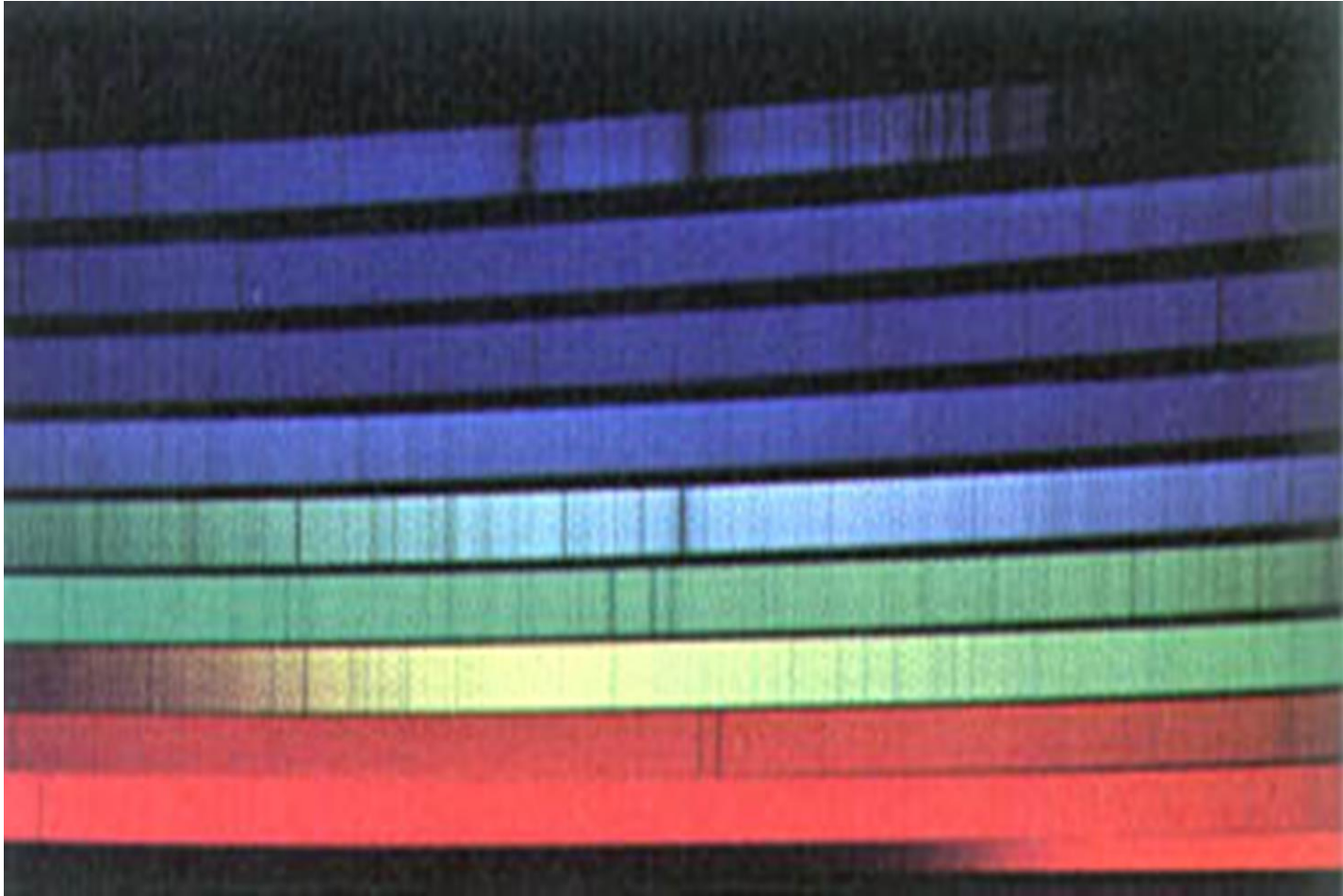
χημική ανάλυση από μακριά Fraunhofer (τηλεσκόπιο, φασματοσκόπιο, λεπτή σχισμή)



Bunsen, Kirchhoff

Φάσμα του ηλίου: όλα τα χημικά στοιχεία που έχουμε
στη Γη, 1860

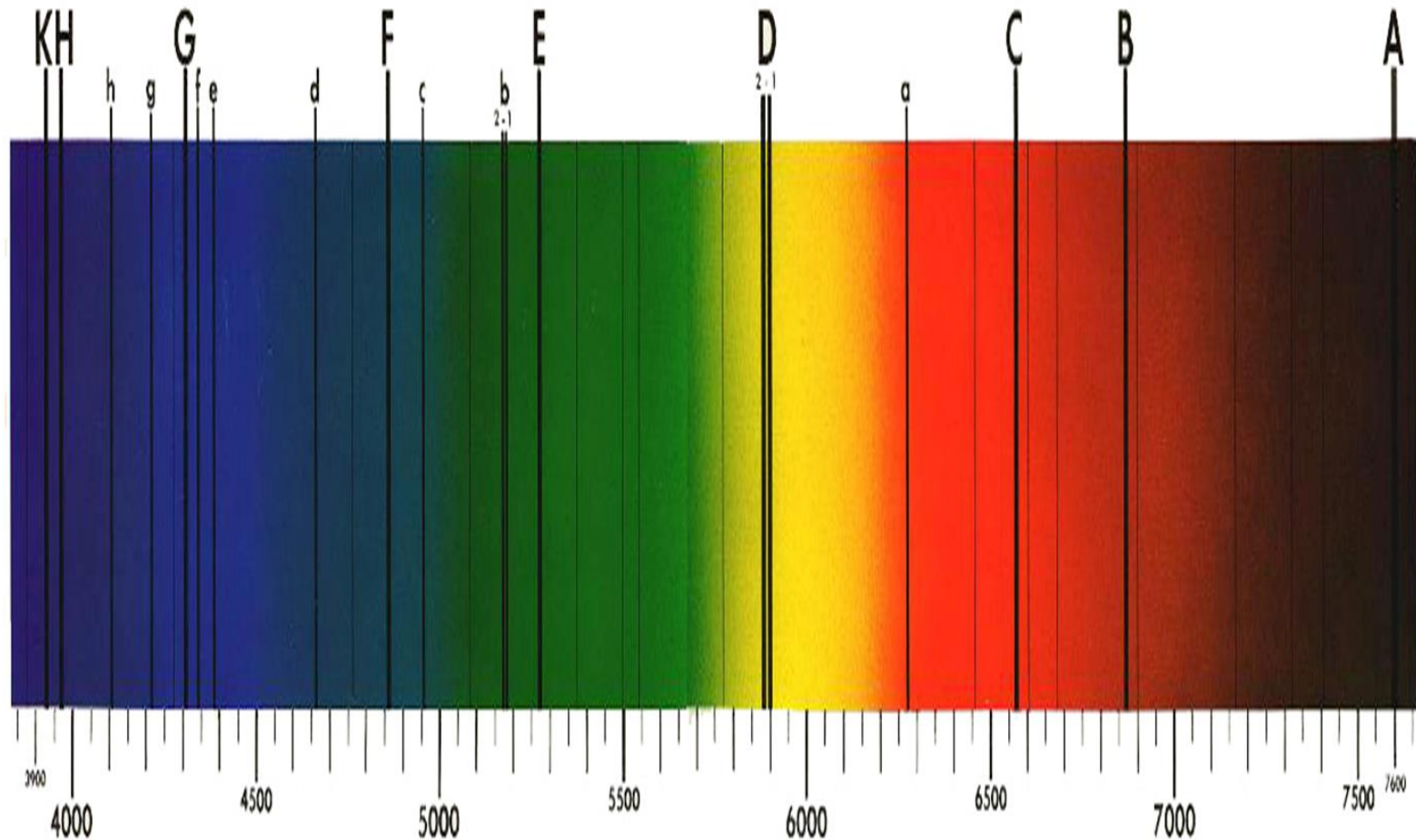
Φάσμα του ηλίου: όλα τα χημικά στοιχεία που έχουμε στη Γη, NASA



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/FraunhoferLinesDiagram.jpg>



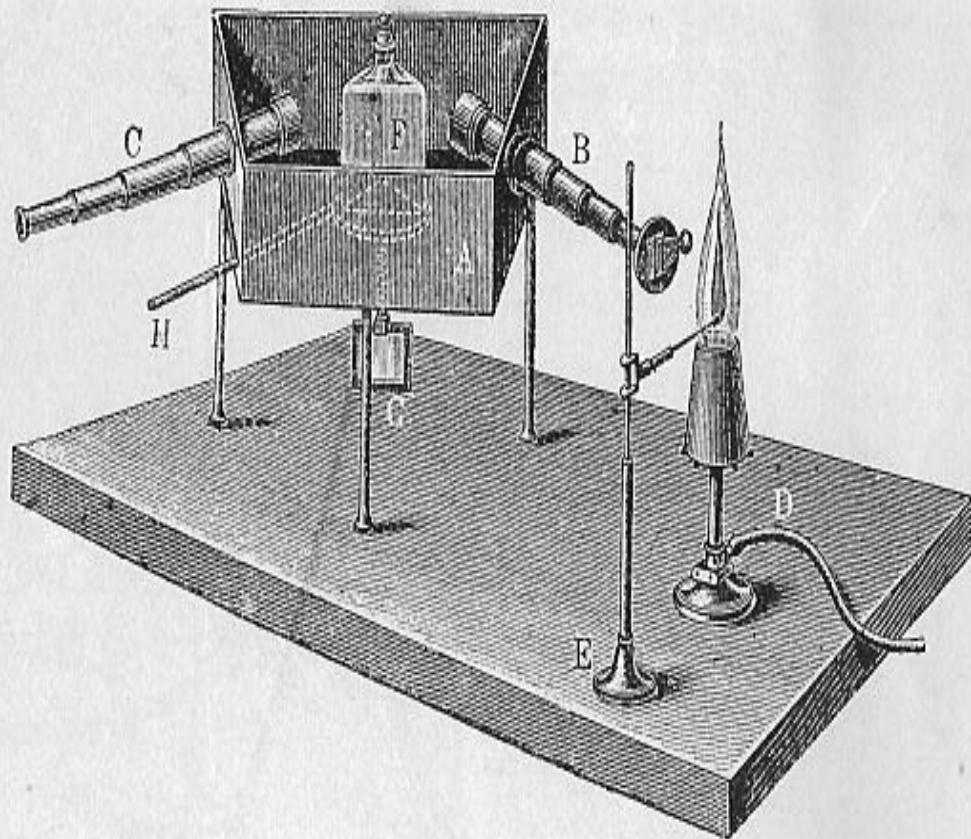
Φάσμα του ηλίου: όλα τα χημικά στοιχεία που έχουμε στη Γη, Fraunhofer



<http://www.obs-hp.fr/lumiere/page5.html>

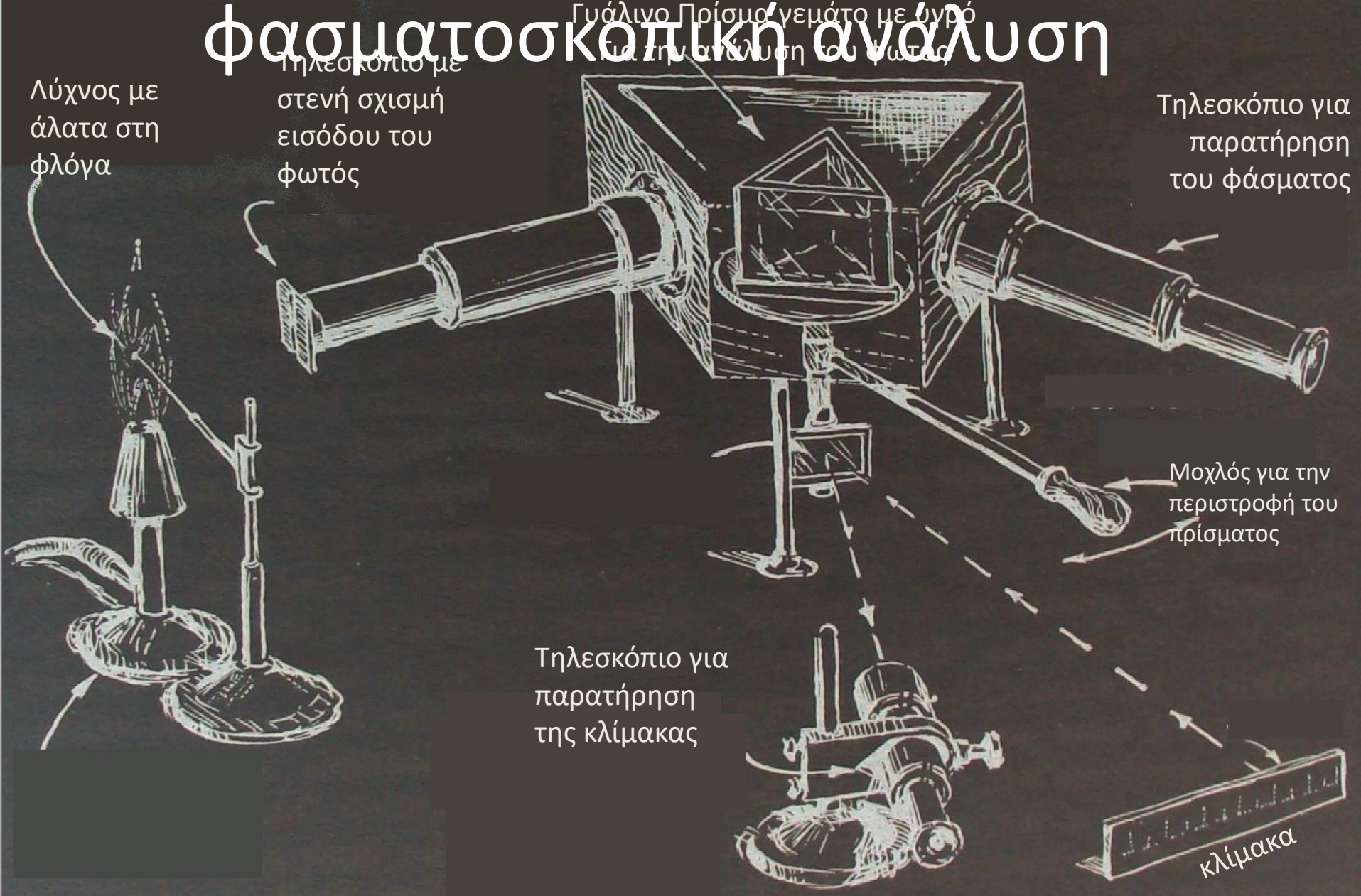


Gustav Kirchhoff και Robert Bunsen



Πείραμα του Bunsen για

φασματοσκοπική ανάλυση



- 1802, William Wollaston φάσματα ηλίου έχουν σκοτεινές γραμμές
- 1814 Joseph Fraunhofer καλύτερα φάσματα (600 σκοτεινές γραμμές)
- 1864, Sir William Huggins ταυτίζει τις σκοτεινές γραμμές αστρικών φασμάτων με γραμμές εκπομπής χημικών στοιχείων



Νόμοι Kirchoff

- Anders Jonas Angstrom, φυσικός, Σουηδία, 1853 θεωρίες για φάσματα αερίων
- ηλεκτρικός σπινθήρας παρέχει δύο επάλληλα φάσματα.
- Αέριο πυρακτωμένο εκπέμπει φωτεινές ακτίνες στα μήκη κύματος που απορροφά
- θεμελιώδης αρχή της φασματικής ανάλυσης.

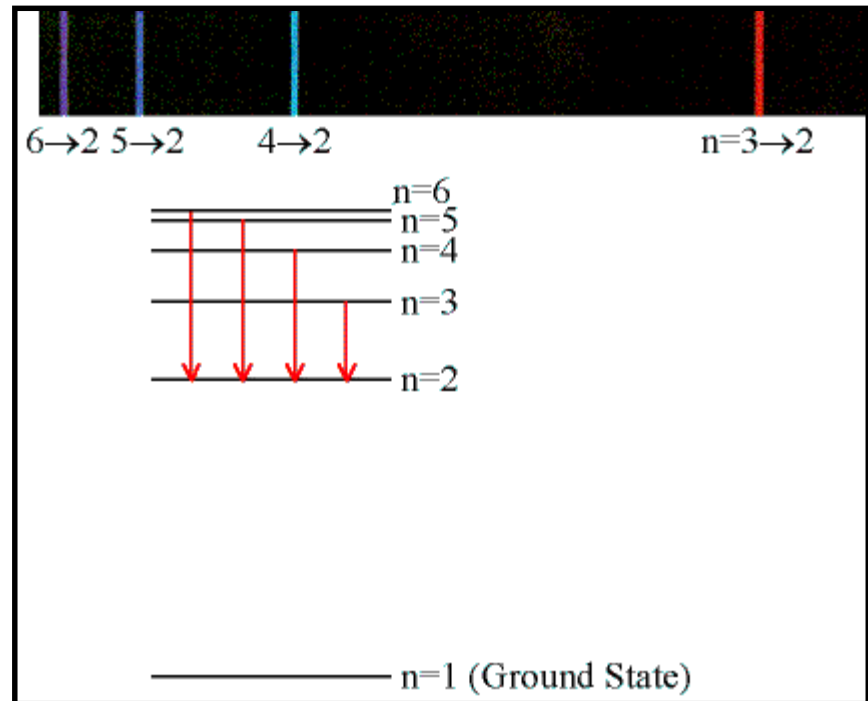
Gustav Kirchhoff, Γερμανός φυσικός και χημικός Robert Bunsen, 1860, φάσματα των οκτώ μετάλλων και προσδιορίζονται τα μέταλλα αυτά σε φυσικά στοιχεία.

- τρεις θεμελιώδεις Νόμοι Kirchoff,



Johann Balmer, 1885

- Johann Balmer, 1885, τέσσερις ορατές οι γραμμές του υδρογόνου μέρος μιας σειράς που θα μπορούσε να εκφράζονται σε ακέραιους αριθμούς.



Johann Balmer, 1885

- Johann Balmer, 1885, τέσσερις ορατές οι γραμμές του υδρογόνου μέρος μιας σειράς που θα μπορούσε να εκφράζονται σε ακέραιους αριθμούς.
- $hf = -13.6 \text{ eV}(1/n_i^2 - 1/2^2)$
- $= 13.6 \text{ eV}(1/4 - 1/n_i^2)$.
- Τύπος Rydberg
- $1/\lambda = (13.6 \text{ eV}/hc)(1/4 - 1/n_i^2) = \mathbf{R}(1/4 - 1/n_i^2)$.



Rydberg

- Τύπος Rydberg περιγράφει ακόμη σειρές των γραμμών εκπομπής και απορρόφησης ατόμων.
- $1/\lambda = (13.6 \text{ eV}/hc)(1/4 - 1/n_i^2) = R(1/4 - 1/n_i^2)$.





Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

δείκτης χρώματος

Ξενοφών Δ. Μουσάς,
Καθηγ. Φυσικής Διαστήματος

ΑΘΗΝΑ 2014

Εικόνα με φάσμα άστρων όλων των φασματικών τύπων
Έργο του αστεροσκοπείου NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html

http://www.noao.edu/image_gallery/images/d3/stars.jpg

Μέγεθος σε περιοχή του φάσματος

$$m_i = \text{σταθ} - \kappa \log \left\{ \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} F(\lambda) d\lambda \right\}$$



Δείκτης χρώματος Δεγκλις χβηατος

$$CI = B - V$$

$$CI = m_B - m_V$$

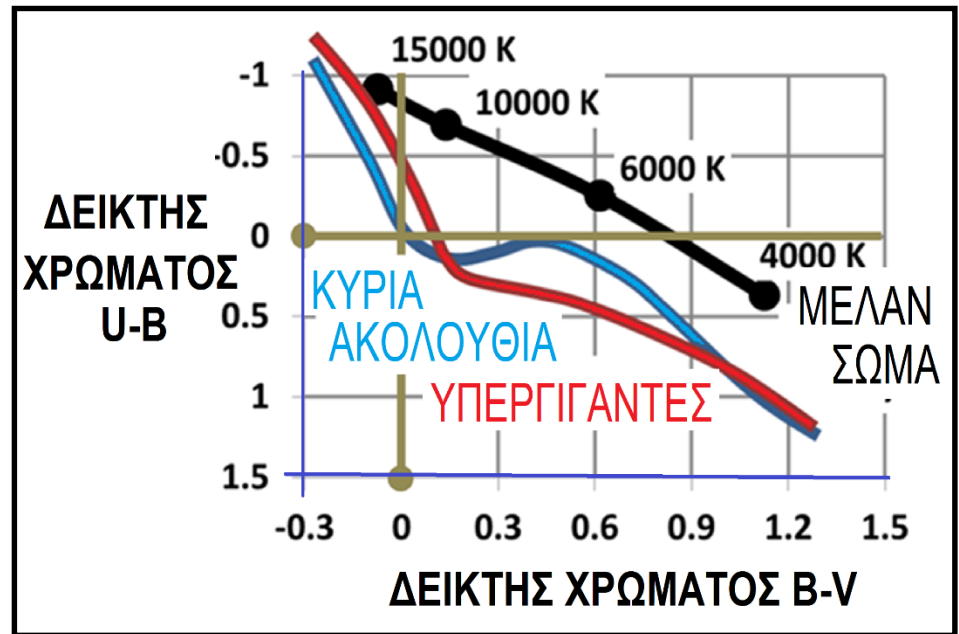


Ενδεικτικοί δείκτες λαμπρότητας άστρων κύριας ακολουθίας διαφόρων τάξεων (και θερμοκρασιών)

Τάξη	B-V	U-B	V-R	R-I	$T_{\text{ενεργος}}$ (K)
O5V	-0.33	-1.19	-0.15	-0.32	42,000
B0V	-0.30	-1.08	-0.13	-0.29	30,000
A0V	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	9,790
F0V	0.30	0.03	0.30	0.17	7,300
G0V	0.58	0.06	0.50	0.31	5,940
K0V	0.81	0.45	0.64	0.42	5,150
M0V	1.40	1.22	1.28	0.91	3,840



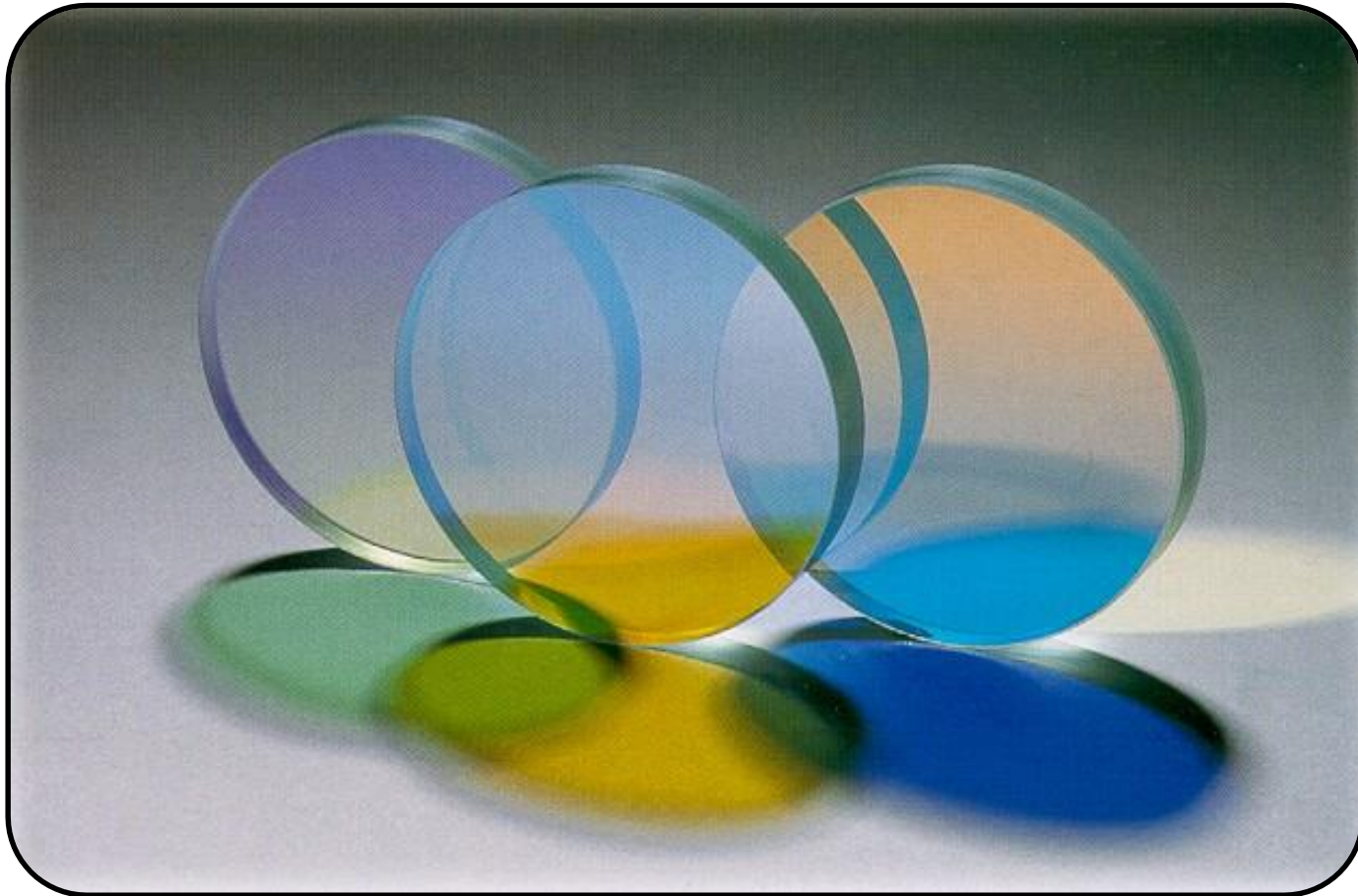
οι δείκτες χρώματος B-V συναρτήσει U-B άστρων κύριας ακολουθίας και υπεργιγάντων και του μέλανος σώματος με διάφορες ενεργές θερμοκρασίες. Βασισμένο σε σχήμα του κ. Brews Ohare.



Wkimpedia,
[commons.wikimedia.org/
wiki/File:Effective_temper
ature_and_color_index.pn
g](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Effective_temperature_and_color_index.png)

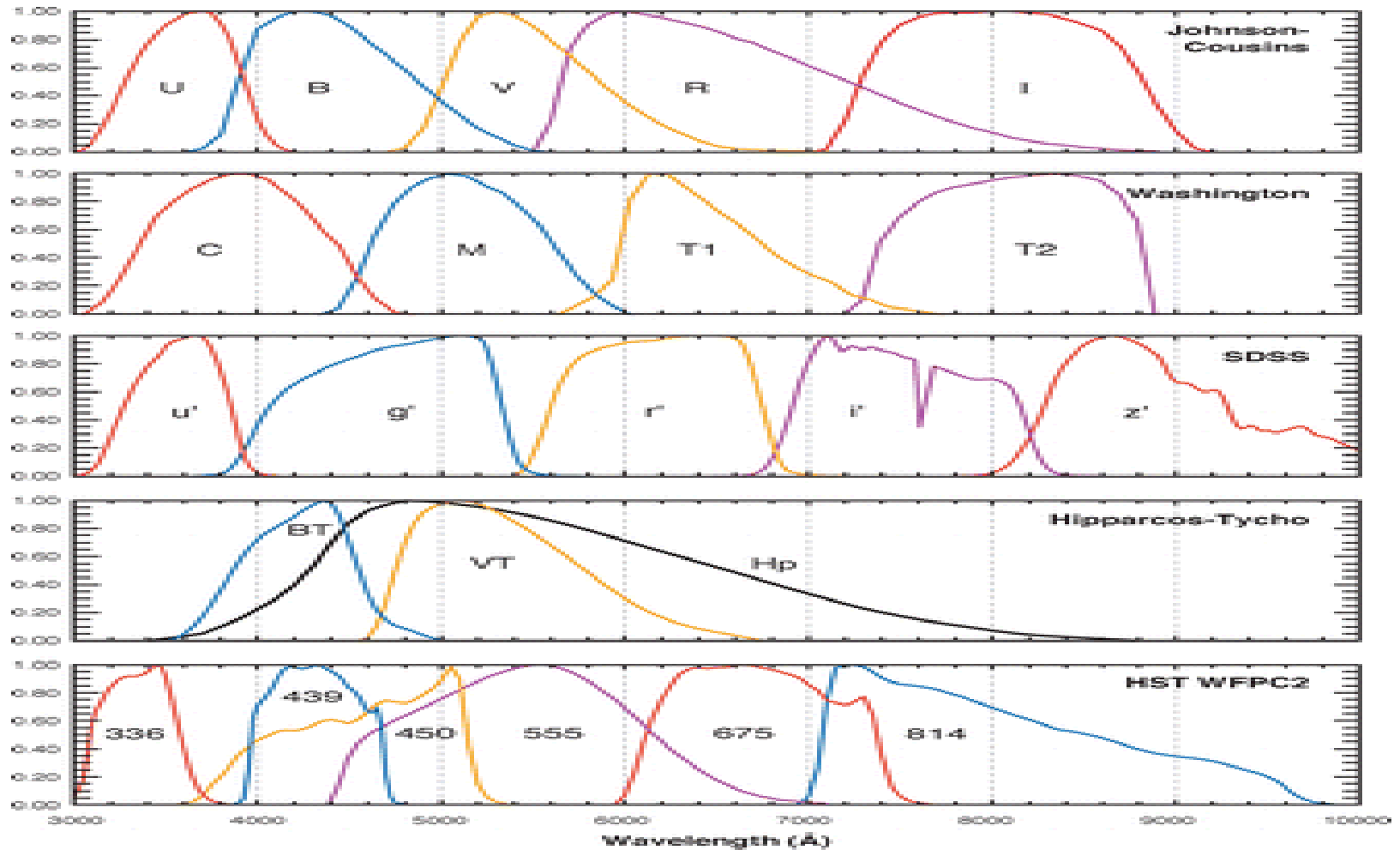


ΗΘΜΟΙ (ΦΙΛΤΡΑ)



Διάφορα φίλτρα, wiki Dichroics.jpg <http://technology.jpl.nasa.gov/gallery/index.cfm>





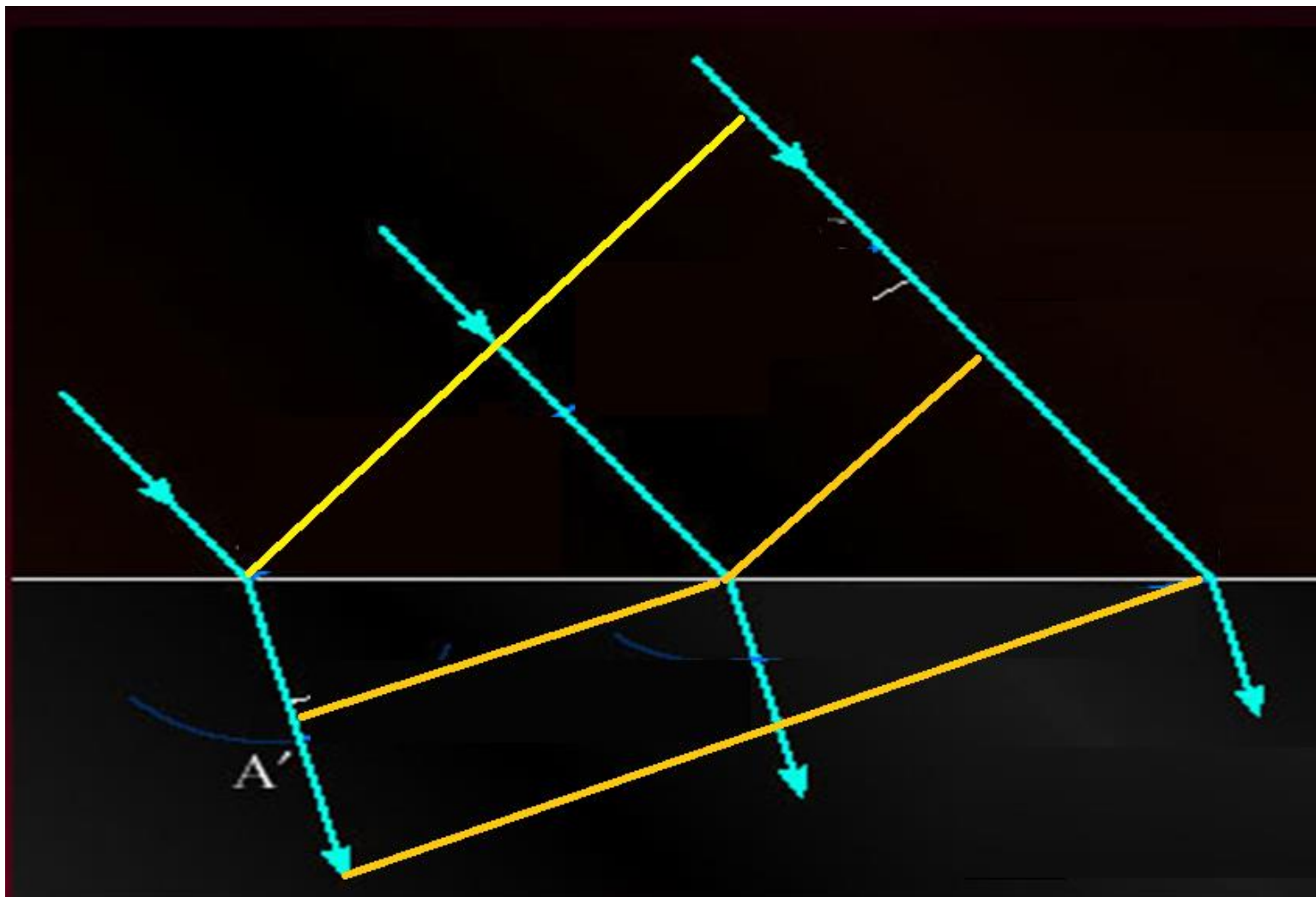
Bessell, M.S., 2005
Annua. Rev. Astron. Astrophys. 43: 293–336

Johnson, H. L.; Morgan, W. W. (1953), *Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas*, *The Astrophysical Journal*, vol. 117, pp. 313-352



Καλύτερα Φάσματα





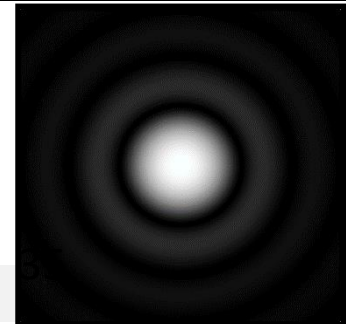
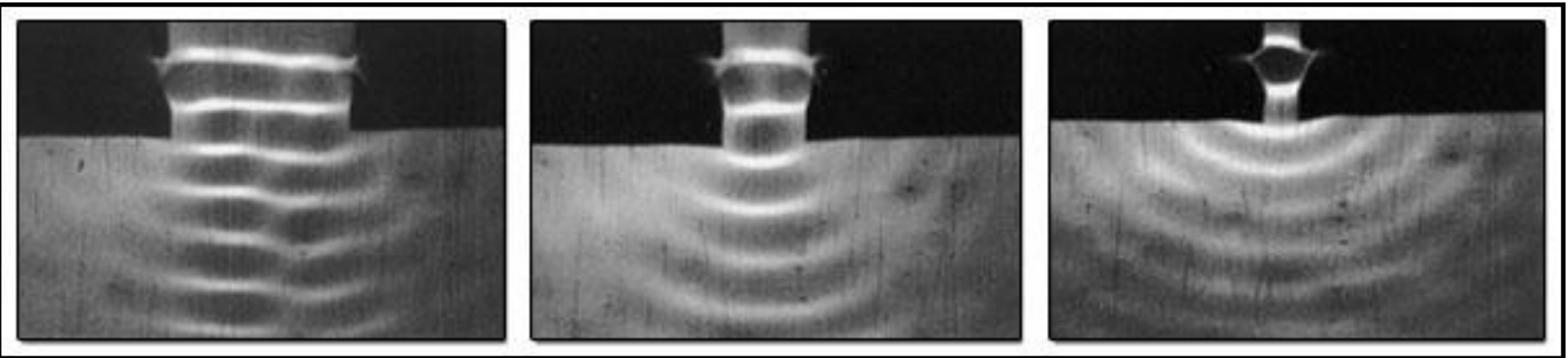
Καλύτερα Φάσματα με φράγματα

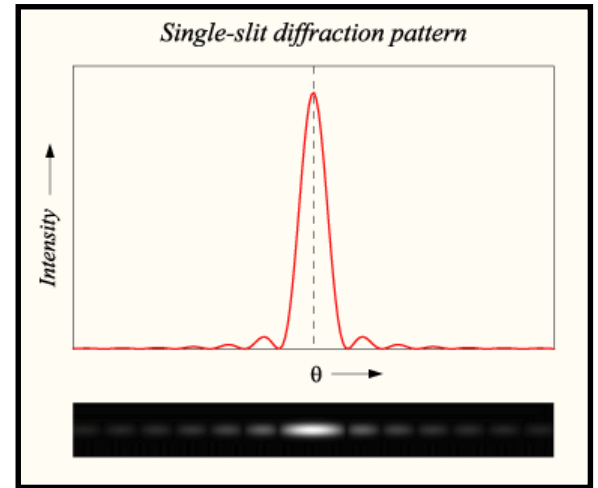
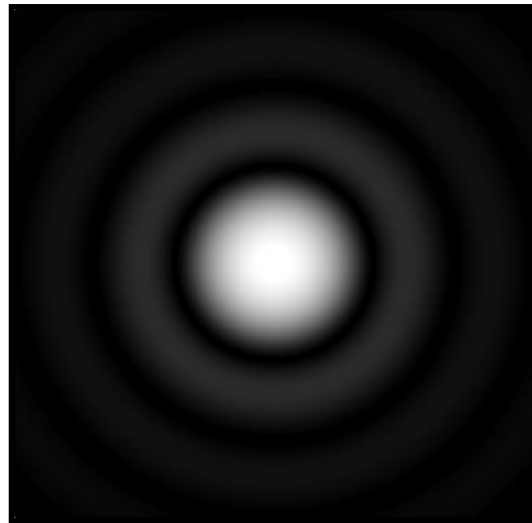
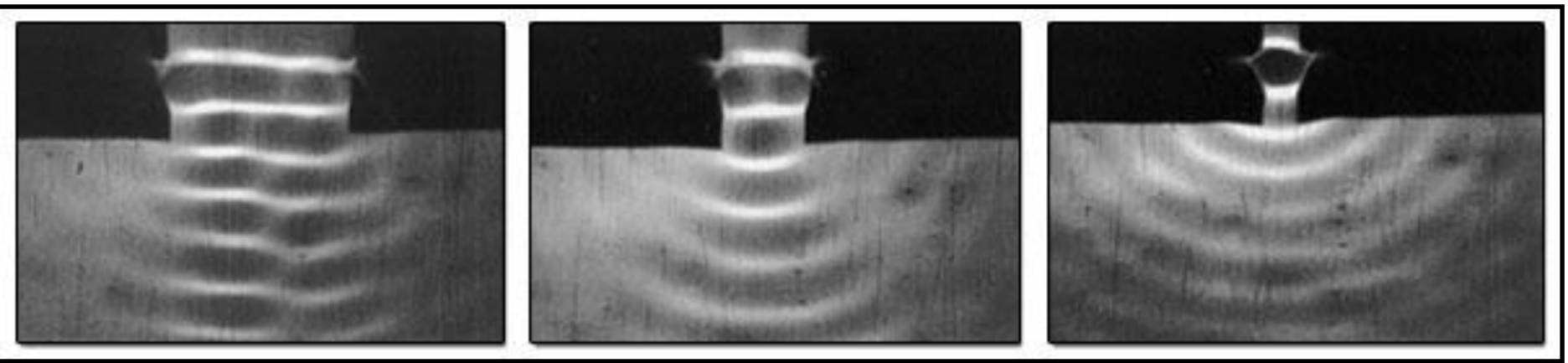


Περίθλαση η σχισμή ως πηγή

Ιταλός φυσικός Φραντσέσκο Γκριμάλντι 1665

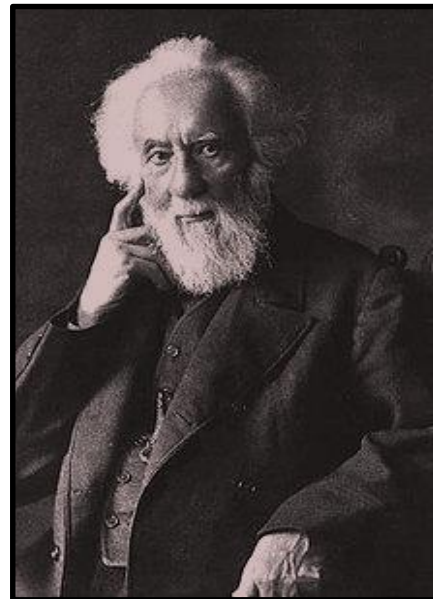
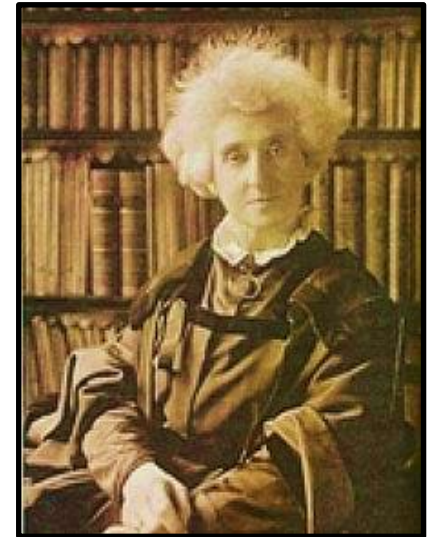
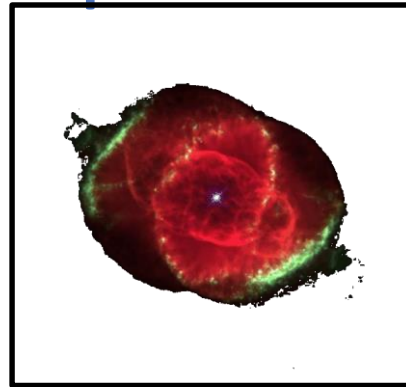
Φως μέσα από λεπτή σχισμή





William Huggins και σύζυγος του Μαργαρίτα

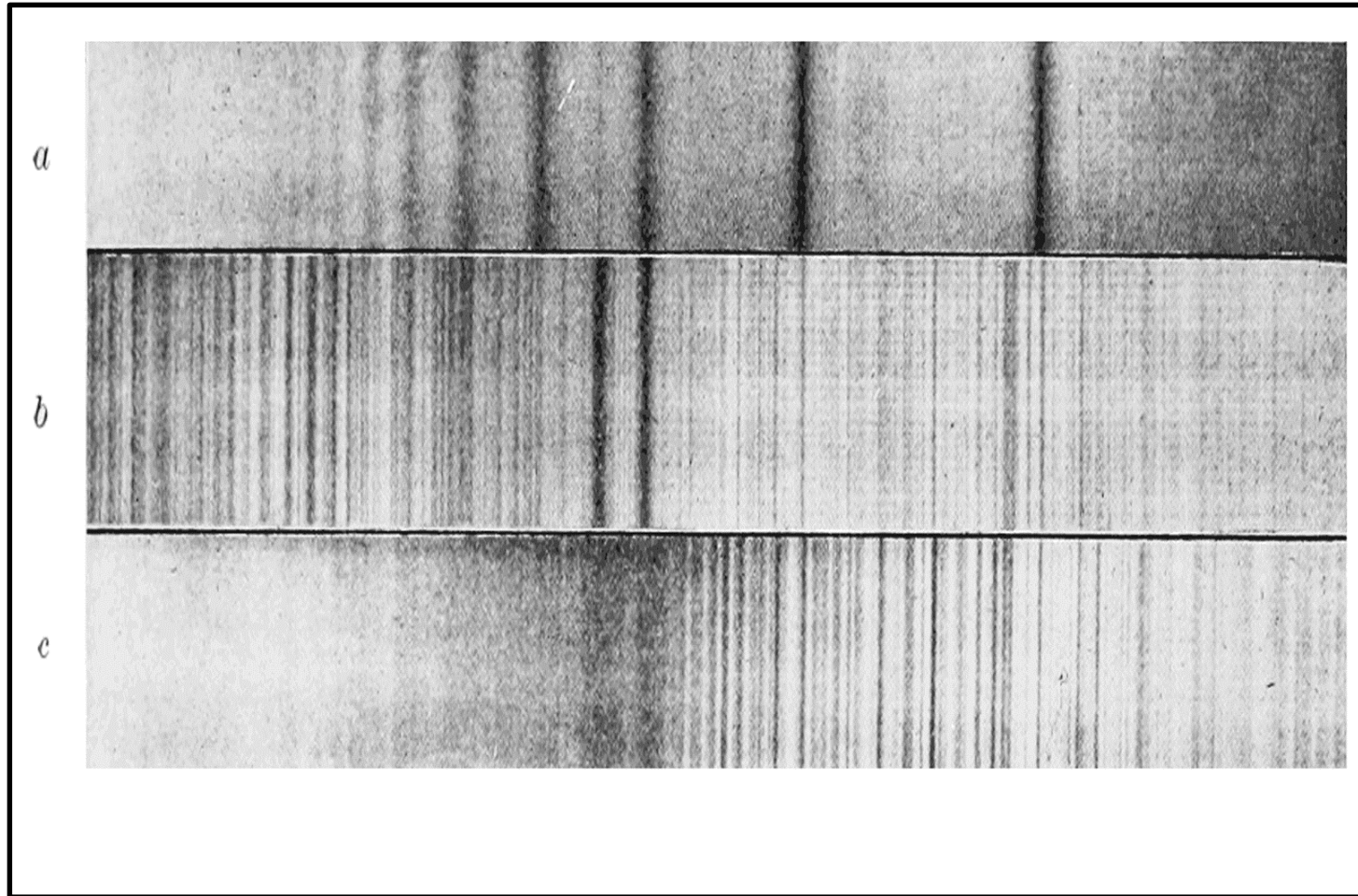
- William Huggins και σύζυγος Μαργαρίτα, 1860-1870, χρησιμοποιούν φασματοσκοπία σε αστέρια και βρίσκουν τα ίδια χημικά στοιχεία που βρίσκονται στη γη.
- μετατόπιση Doppler στο φάσμα του Σειρίου, 1868, υπολογίζει ακτινική ταχύτητα
- φάσμα από πλανητικό νεφέλωμα (τα μάτια της γάτας Νεφέλωμα (NGC 6543))
- με φασματική τεχνικές διακρίνει πλανητικά από νεφελώματα γαλαξιών.



Γύρω στο 1860 ο William Huggins (1824-1910) με την βοήθεια του William Miller στο ιδιωτικό του αστεροσκοπείο στο Tulse Hill έδειξε ότι πολλά χημικά στοιχεία που είναι στην Γη ανιχνεύονται στα άστρα. Χρησιμοποίησε ένα οπτικό φασματογράφο που προσάρμοσε στο κατοπτρικό του τηλεσκόπιο (διαμέτρου 20 cm) απέδειξαν ότι φασματικές γραμμές που εμφανίζονται σε λάμπες με εκκένωση εμφανίζονται και σε φάσματα άστρων ως γραμμές απορρόφησης στα ίδια μήκη κύματος



Αστρικά φάσματα του William Huggins



PHYSICO-MATHESIS DE LUMINE. COLORIBVS. ET IRIDE.

ALIISQVE ADNEXIS

LIBRI DVO,

In quorum Primo afferuntur Noua Experimenta, & Rationes
ab ijs deductæ pro Substantialitate Luminis.

In Secundo autem dissoluuntur Argumenta in Primo adducta,
& probabiliter sustineri posse docetur Sententia
Peripatetica de Accidentalitate Luminis.

QVA OCCASIONE

De hactenus incognita Luminis Diffusione, de Reflexionis, Refractionis, ac Dif-
fractionis Modo & Causis, de Visione, deque Speciebus Intentionalibus
Visibilibus & Audibilibus, ac de Substantiali Magnetis effluuio omnia
corpora persuadente, non pauca scitu digna proferuntur,
& speciali etiam argumento impugnantur Atomistæ.

AUCTORE

P. FRANCISCO MARIA GRIMALDO

SOCIETATIS IESV.

OPVS POSTHVMVM.

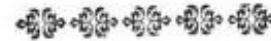


BONONIÆ. M.DC.LXV.

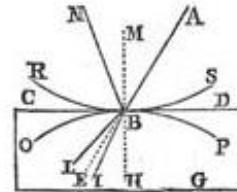
Ex Typographia Hæredis Victorij Benatij. Superiorum permisso.
Impressis Hieronymi Bernia Bibliopola Bononicus.

PROPOSITIO I.

Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directè,
Refractè, ac Reflexè, sed etiam alio quodam
Quarto modo, DIFFRACTE.



1 **H**æc Aëneus non nisi tribus mo-
dis exerceri luminis diffu-
sionem Optici communi-
ter agnouerunt, Directè
scilicet, Refractè, ac Re-
flexè. Certissimis namq; experimentis
obseruatum est, lumen per lineam quidem
rectam propagari, seu diffundi, donec me-
dium per quod diffunditur, maneat idem:
mutare vero lineam, seu viam suæ diffu-
sionis, eamq; cum fractione radij inclinare,
ad vnam partem, statim ac transit ab vno
medio ad aliud, densitatem habens diuer-
sam à densitate mediij prioris, si tamen in
illud incurrat obliquè: ac tandem suum
cursum recto conuertere per reflexionem,
quotiescunq; incidit in corpus illi resistens,
nec permittens vltiorem progressum.



2 Exempli gratiâ à luminoso A de-
scendat lumen per radium AB, obliquè
incidentem superficiem planæ, ac postea
corporis alicuius diaphani, quæ sit CD:
erit enim diffusio luminis per radium AB
rectissima, quia ille totus transit per vni-
cum medium. At quia deinde mutatur
medium, idem lumen non perget amplius
rectè per radium ABE, si corpus diapha-
num de nouo occurrens diuersam habue-

rit densitatem ab ea, quam habet corpus
item diaphanum, per quod radius AB de-
scendit. Quin immò si transitus fiat à me-
dio rariore ad densius, radius refringetur
versus perpendicularem, hoc est versus
lineam rectam, quæ concipiatur educi per
punctum ingressus B, ita vt faciat cum su-
perficie CD, angulos omnes æquales. Ac
si transitus fiat à medio densiore ad rari-
us, radius flectetur, seu refringetur ad partes
contrarias, magis recedendo à perpendicu-
laribus.

3 Ponamus iam corpus CDG, in quod
radius incidit, esse crystallum, ætrem ve-
rò esse illud medium prius, per quod de-
scendit radius AB: & quia crystallum est qui-
dem diaphanum, densius tamen quam
aër, propterea lumen relicta via BE, aliam
instruet viciniorum lineæ perpendiculari
BH, & procedet per BI. E contra si
corpus CDG ponatur esse rari-
us, medium CDA, radius AB, alioqui rectè
iturus per BE, perget per rectam BL, remo-
tiorum à prædicta perpendiculari BH, &
ipse passus refractionem, hoc est obliqua-
tionem à rectitudine viæ, quam prius te-
nebat. Cæterum si radius perpendicu-
lariter incidet super superficiem CD, vt facit
recta MB, tendet absq; vlla refractione
per viam semper rectam in H.

4 Iam verò fingamus corpus CDG
esse opacum, ac luminis imperitum: idem
enim lumen incidens super superficiem CD, cum
non possit vilo modo vltius progredi, co-
geret flecti retrosum aliquatenus contra
luminosum A. Et si quidem incidit per-
pendiculariter, vt facit radius MB, refle-
ctetur in se ipsum per eandem viam, qua
venit: Si vero obliquè incidit, vt facit
radius AB, reflectetur ad partes oppositas
per

PROPOSITIO I.

fractum resilit ad latera, & format lucidos illos tractus.

Sed neq; hoc sustineri potest, tum quia modica illa perspicuitas etiam si concedatur, non est tamen dicenda æqualis in omnibus opacis, aut semiopacis, quæ in prædicto cono lucido inferuntur, & quæ omnia ex æquo efficiunt, seu determinant luminosos tractus iam dictos, qui, vt expositum fuit, sunt semper eiusdem magnitudinis, habentq; eandem interuallorum mensuram, siue magis, siue minus perspicuum sit corpus illud imperfectè opacum, quod inferitur in cono lucido: tum quia refractione ad vnam tantummodo partem fieri potest, at lumen lucidas illas series formans seclitatur ad vtramque partem post opacum insertum cono, easq; pingit, tam supra lucidam basem, quam supra vmbra à prædicto opaco, vel semiopaco proiectam. Ergo lumen illud non est refractum.

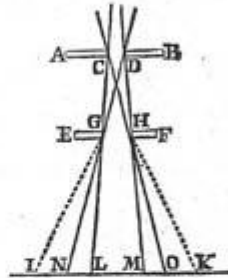
Hactenus probata fuit Propositio per ea, quæ obseruata sunt circa series luminis principales, propè vmbra apparentes.

24. Probatur iam eadem Secunda Pars Propositionis similiter ex obseruatis circa lucidas series secundi generis, quæ scilicet super ipsa vmbra conspicuæ sunt modo, iam supra exposito à num. 14. Quia nimirum ne illæ quidem fieri possunt à lumine Directo, neq; à Refracto, neq; à Reflexo, easdem prorsus ob causas, quæ pro primi generis seriebus allate fuerunt, vt consideranti statim patebit. Quin immò longius abest, vt illæ dicantur pingi à lumine Directo, quia inter ipsas, & foramen luminis peruenit intercedit in linea recta opacum illud, quod proicit vmbra, & consequenter non potest ex foramine illo dirigi radius ad eas in vmbra formandas. Non apparet præterea vllum corpus, quod vel reflectat versus vmbra prædictam lumen illud, quo series illæ pinguntur. Ergo nullò ex dictis tribus modis propagationis lumen ad eas propagatur à foramine, quàmuis certum sit, eas de facto super vmbra formatas esse vi luminis per prædictum foramen ingredientis. Deniq; licet earum lumen sit valde remissum præ illo, quod efficit exteriores, ac præcipuas series lucidas; non tamen hinc fit vt earum lu-

men sit refractum, aut per aliquam reflexionem debilitatum: Sed remissio illa dicenda est aliunde oriri, vt postea explicabitur.

Experimentum secundum.

25. Aperto in fenestra lignea cubiculi bene obscurati foramine serè digitalis crassitie, applicetur ei lamina opaca subtilis AB, per cuius foraminulū arctissimum CD Solis lumen admittitum formabit se in conum: hic verò in magna distantia post



laminam AB ad rectos angulos secetur ab alia lamella EF, habente pariter foramen paruum GH, per quod excipiat aliquid de prædicto luminoso cono secto à lamina EF, vtiq; in loco vbi eius basis valde superat amplitudinem foraminis GH, vt ita foramen hoc totum illustretur, seu lumine compleatur. Rursus ergo hoc ipsum lumen, quod ingreditur secundum foramen GH, formabitur, seu procedet formatum in conum, vel quasi conum, qui sectus orthogonaliter, ac terminatus ab aliquo plano mundo, & candido, exhibebit in illo suam basem lucidam IK notabiliter maiorem, quam ferant radij per vtrumq; foramen rectè transmissi, & non solùm transseuntes per extrema foraminum ad easdem partes spectantia, vt sunt radij CGL, & DHM; sed etiam ad partes contrarias, vt sunt radij DGN, & CHO.

Id verò constitit manifestè repetito superius experimento, obseruando nimirum quanta de facto esset basis IK apparentis, & deduc-

*Lumen per
das foramina
inter se di-
stincta trans-
missum, ex-
celsior ma-
ior quàm fer-
ret, nisi dis-
fusa dicitur.*

*Quamvis id
verè depre-
hendatur.*

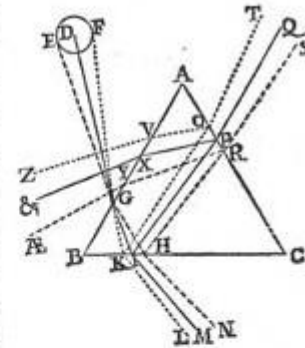
PROPOSITIO XXXV.

mentum, radij per vnum diaphanum al-
lapi ad alterum, aliquam diuisionem
partiantur, & partim quidem reflectun-
tur, partim verò cum vltiori transitu
refringuntur. Res adeo certa est, vt suf-
ficiat aduertere ad radiationes luminis, quæ
per facies prædicti prismatis egrediuntur:
manifestè enim poterit deprehendi
illas à præcedenti facie reflexas fuisse,
seruatis legibus reflexionis, de quibus
Optici, & quas attulimus ad Propos. 17.
Id verò facillimè cognoscetur si prima
facies AB opaco aliquo tegatur, solo par-
uo foramine G aperto, & obseruetur per
quoddam punctum faciei sequentis BC
egrediatur radiatio, & rursus per quod-
dam deinde in facie sequenti AC egre-
diatur radiatio reflexa ex facie BC, ac
deniq; per quoddam in facie AB egre-
diatur alia radiatio reflexa ex facie AC;
comparando enim loca talium egressu
radiationis, deprehendetur illam sic pro-
fus dispositi, vt exigunt regulæ reflexio-
nis.

Ceterum hæc magis certa reddentur
si, vt dictum est ad Propos. 30. num. 5.
facies AC asperabitur, perscrutando eam
subilo crassiore. Sic enim radiatio, quæ
exibat per faciem AB, cessabit, perdu-
tante tamen ea, quæ egreditur per BC,
quod est euidentis signum radiationem
illam, quæ cessat, prius fuisse reflexam à
facie AC, dum hæc erat leuis, ac bene-
ficus: adeoq; solum cessare, quia reflexio
illa impeditur ob prædictam asperationem
superficiæ AC.

9. Ponatur iam ex Sole DEF descē-
dere lumen ad prismatis faciem AB, cū
prædicta debita obliquitate illi exposi-
tum. Et quæ radij ab eodem Solis pun-
cto ad totam faciem prismatis descen-
dentes, sunt ad sensum paralleli ob in-
gotem distantiam Solis, ac præterea
eiusdem parallelismum seruant radij præ-
dicti post quamcunq; ipsorum reflexio-
nem intra crystallum planum, & post re-
fractionem extra factam, vt facile Optici
quouis intelligit; idcirco sufficere
considerate radios per vnum determi-
natum punctū prismatis ingressos, nam
quid de alijs eueniat poterit statim intel-
ligi ob parallelismum prædictum. Imò


fatius erit in Sole determinare tria puncta
ad prædictum superficiem crystalli pu-
ctum radiantia, vnum in centro, & reli-



qua in extremis lateribus Solis, posita
in eodem plano cum prædicta prismatis
sectione ABC.

10. Sint igitur ex Solis centro D, &
ex lateribus E, F demissi radij ad G, pu-
ctum in superficiem crystalli prismatis
trigoni, qui ante ingressum quidè æqua-
liter inclinatur inter se, at post intres-
sum per G, refracti versus perpendicu-
larem, procedit cum interuallu inæqua-
li, eò quòd licet æquales sint differentie
inter inclinationes radiorum DG, EG,
FG supra superficiem AB, sunt tamen
inæquales ipsorum refractiones, & in-
æqualia etiam incrementa refractionum,
nempe maiora pro radijs cuius maior
inclinatio inciditibus: Etenim radius
directus EG refringitur in GH, & dire-
ctus DG magis inclinatus maiorè etiam
patitur refractionem, tenditq; in I, &
directus FG adhuc magis inclinatus ma-
iori quoq; refractione seclitatur versus
K, sed ita vt excessus refractionis radij
GK supra refractionem radij GI, maior
sit, quàm excessus refractionis radij eius-
dem GI supra refractionem radij GH, vt
Optica experimenta conuincunt. Igitur
minus erit interuallum inter GK, & GI,
quàm inter GI, & GH: & differentiæ
Kk hcc

*radij h
obliquitate
di-
fractio post
refractionem,
ob inæqualia
incrementa
refractionum.*



Φασματοσκοπία
μακρινών γαλαξιών
Credit: VIMOS, VLT, ESO

	Χρώματα άστρου				
Φασματικός τύπος άστρου	B-V	U-B	V-R	R-I	Ενεργός θερμοκρασία άστρου T_e (K)
O5V	-0.33	-1.19	-0.15	-0.32	42,000
B0V	-0.30	-1.08	-0.13	-0.29	30,000
A0V	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	9,790
F0V	0.30	0.03	0.30	0.17	7,300
G0V	0.58	0.06	0.50	0.31	5,940
K0V	0.81	0.45	0.64	0.42	5,150
M0V	1.40	1.22	1.28	0.91	3,840

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



ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΌ wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Photometric_system

ΟΝΟΜΑ ΦΙΛΤΡΟΥ	ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ λ_{eff}	ΕΥΡΟΣ ΣΤΟ ΗΜΙΣΥ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ $\Delta\lambda$	ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΦΙΛΤΡΩΝ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Ultraviolet				
U	365 nm	66 nm	u, u', u*	"U" stands for ultraviolet.
Visible				
B	445 nm	94 nm	b	"B" stands for blue.
V	551 nm	88 nm	v, v'	"V" stands for visual.
G			g, g'	"G" stands for green (visual).
R	658 nm	138 nm	r, r', R', R_c, R_e, R_j	"R" stands for red.
Near-Infrared				
I	806 nm	149 nm	i, i', I_c, I_e, I_j	"I" stands for infrared.
Z	900 nm		z, z'	
Y	1020 nm	120 nm	y	
J	1220 nm	213 nm	J', J_s	
H	1630 nm	307 nm		
K	2190 nm	390 nm	K Continuum, K', K_s, K_{long}, K⁸, nbK	Διαφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για την διδασκαλία των φοιτητών του Πανεπιστημίου Αθηνών τα έτη 2000-14
L	3450 nm	472 nm	L', nbL'	
Mid-Infrared				
M	4750 nm	460 nm	M', nbM	
N	10500 nm	2500 nm		
Q	21000 nm	5800 nm	Q'	

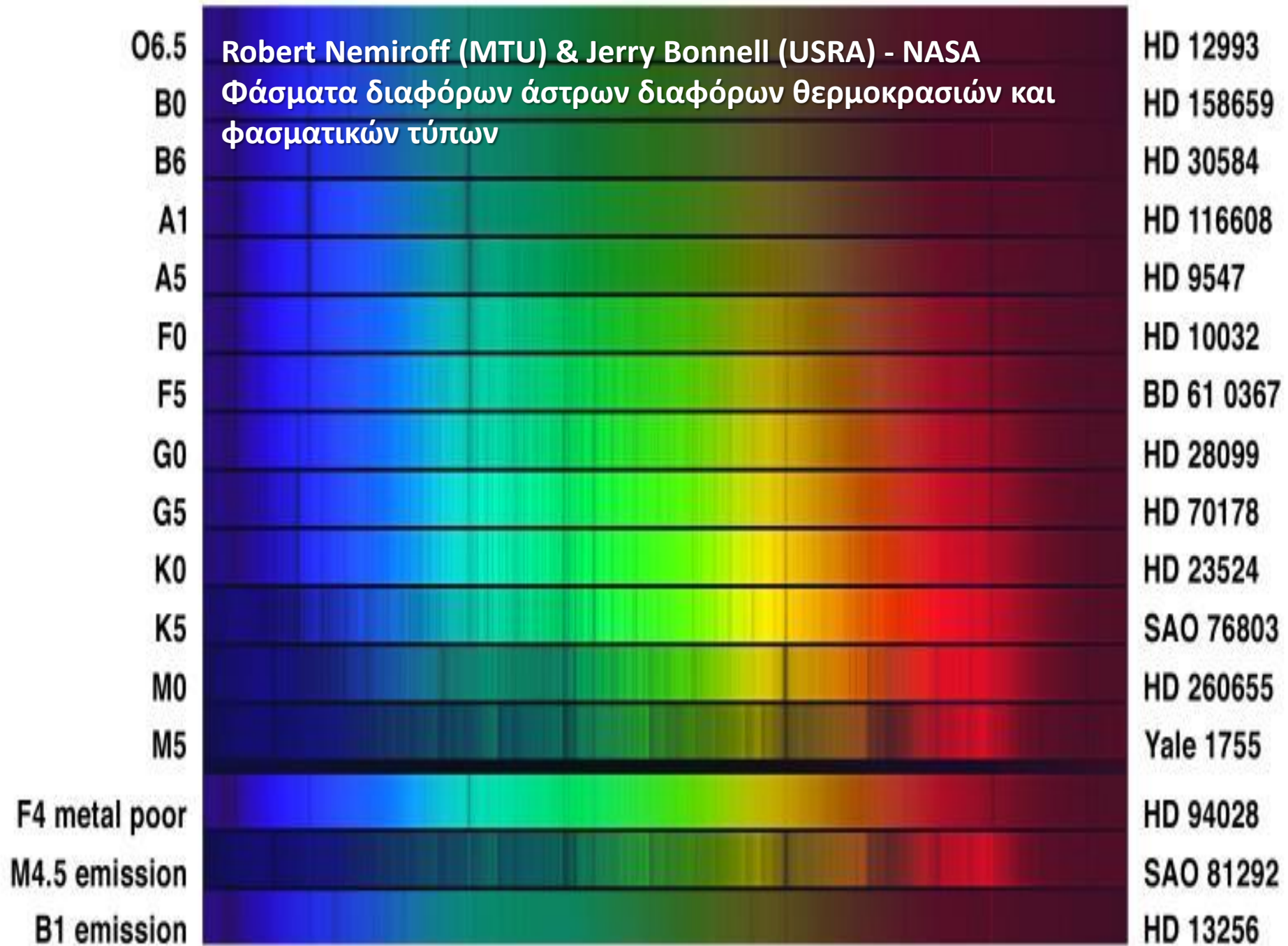


Εικόνα με φάσμα άστρων όλων των φασματικών τύπων

Έργο του αστεροσκοπείου NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html

http://www.noao.edu/image_gallery/images/d3/stars.jpg






Εικόνα με φάσμα του Ηλίου του κ.

N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html

Εικόνα με φάσμα του άστρου
Προκύωνα φασματικού τύπου F5
του κ. N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html



Εικόνα με φάσμα του άστρου
Αρκτούρου, φασματικού τύπου K1
III

Έργο του κ. N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak

FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html



Εικόνα με φάσμα άστρων όλων των φασματικών τύπων

Έργο του αστεροσκοπείου NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html

http://www.noao.edu/image_gallery/images/d3/stars.jpg



Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Φασματική ταξινόμηση άστρων

Ξενοφών Δ. Μουσάς,
Καθηγ. Φυσικής Διαστήματος

ΑΘΗΝΑ 2014

Εικόνα με φάσμα άστρων όλων των φασματικών τύπων
Έργο του αστεροσκοπείου NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF
http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html
http://www.noao.edu/image_gallery/images/d3/stars.jpg

Φασματική ταξινόμηση



Annie Jump Cannon, Harvard Observatory Director Edward C. Pickering, 1890



O6.5
B0
B6
A1
A5
F0
F5
G0
G5
K0
K5
M0
M5
F4 metal poor
M4.5 emission
B1 emission

Φασματοσκοπία άστρων

O B A F G K M

Credit & Copyright:
KPNO 0.9-m Telescope,
AURA, NOAO, NSF

HD 12993
HD 158659
HD 30584
HD 116608
HD 9547
HD 10032
BD 61 0367
HD 28099
HD 70178
HD 23524
SAO 76803
HD 260655
Yale 1755
HD 94028
SAO 81292
HD 13256

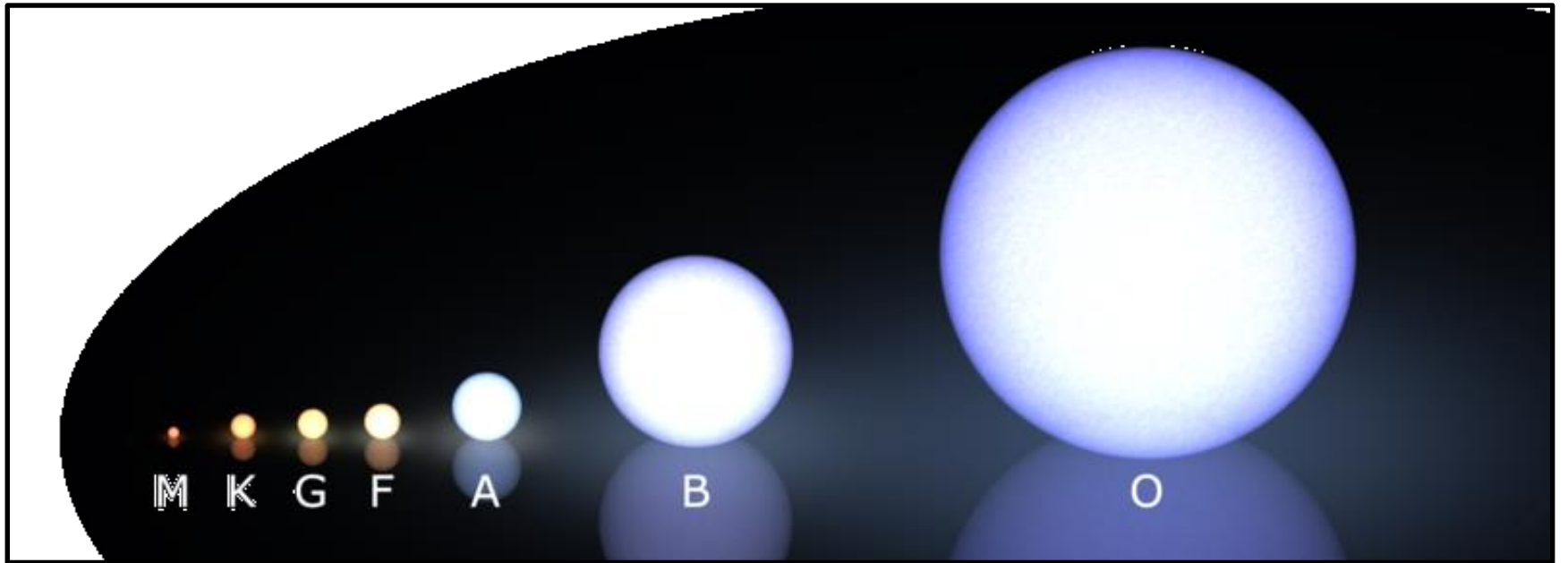
Φασματικός τύπος	θερμοκρασία	χρώμα	χρώμα	Μάζα/μάζα ηλίου	Ακτίνα/ηλίου	Ισχύς	Γραμμές υδρογόνου	Ποσοστό άστρων κύριας ακολουθίας
<u>O</u>	≥ 30,000 K	blue	blue	≥ 16 <u>M_{\odot}</u>	≥ 6.6 <u>R_{\odot}</u>	≥ 30,000 <u>L_{\odot}</u>	Weak	0.00003%
<u>B</u>	10,000–30,000 K	blue to blue white	blue white	2.1–16 <u>M_{\odot}</u>	1.8–6.6 <u>R_{\odot}</u>	25–30,000 <u>L_{\odot}</u>	Medium	0.13%
<u>A</u>	7,500–10,000 K	white	white to blue white	1.4–2.1 <u>M_{\odot}</u>	1.4–1.8 <u>R_{\odot}</u>	5–25 <u>L_{\odot}</u>	Strong	0.6%
<u>F</u>	6,000–7,500 K	yellowish white	white	1.04–1.4 <u>M_{\odot}</u>	1.15–1.4 <u>R_{\odot}</u>	1.5–5 <u>L_{\odot}</u>	Medium	3%
<u>G</u>	5,200–6,000 K	yellow	yellowish white	0.8–1.04 <u>M_{\odot}</u>	0.96–1.15 <u>R_{\odot}</u>	0.6–1.5 <u>L_{\odot}</u>	Weak	7.6%
<u>K</u>	3,700–5,200 K	orange	yellow orange	0.45–0.8 <u>M_{\odot}</u>	0.7–0.96 <u>R_{\odot}</u>	0.08–0.6 <u>L_{\odot}</u>	Very weak	12.1%
<u>M</u>	≤ 3,700 K	red	orange red	≤ 0.45 <u>M_{\odot}</u>	≤ 0.7 <u>R_{\odot}</u>	≤ 0.08 ⁵⁵ <u>L_{\odot}</u>	Very weak	76.45%

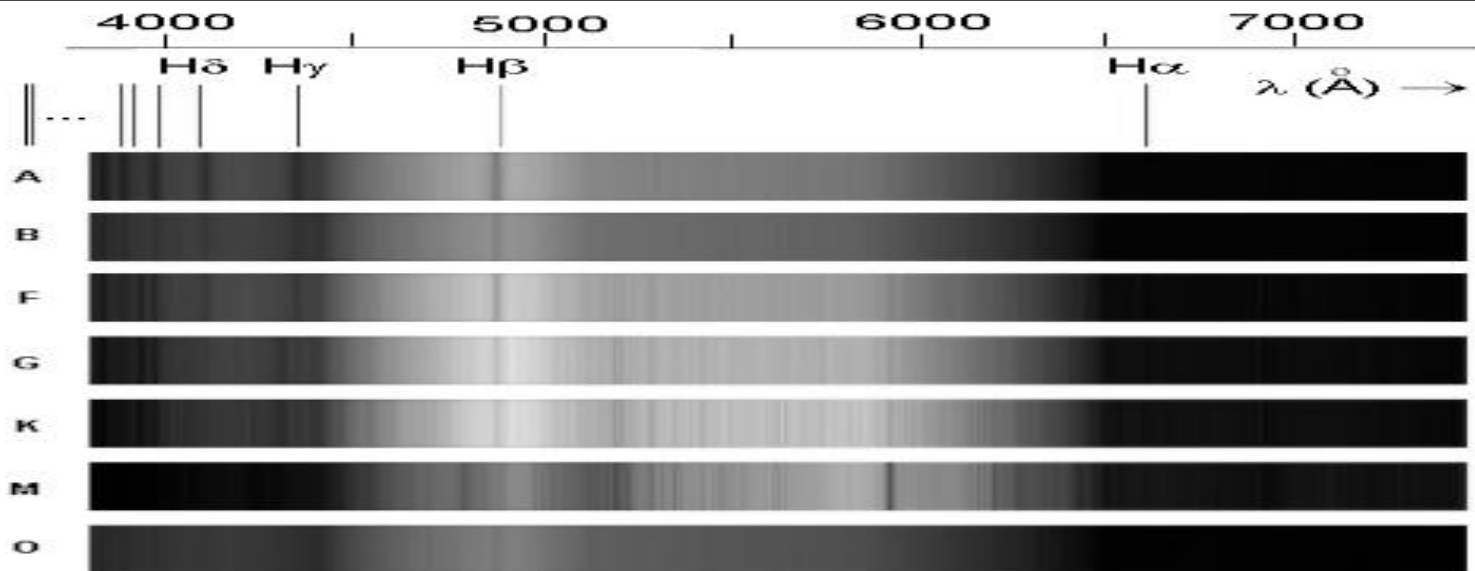
Η ταξινόμηση των
άστρων έγινε από την
Annie Jump Cannon
(1863-1941) στο
Harvard college
observatory





στο τέλος του 19^{ου} αιώνα η Canon με την ομάδα της με τη χρήση φωτογραφιών ανέλυσε φάσματα 400.000 άστρων και τα ταξινόμησε κυρίως με βάση την παρουσία Υδρογόνου, αβεστίου και μαγνησίου





The hydrogen Balmer spectrum is visible for most stars. And astronomers categorized stars according to the strength of the hydrogen absorption lines in the spectrum in the late 19th century.

Αρχικά δεν ήξεραν τι σημαίνει αυτή η διαφορά στα φάσματα, αλλά βαθμιαία οδηγήθηκαν στην ταξινόμηση των άστρων που έχουμε σήμερα



Η χημεία του σύμπαντος και η Cecilia Payne-Gaposchkin, 1900 - 1979

- Με το διδακτορικό της το 1925 διαπίστωσε ότι ο Ήλιος και τα άστρα είναι φτιαγμένα από τα χημικά στοιχεία της Γης

~90% H

~10% He

και

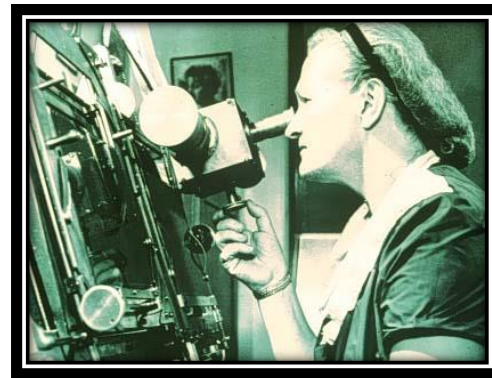
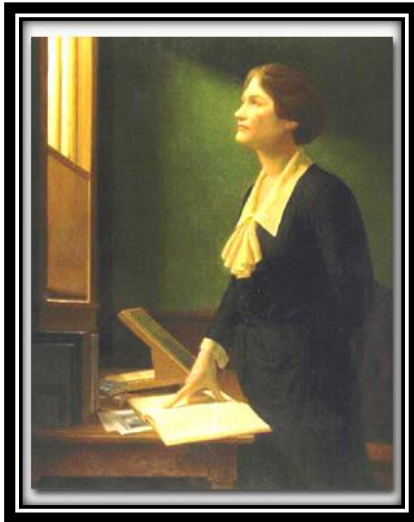
~1-2% από τα βαρύτερα χημικά στοιχεία

Ήλθε σε σύγκρουση με τις αντιλήψεις των αστρονόμων της εποχής



Η χημεία του σύμπαντος και η Cecilia Payne-Gaposchkin, 1900 - 1979

- Τελικά ο σημαντικότερος αστρονόμος Otto Struve είπε ότι το διδακτορικό της ήταν αδιαμφισβήτητα το καλύτερο διδακτορικό στην αστρονομία
- Εφάρμοσε την θεωρία που ανέπτυξε ο ινδός φυσικός Megh Nad Saha σχετικά με τον ιονισμό και συσχέτισε τους φασματικούς τύπους των άστρων με τις θερμοκρασίες τους



Cecilia Payne Gaposchkin



Αφθονία χημικών στοιχείων στα άστρα

- Payne απέδειξε ότι η μεγάλη μεταβολή των γραμμών απορρόφησης στα φάσματα άστρων οφείλεται στην τεράστια διαφορά θερμοκρασίας και της εξ αυτής ιονισμού των χημικών στοιχείων και όχι σε διαφορετική αφθονία των στοιχείων που υποστήριξε ότι έχουν την ίδια αφθονία όπως η Γη μας.



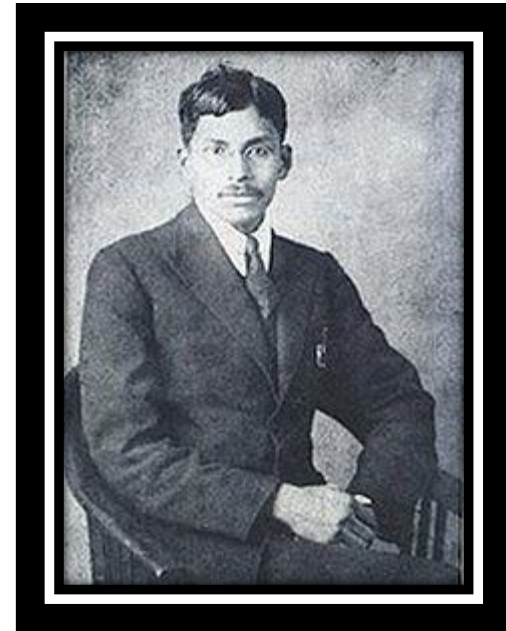
Cecilia Payne
(1900-1979)



Megh Nad Saha মেঘনাদ সাহা

$$\frac{n_{i+1}n_e}{n_i} = \frac{2}{\Lambda^3} \frac{g_{i+1}}{g_i} \exp \left[-\frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)}{k_B T} \right]$$

- n_i είναι η πυκνότητα των ατόμων που βρίσκονται στην i -οστή κατάσταση ιονισμού (ιονισμένα i φορές)
- g_i είναι η κατάσταση εκφυλισμού των ιονισμένα i φορές ιόντων
- ϵ_i είναι η ενέργεια που απαιτείται να ιονισθεί ένα ουδέτερο άτομο και να γίνει ιόν που είναι i φορές ιονισμένο, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται να χάσει i ηλεκτρόνια
- n_e είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων
- Λ είναι το θερμικό μήκος κύματος ενός ηλεκτρονίου κατά de Broglie
- m_e είναι η μάζα του ηλεκτρονίου
- T η θερμοκρασία του αερίου
- k η σταθερά Boltzmann
- h η σταθερά Planck

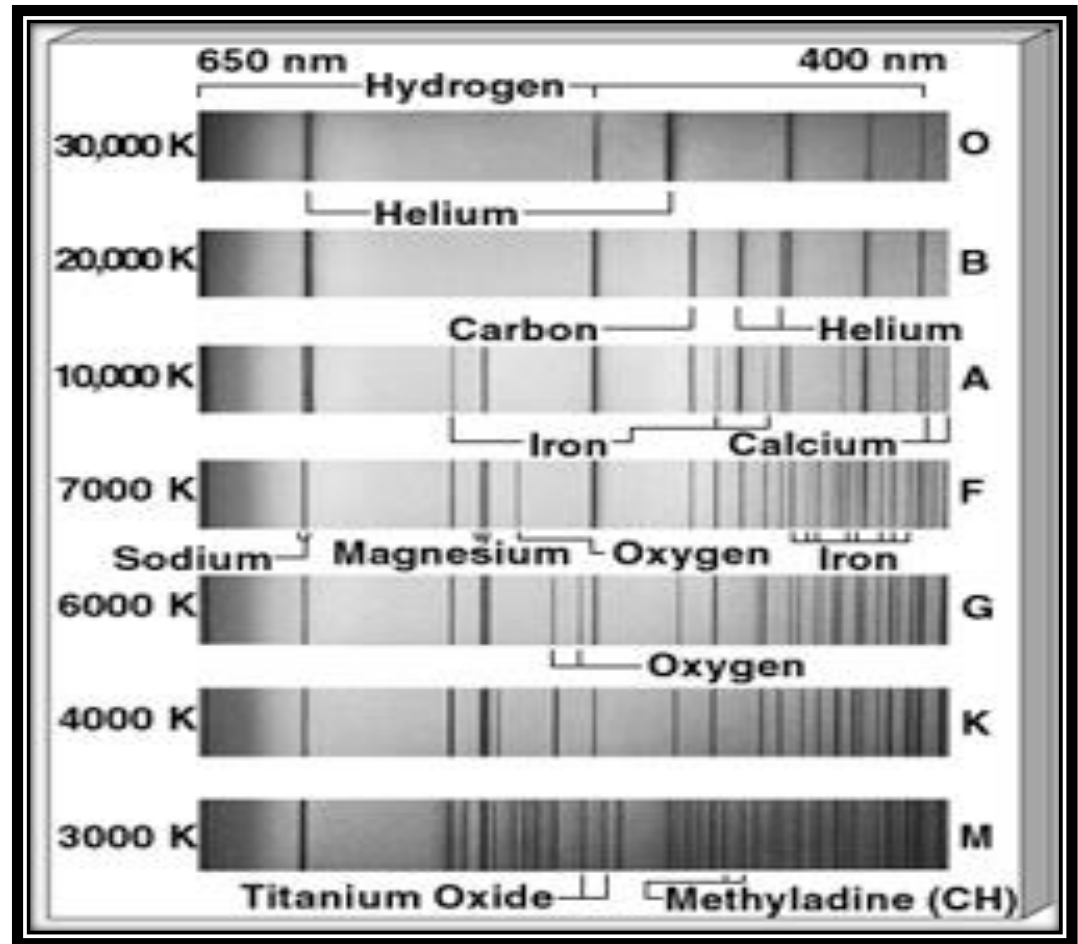


$$\Lambda \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{h^2}{2\pi m_e k_B T}}$$

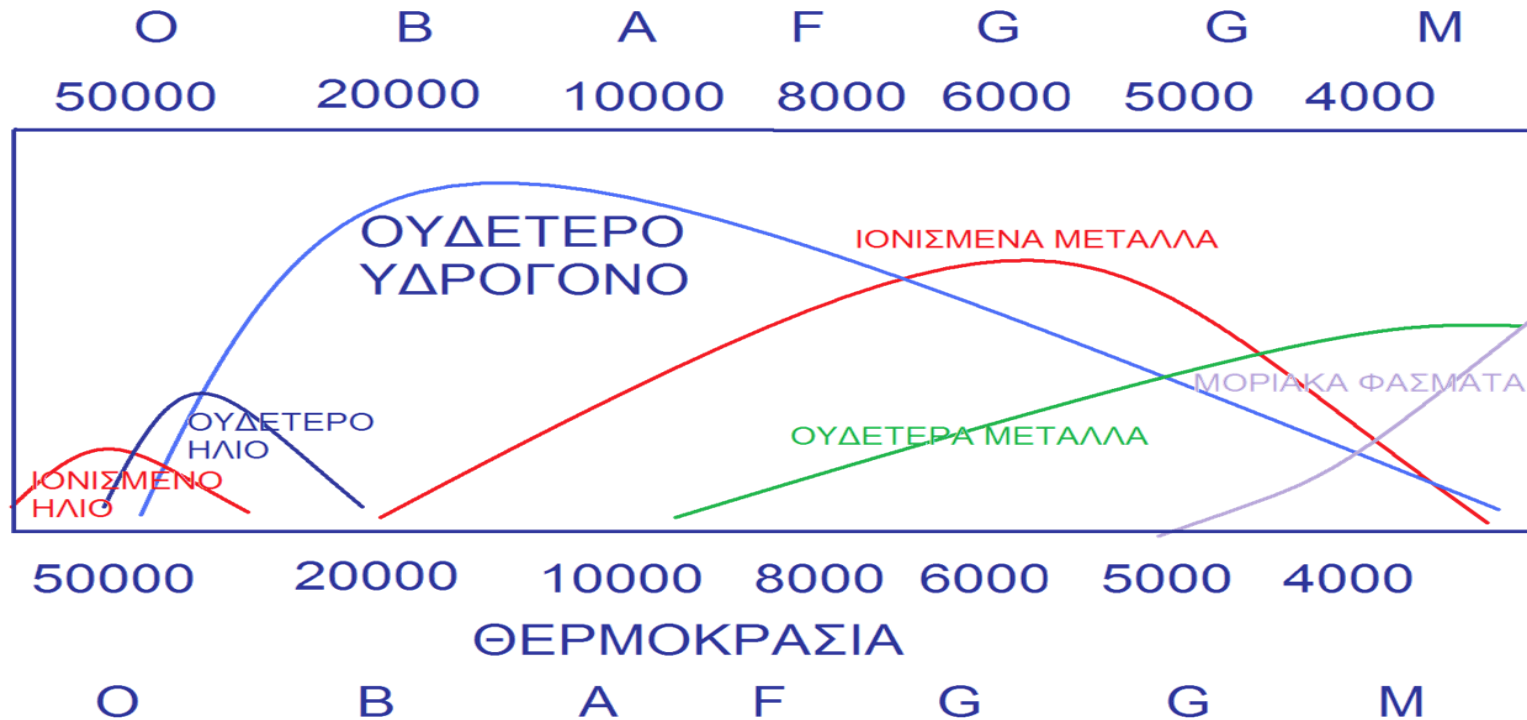


Cecilia Payne-Gaposhkin OBAFGKM

Η θερμοκρασία
αλλάζει τόσο
πολύ τα
φάσματα και
όχι η χημική
σύσταση των
άστρων



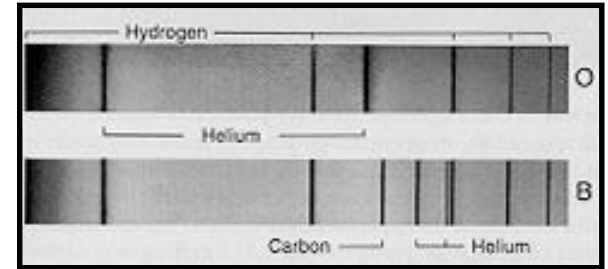
Cecilia Payne-Gaposchkin ΟΒΑFGKM



Η θερμοκρασία αλλάζει τόσο πολύ τα φάσματα και όχι η χημική σύσταση των άστρων

Υπέρθερμα άστρα

O & B T > 20.000 K



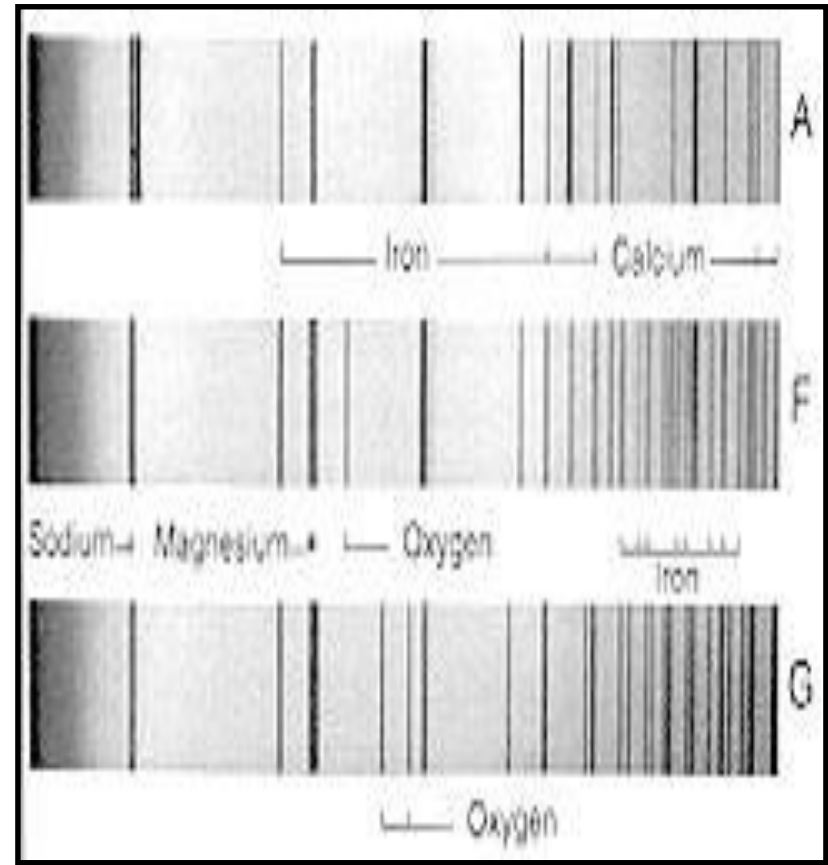
- Απουσία γραμμών μετάλλων
- Μεγάλη θερμοκρασία => ιονισμός μετάλλων
- Συνεπώς απουσία φασματικών γραμμών ιόντων μετάλλων στο ορατό διότι εμφανίζονται στο υπεριώδες και ακτίνες X
- Τα ηλεκτρόνια που μένουν στα ιονισμένα χρειάζονται πολύ ενέργεια για να εμφανίσουν γραμμές από μετάβαση σε άλλη στάθμη
- Βλέπουμε H & He, C



Μέσης Θερμοκρασίας

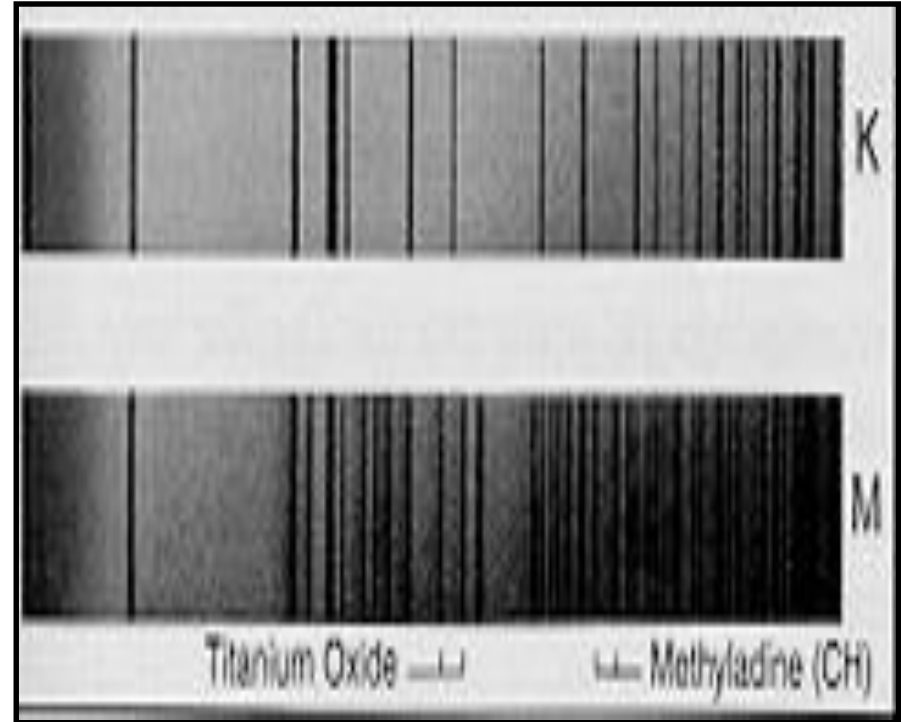
A, F, G , T = 5.000 με 12.000 K

- Εμφανίζονται μερικές ακόμη γραμμές
- Από ότι στα O & B
- Μέταλλα
- Εντονότερες γραμμές υδρογόνου
- Έντονες γραμμές ασβεστίου



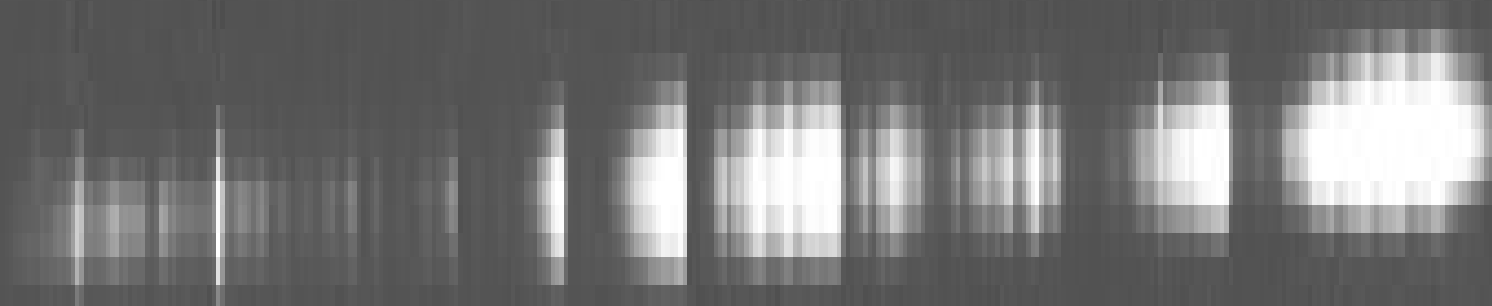
Άστρα χαμηλής θερμοκρασίας K & M, $T < 5.000\text{ K}$

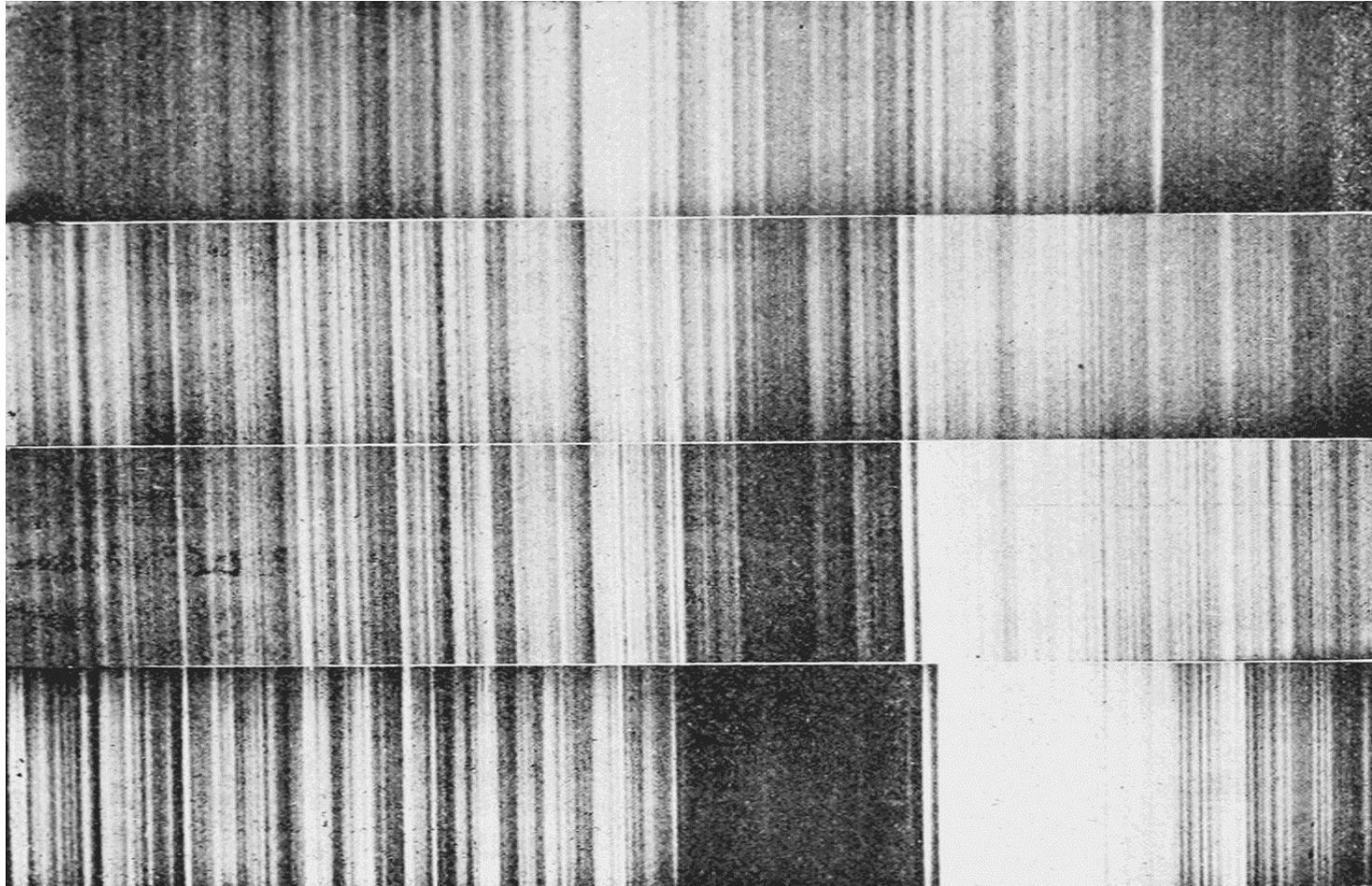
- Πιο σύνθετα φάσματα
- Η θερμοκρασία αρκεί για να έχουμε ακτινοβολία από μέταλλα και εμφανίζονται πολλές φασματικές γραμμές
- Οξειδία του Τιτανίου (ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες) είναι οι πρώτες χημικές ενώσεις που ανιχνεύθηκαν σε άστρα

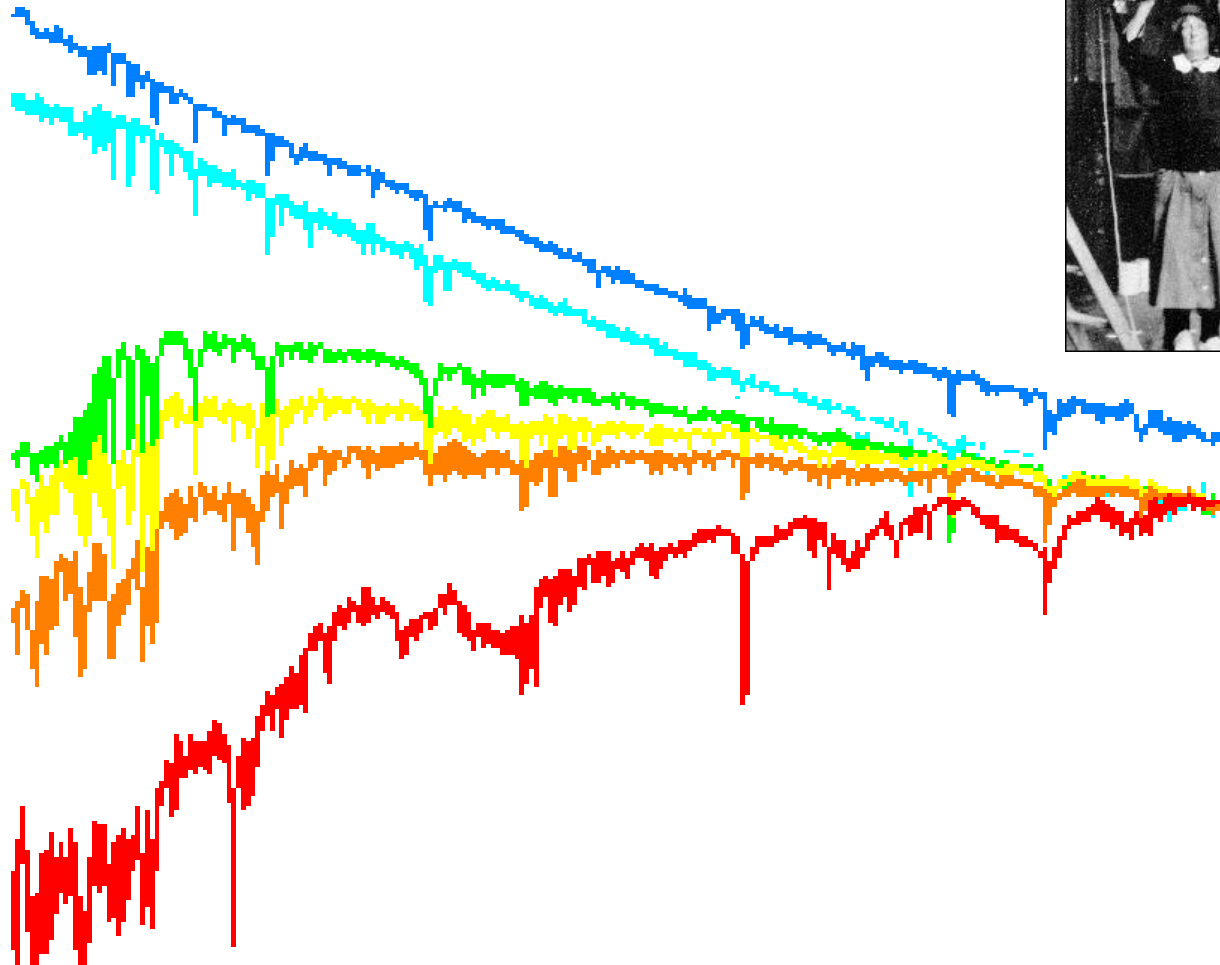


Mira Ceti (ο Ceti - M7 IIIe)

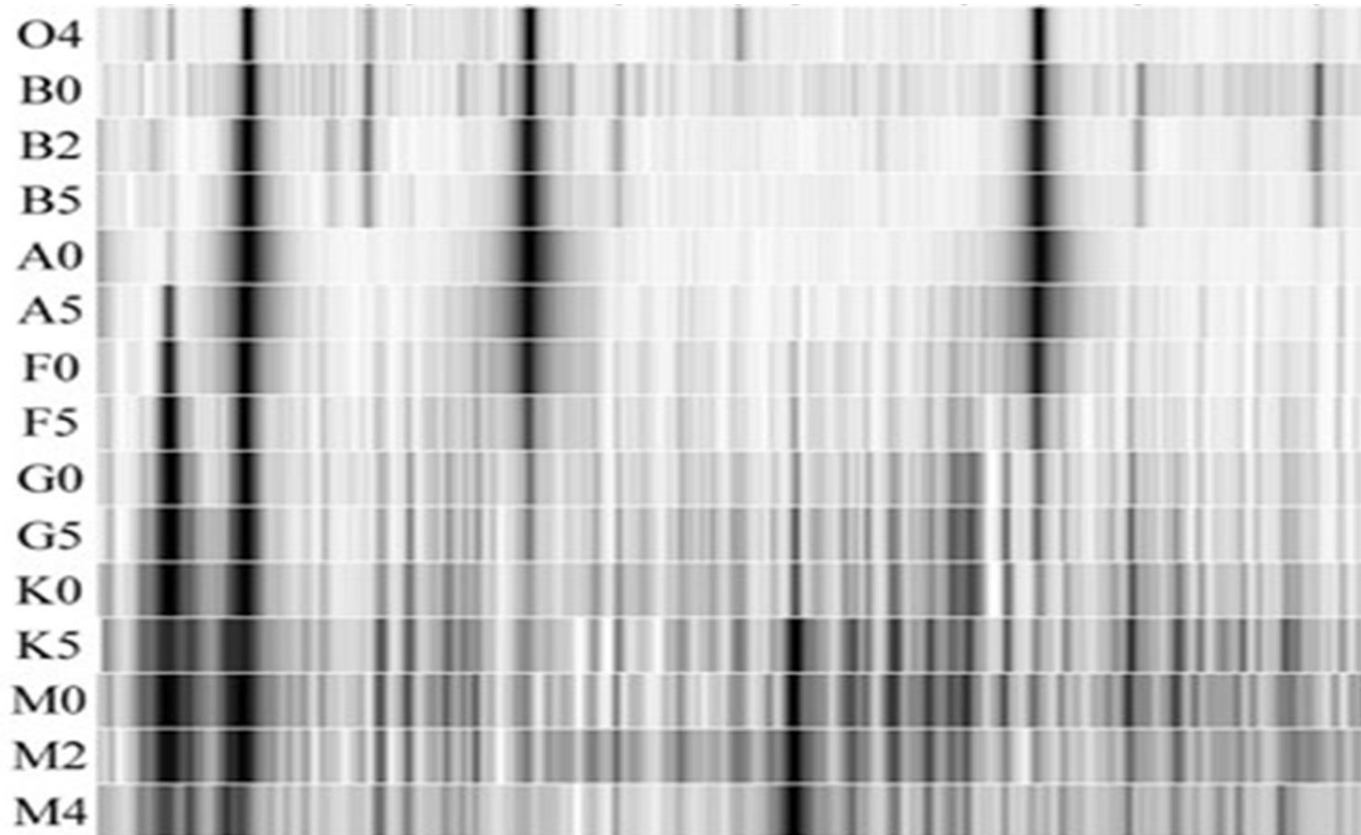
Γραμμές Οξειδίου του Τιτανίου (ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες) είναι οι πρώτες χημικές ενώσεις που ανιχνεύθηκαν στον *Mira Ceti, ο Ceti - M7 IIIe*)







Φάσματα άστρων



CaII CaII HeHe H He HeII Ca CH H HeI HeI

λ



ΦΤ

Θερμοκρασία¹

χρώμα

Γραμμές

O

> 25 000 K

κυανό

Αζωτου, άνθρακα,
Ηλίου, οξυγονου

B

10 000 - 25 000 K

γαλάζιο

Ηλίου, υδρογόνου

A

7 500 - 10 000 K

λευκό

υδρογόνου

F

6 000 - 7 500 K

κίτρινο

μεταλλικές: σίδηρο,
τιτάνιο, ασβέστιο,
στρόντιο, μαγνήσιο

G

5 000 - 6 000 K

κίτρινο

ασβέστιο, Ηλίου,
υδρογόνου και
μετάλλων

K

3 500 - 5 000 K

Κιτρινο-πορτοκαλί

Μετάλλων και
οξειδίου του
τιτανίου

M

< 3 500 K

ερυθρό

Μετάλλων και
οξειδίου του

Το Χρώμα των άστρων

Φασμα-
τικός
τύπος

O B A F G K M

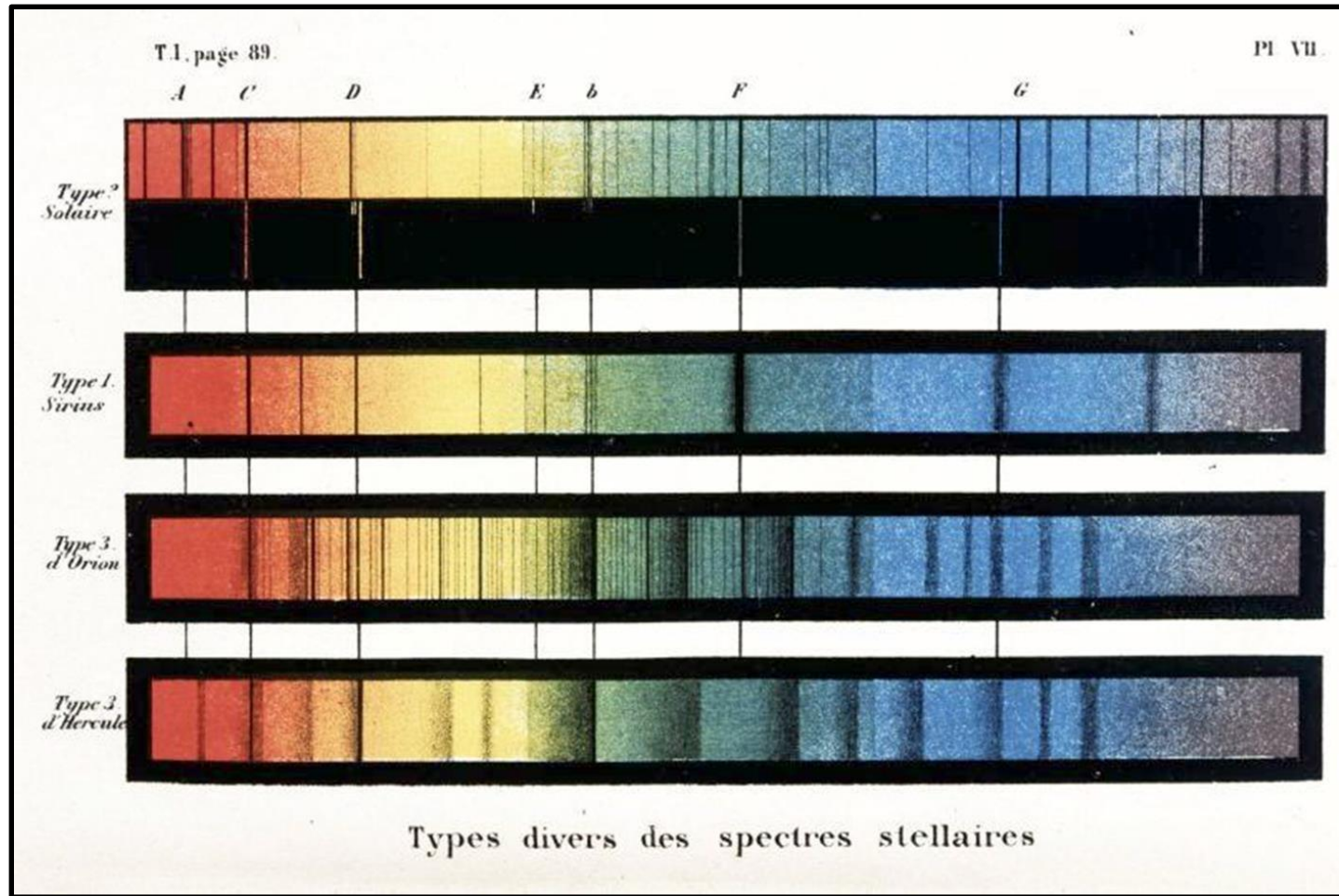
Τ σε (Κ)

50,000	28,000	10,000	7,500 -	6,000 -	4,900 -	3,500 -
-	-	- 7,500	6,000	4,900	3,500	2,000
28,000	10,000					

Χρώμα



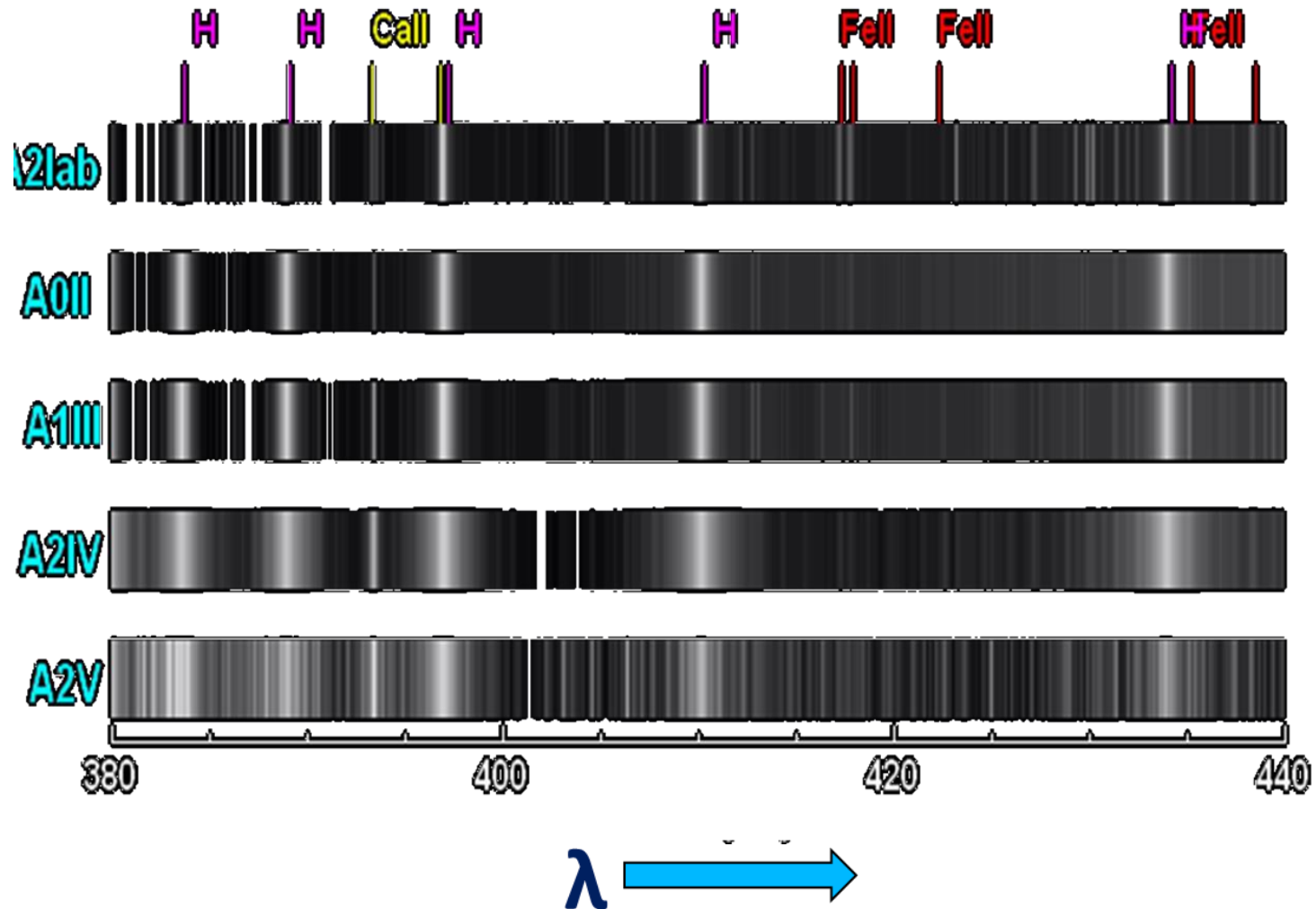
Φάσματα άστρων του Secchi, γύρω στο 1880



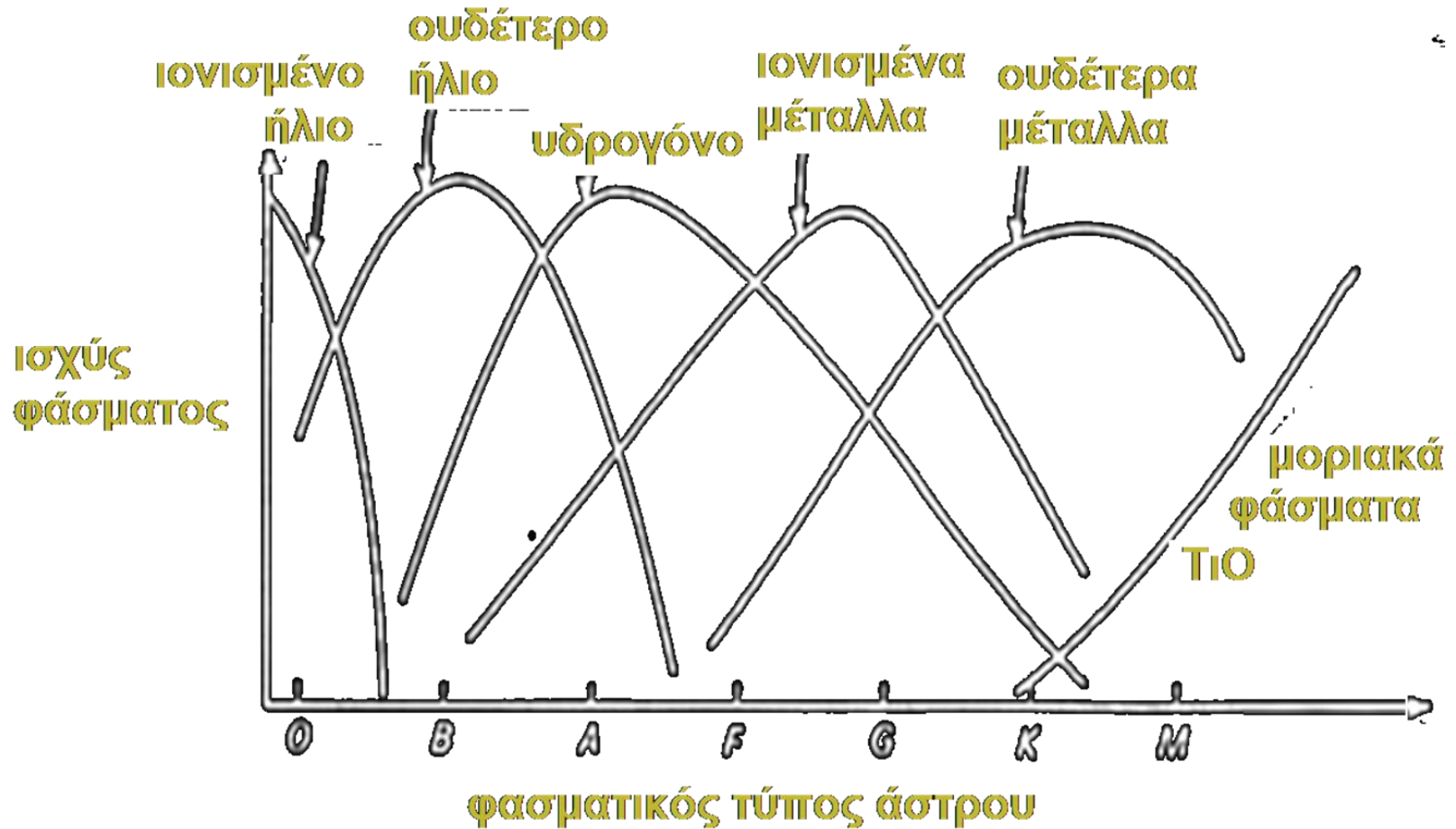
λ



Φάσματα άστρων



Τυπικά φάσματα άστρων διαφόρων φασματικών τύπων O, B, A, F, G, K και M



Ταξινόμηση κατά Harvard

O6.5

B0

B6

A1

A5

F0

F5

G0

G5

K0

K5

M0

M5

F4 metal poor

M4.5 emission

B1 emission

HD 12993

HD 158659

HD 30584

HD 116608

HD 9547

HD 10032

BD 61 0367

HD 28099

HD 70178

HD 23524

SAO 76803

HD 260655

Yale 1755

HD 94028

SAO 81292

HD 13256

- Type Color Approximate Surface Temperature Main Characteristics Examples
- O Blue $> 25,000$ K Singly ionized helium lines either in emission or absorption. Strong ultraviolet continuum. 10 Lacertra
- B Blue 11,000 - 25,000 Neutral helium lines in absorption. Rigel
- Spica
- A Blue 7,500 - 11,000 Hydrogen lines at maximum strength for A0 stars, decreasing thereafter. Sirius
- Vega
- F Blue to White 6,000 - 7,500 Metallic lines become noticeable. Canopus
- Procyon



- G White to Yellow 5,000 - 6,000 Solar-type spectra.
Absorption lines of neutral metallic atoms and ions (e.g. once-ionized calcium) grow in strength. Sun
- Capella
- K Orange to Red 3,500 - 5,000 Metallic lines dominate.
Weak blue continuum. Arcturus
- Aldebaran
- M Red < 3,500 Molecular bands of titanium oxide noticeable.
Betelgeuse
- Antares

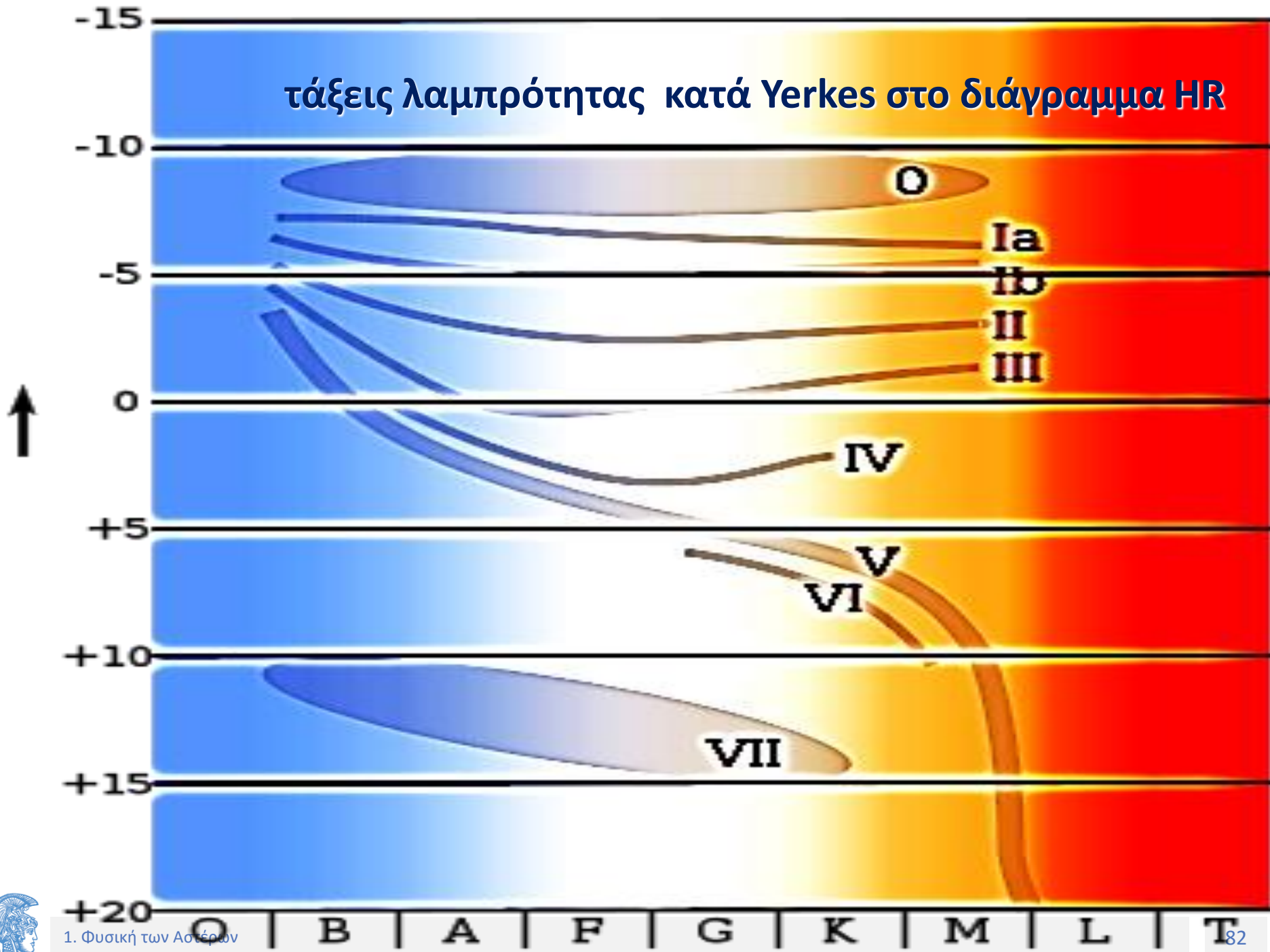


τάξεις λαμπρότητας κατά Yerkes :

- Ia λαμπροί υπεργίγαντες
- Ib λαμπροί υπεργίγαντες
- II λαμπροί γίγαντες
- III γίγαντες
- IV υπογίγαντες
- V άστρα κύριας ακολουθίας (νάνοι)



τάξεις λαμπρότητας κατά Yerkes στο διάγραμμα HR



Spectral Class	Intrinsic Color	Temperature (K)	Prominent Absorption Lines
O	Blue	41,000	He+, O++, N++, Si++, He, H
B	Blue	31,000	He, H, O+, C+, N+, Si+
A	Blue-white	9,500	H(strongest), Ca+, Mg+, Fe+
F	White	7,240	H(weaker), Ca+, ionized metals
G	Yellow-white	5,920	H(weaker), Ca+, ionized & neutral metal
K	Orange	5,300	Ca+(strongest), neutral metals strong, H(weak)
M	Red	3,850	Strong neutral atoms, TiO



Spectral Class Characteristics

- Data from J. C. Evans, George Mason University
- Spectral Class Intrinsic Color Temperature (K) Prominent Absorption Lines
- O Blue 41,000 He+, O++, N++, Si++, He, H
- B Blue 31,000 He, H, O+, C+, N+, Si+
- A Blue-white 9,500 H(strongest), Ca+, Mg+, Fe+
- F White 7,240 H(weaker), Ca+, ionized metals
- G Yellow-white 5,920 H(weaker), Ca+, ionized & neutral metal
- K Orange 5,300 Ca+(strongest), neutral metals strong, H(weak)
- M Red 3,850 Strong neutral atoms, TiO



Class Temperature

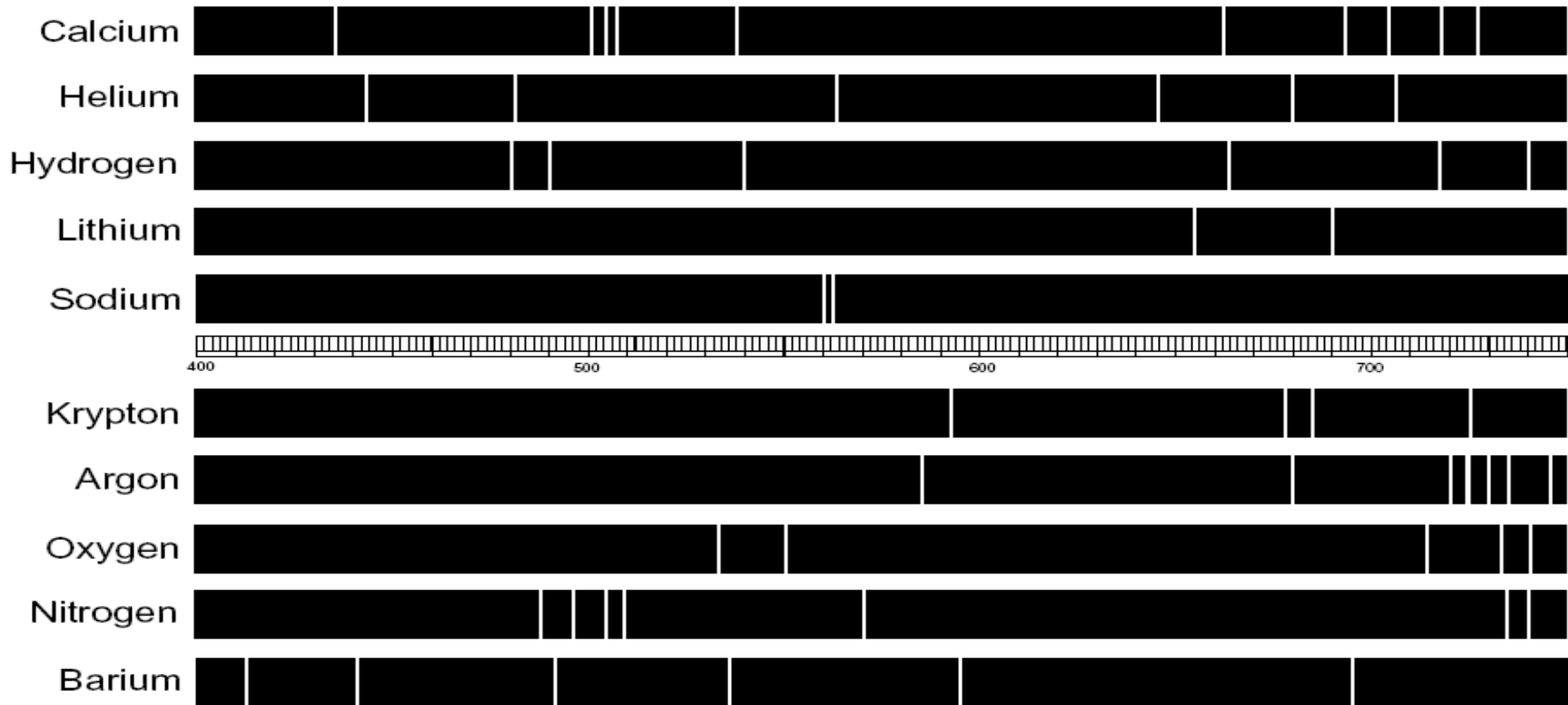
- Conventional color Apparent color[7][8] Mass
- (solar masses) Radius
- (solar radii) Luminosity Hydrogen lines % of all Main Sequence Stars[9]
- O 30,000–60,000 K blue blue 60 M_{\odot} 15 R_{\odot} 1,400,000 L_{\odot} Weak ~0.00003%
- B 10,000–30,000 K blue white blue white to white 18 M_{\odot} 7 R_{\odot} 20,000 L_{\odot} Medium 0.13%
- A 7,500–10,000 K white white 3.1 M_{\odot} 2.1 R_{\odot} 80 L_{\odot} Strong 0.6%
- F 6,000–7,500 K yellowish white white 1.7 M_{\odot} 1.3 R_{\odot} 6 L_{\odot} Medium 3%
- G 5,000–6,000 K yellow yellow 1.1 M_{\odot} 1.1 R_{\odot} 1.2 L_{\odot} Weak 8%
- K 3,500–5,000 K orange yellow orange 0.8 M_{\odot} 0.9 R_{\odot} 0.4 L_{\odot} Very weak 13%
- M 2,000–3,500 K red orange red 0.3 M_{\odot} 0.4 R_{\odot} 0.04 L_{\odot} Very weak >78%
- Hertzsprung-Russell diagram
- Hertzsprung-Russell diagram
- The mass, radius, and luminosity listed for each class are appropriate only for stars



- astro.wku.edu/astr106/spectra.html
- <http://zebu.uoregon.edu/2003/ph122/lec07.html>



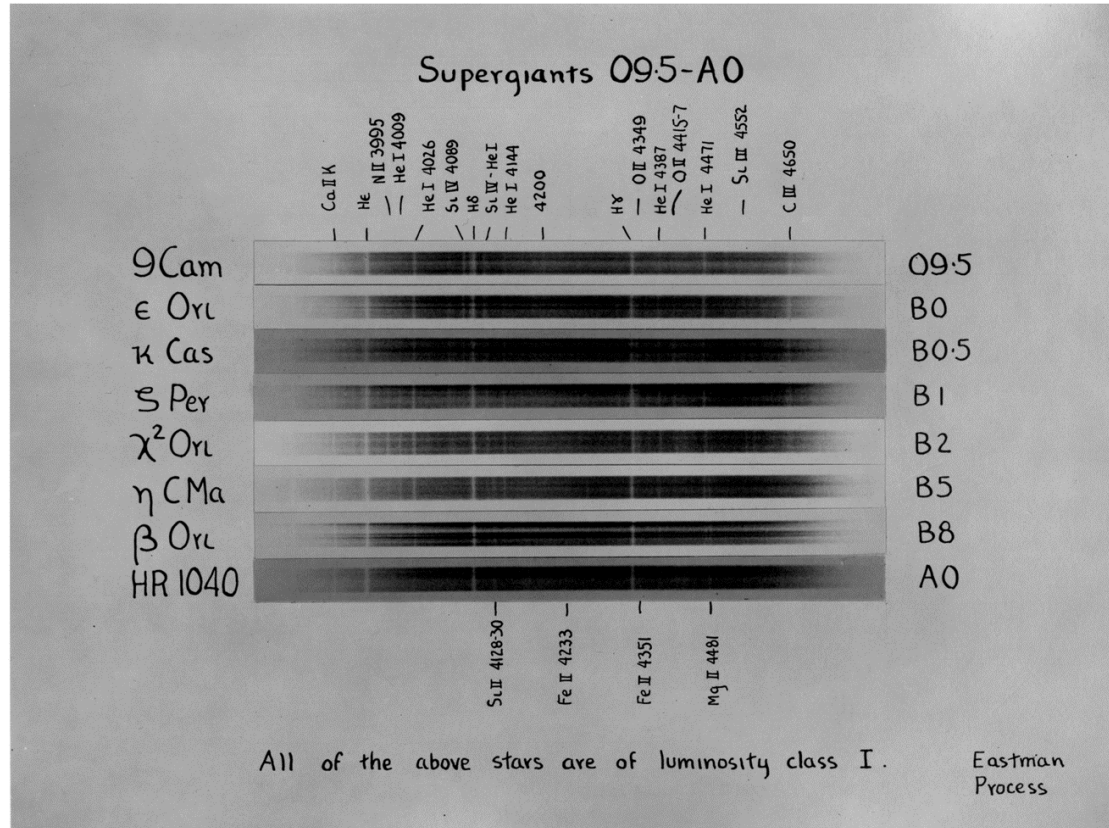




Spectra A Elements: _____


Spectra B Elements: _____


Spectra C Elements: _____

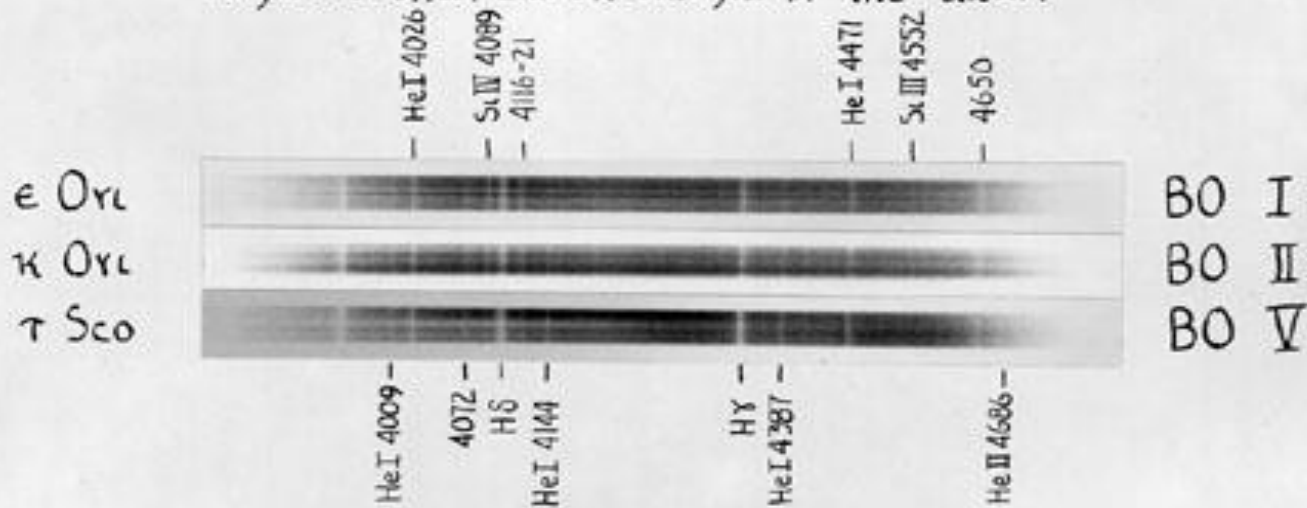



http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/frames.html



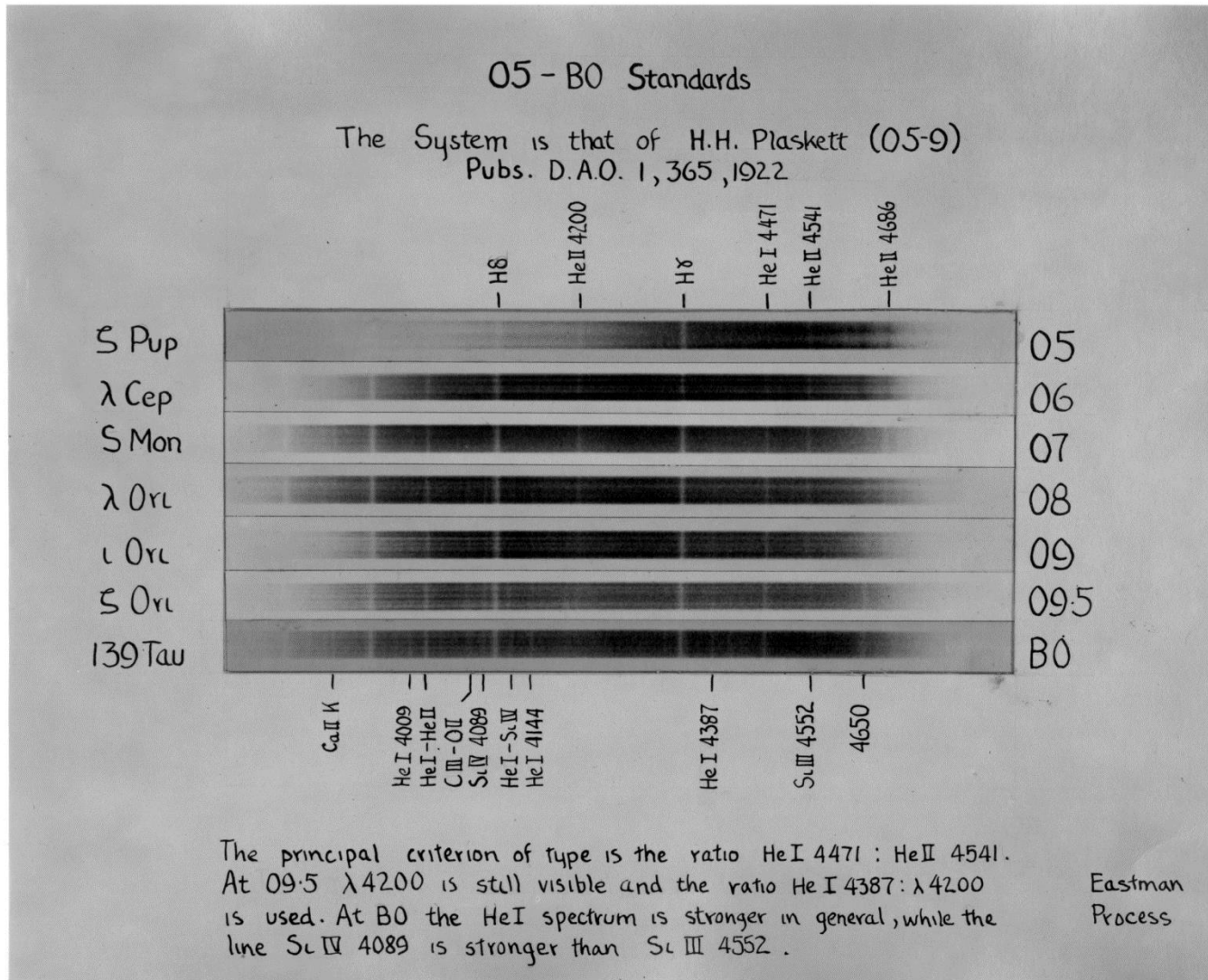
Luminosity Effects at B0

Si IV 4089 shows a progressive decrease in intensity on passing from the very luminous supergiant ϵ Ori toward the main sequence star τ Sco. The He I lines 4387, 4144 and 4009 have a negative absolute magnitude effect and are strongest in the dwarf



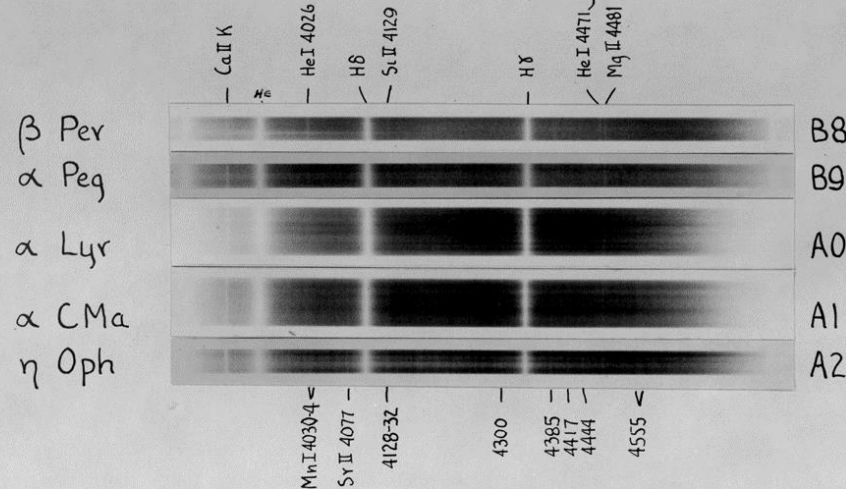
At class B0 the line at $\lambda 4200$ is absent or very much fainter than He I 4387. Si IV 4089 is stronger than Si III 4552. The following luminosity ratios are used: He I 4009: Si IV 4089, $\lambda 4072$: Si IV 4089, and $\lambda 4119$: He I 4144. The line He II 4686 is present in the dwarf, but is fainter than in class O9.5

Eastman
Process



Main Sequence B8-A2

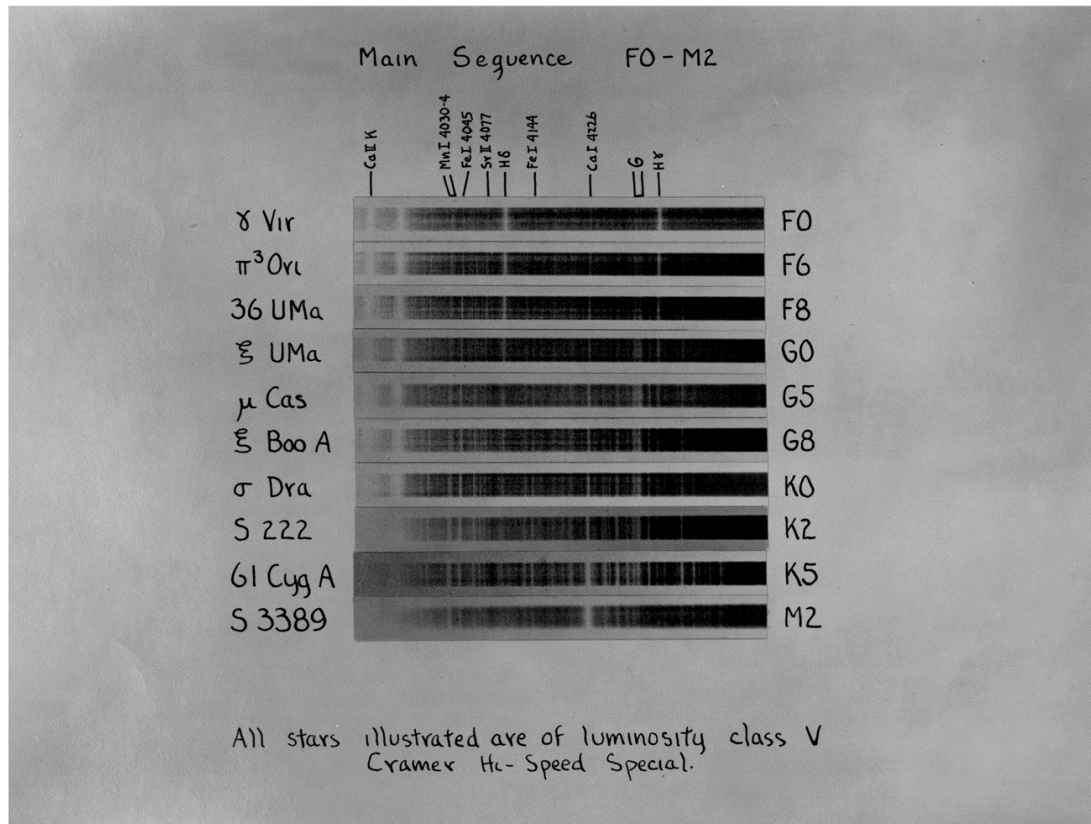
He I 4026, which is equal in intensity to K in the B8 dwarf β Per, becomes fainter at B9 and disappears at A0. In the B9 star α Peg He I 4026 = Si II 4129. He I 4471 behaves similarly to He I 4026.



The singly ionized metallic lines are progressively stronger in α CMa and η Oph than in α Lyr. The spectral type is determined from the ratios: B8, B9: He I 4026: Ca II K, He I 4026: Si II 4129, He I 4471: Mg II 4481. A0-A2: Mg II 4481: 4385, Si II 4129: Mn I 4030-4. Eastman Process

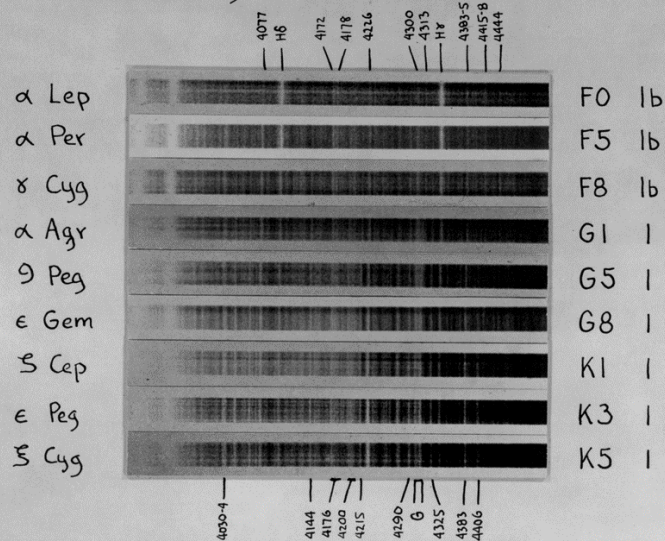
http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/frames.html

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/frames.html



Supergiants FO-K5

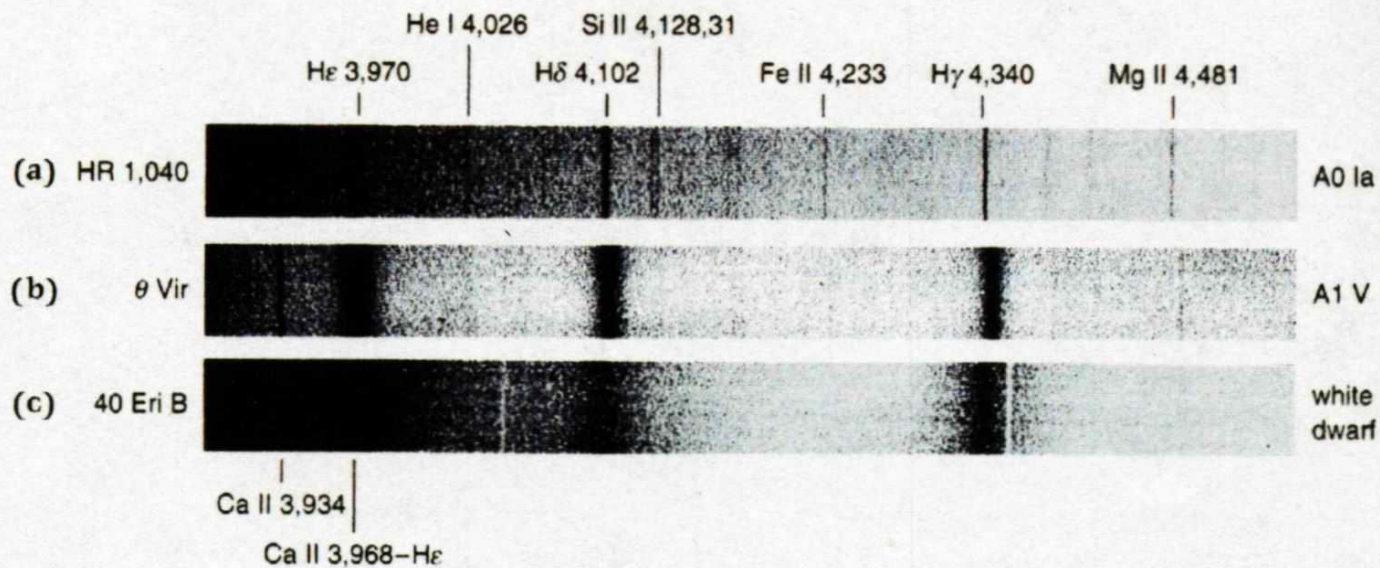
Accurate spectral types of supergiants cannot be determined by direct comparison with normal giants and dwarfs. It is advisable to compare supergiants with a standard sequence of stars of similar luminosity. Useful criteria are: Intensity of H lines (FO-G5), change in appearance



of G-band (FO-K5), growth of $\lambda 4226$ relative to H γ (F5-K5), growth of the blend at $\lambda 4406$ (G5-K5), and the relative intensity of the two blends near $\lambda 4200$ and $\lambda 4176$ (K1-K5). The last-named blend degenerates into a line at K5.
Cramer H γ -Speed Special

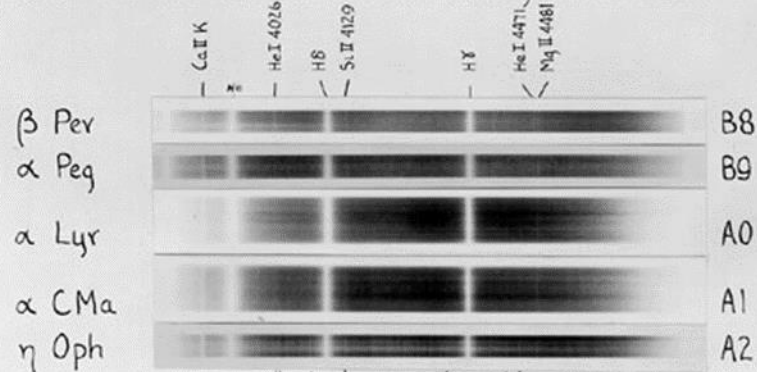
http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/frames.html

Figure 19.22 Three stars, all about the same temperature, have very different absorption line widths. **(a)** Those of the super-giant HR 1040 are very narrow. **(b)** The lines of θ Vir, an ordinary main-sequence dwarf, are broader. **(c)** The spectrum of the white dwarf 40 Eri B shows immensely broad lines.



Main Sequence B8-A2

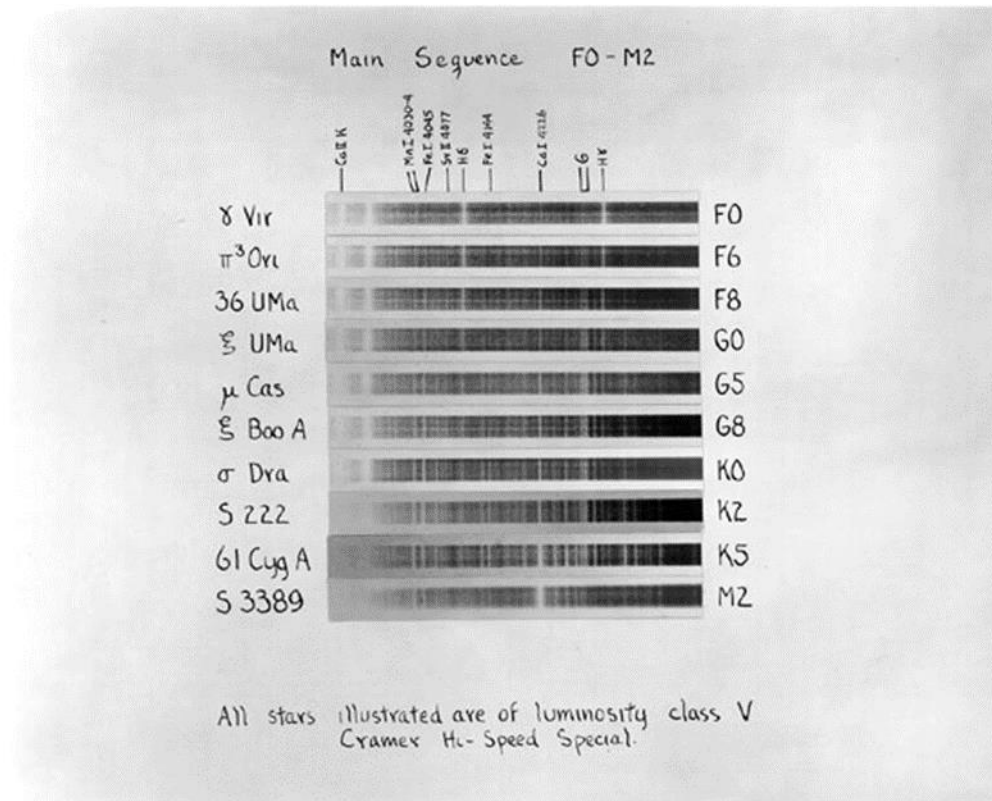
He I 4026, which is equal in intensity to K in the B8 dwarf β Per, becomes fainter at B9 and disappears at A0. In the B9 star α Peg He I 4026 = Si II 4129. He I 4471 behaves similarly to He I 4026.



The singly ionized metallic lines are progressively stronger in α CMa and η Oph than in α Lyr. The spectral type is determined from the ratios: B8, B9: He I 4026:Ca II K, He I 4026:Si II 4129, He I 4471:Mg II 4481. A0-A2: Mg II 4481:4385, Si II 4129:Mn I 4030-4.

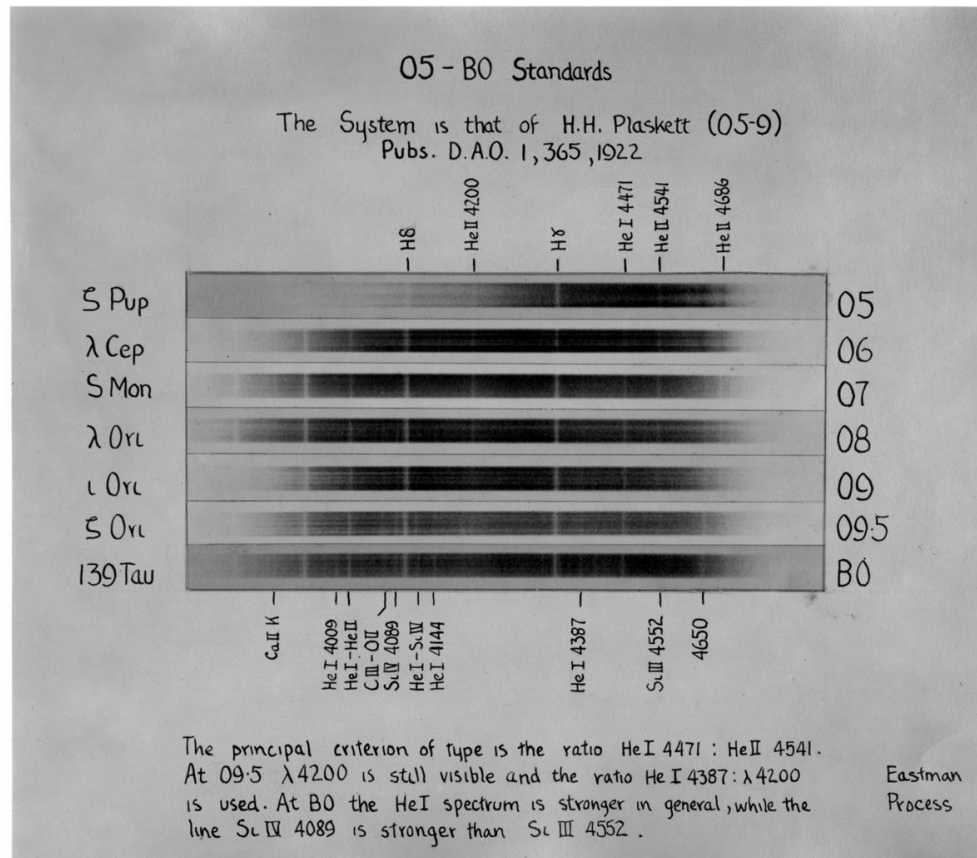
Eastman Process

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html



http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html



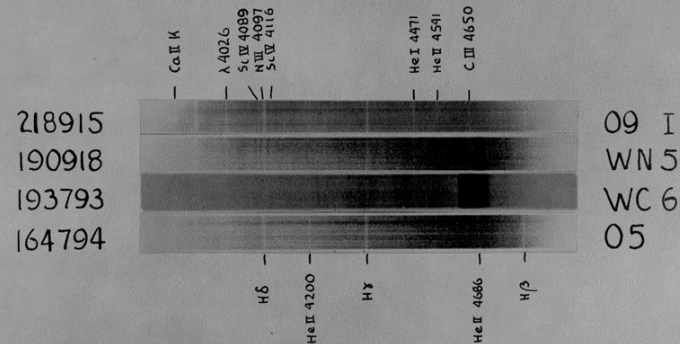


http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html



Two Wolf-Rayet Stars

The spectral types of the two Wolf-Rayet stars were determined by Sanford and Wilson (ApJ 90, 237, 1939).



HD 218915, a supergiant of class O9, has a spectrum similar to HD 190918, except for the emission lines. HD 164794 has a pure absorption spectrum which is very early in type.

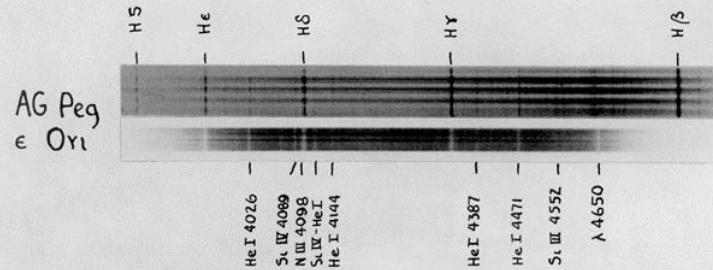
Cramer Hi-Speed Special

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html



AG Pegasi = BD +11° 4673

The spectrum is variable, and has been described in detail by Merrill. The bright lines in the spectrogram illustrated match, in general, absorption lines in the spectrum of the B0 supergiant ϵ Orionis.

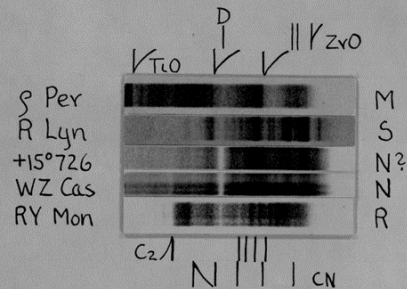


The spectrogram of AG Peg was obtained on 1941 July 19. Upper, Cramer H ϵ Speed Special; lower, Eastman Process

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

The Banded Stars In The Visual Region

The various kinds of banded spectra can be recognized and separated from each other on plates of the yellow-red region having very low dispersion. The spectrum of +15°726 was recognized as having special interest at the Dearborn Observatory. It and the spectrum of WZ Cas give

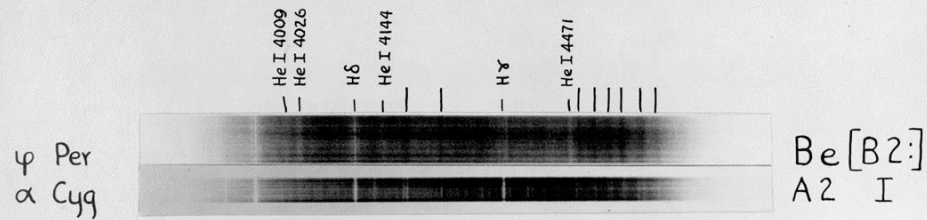


evidence of very low temperature. The plates on which the three central spectra were obtained had sensitivity extending farther into the red than did those for σ Per and RY Mon. $H\alpha$ shows as a strong emission line near the right end of the spectrum of R Lyn. The spectra extend from around λ 5400 to λ 6600 (in the case of the N and S stars).

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

The Be Star ψ Perseus

The broad absorption line spectrum consists chiefly of lines due to H and He I. The H lines are complex, and a number of emission lines are present which agree in

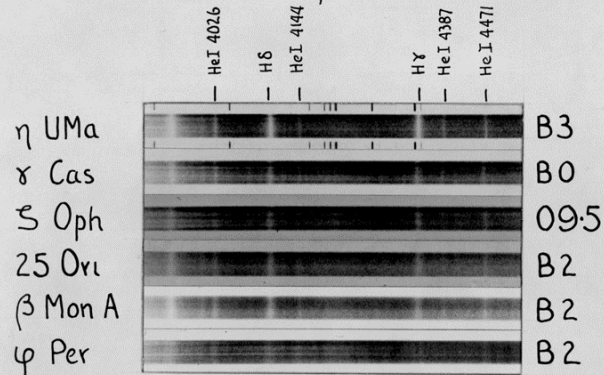


position with enhanced lines in absorption in the spectrum of α Cygni.

Eastman
Process

The Bnn Stars

The star η UMa is shown for comparison. According to Struve its rotational velocity is about 200 km/sec



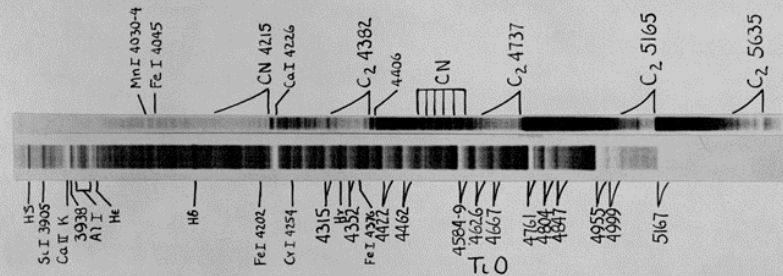
All of the other stars are of class B_e, except ξ Ophiuchi. They show spectroscopic evidence of low luminosity and are probably no brighter than main sequence stars of the same classes

Eastman
Process

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

A Carbon Star And A Long Period Variable

The spectrum of HD 52432 (upper) contains strong bands of C₂ and CN. Its spectral type on the R-N system is R5; this corresponds to an equivalent spectral type of around K4. The spectrogram was taken on Agfa Super Plenachrome Press Film.



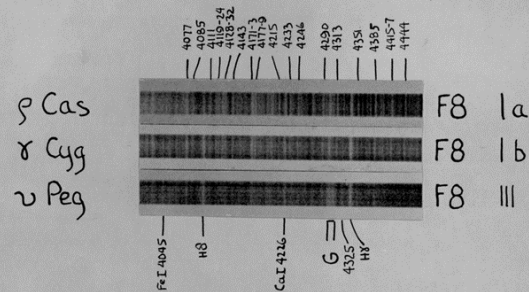
The spectrum of α Ceti (lower) has strong bands of TiO, and the ultimate lines of Ca I, Cr I and Al I are very strong in absorption. There are also a number of strong emission lines present, including the Balmer lines, Si I 3905, and Fe I 4202 and 4376. The spectrum was taken on Nov 8, 1940, when Mira was near the eighth magnitude, approaching light minimum.
Cramer H ϵ -Speed Special

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html



High Luminosity Stars At F8

There is evidence that the star ρ Cas is of exceedingly high luminosity. Its spectrum is filled with enhanced lines which are considerably stronger than in the less luminous supergiant γ Cyg. A number of lines strengthened in ρ Cas are marked at the top.

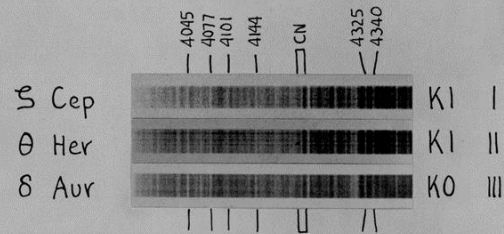


Luminosity line ratios are: $\lambda\lambda$ 4077 : H β , 4171-3 : 4226, 4385 : 4325 and 4444 : 4325. In addition, the region of the G-band has an entirely different appearance in the supergiants than in the ordinary giant ν Peg. The spectrum of δ CMa is similar to that of ρ Cas. (Cramer Hi-Speed Spectra)

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

High Luminosity Stars At K1

Luminosity line ratios are: $\lambda\lambda 4045:4077, 4101:4144, 4325:4340$. In addition, the CN break at $\lambda 4215$ has its greatest intensity (except in the carbon stars) in supergiants like ξ Cep. It is slightly weaker in θ Her and weaker still in the ordinary giant δ Aur.



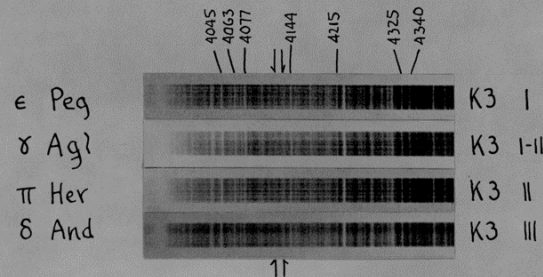
The stars ξ Cep and θ Her can be said to define the spectral type K1 for their respective luminosity classes. Their absolute magnitudes are very uncertain; ξ Cep is probably around -4 or -5, while θ Her is probably about a magnitude fainter. The absolute magnitude of δ Aur is probably near +0.5.

Cramer Hc-Speed Special

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

High Luminosity Stars At K3

Luminosity differences are shown by the ratios $\lambda\lambda$ 4045:4077, 4063:4077 and 4325:4340. The break at λ 4215 is no longer a sensitive indicator of absolute magnitude among the high luminosity stars. The ratio of the intensity of the two blends to the violet of λ 4144 changes with luminosity.



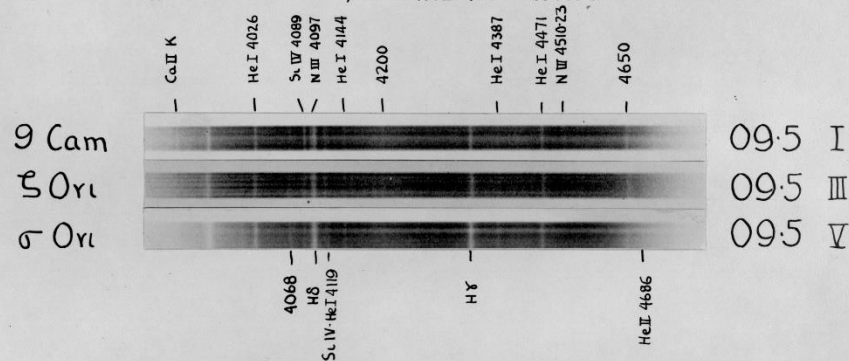
The absolute magnitude of δ And is around +1. The luminosities of the other stars are very uncertain; there can be little doubt, however, that they are arranged in order of decreasing luminosity. The absolute magnitude of ϵ Peg is probably around -4 or -5.

Cramer H_c-Speed Special

http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/ASS_Atlas/MK1.html

Luminosity Effects at O9.5

The lines of Si IV and N III are very strong in the spectrum of the supergiant θ Cam; They are fainter in the dwarf σ Ori. Luminosity line ratios are: Si IV 4089: λ 4068, λ 4119: He I 4144, He I 4387: N III 4516, and He II 4686: λ 4650.



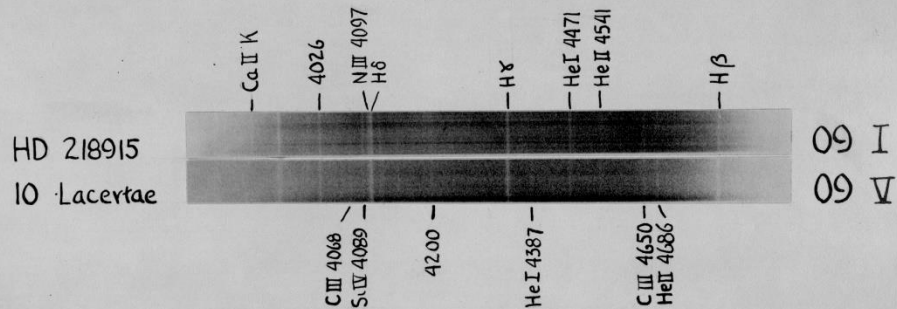
At class O9.5 He II 4541 is weak or absent on plates of the dispersion indicated. The line at λ 4200 is faintly visible and is of about the same intensity as He I 4387, except in the dwarfs. He II 4686 is intermediate in intensity between O9 (10 Lac) and B0 (τ Sco) in the main sequence star σ Orionis.

Eastman Process



Luminosity Effects at O9

HD 218915 appears to be a pronounced supergiant, while 10 Lacertae is an ordinary main sequence star



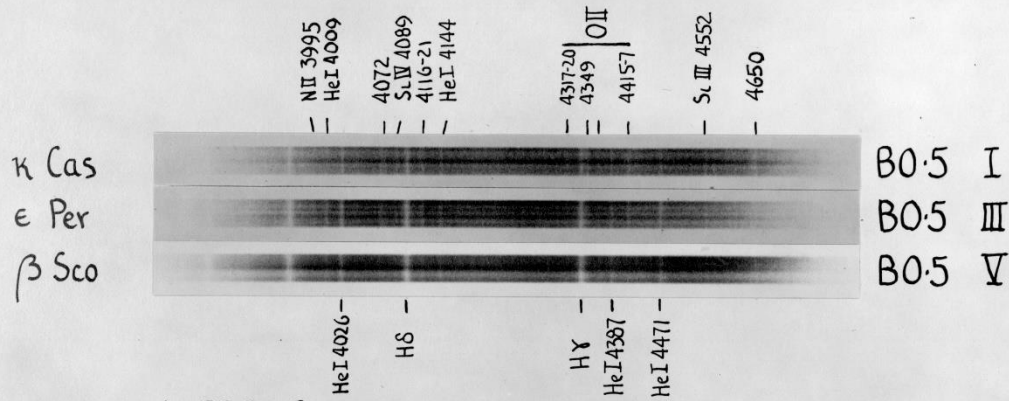
The spectral type is determined from the ratio
He I 4471 : He II 4541

The difference in luminosity is shown by the ratios C III 4068 : Si IV 4089, He I 4387 : He II 4541 and C III 4650 : He II 4686

Cramer
H ϵ -Speed

Luminosity Effects at B0.5

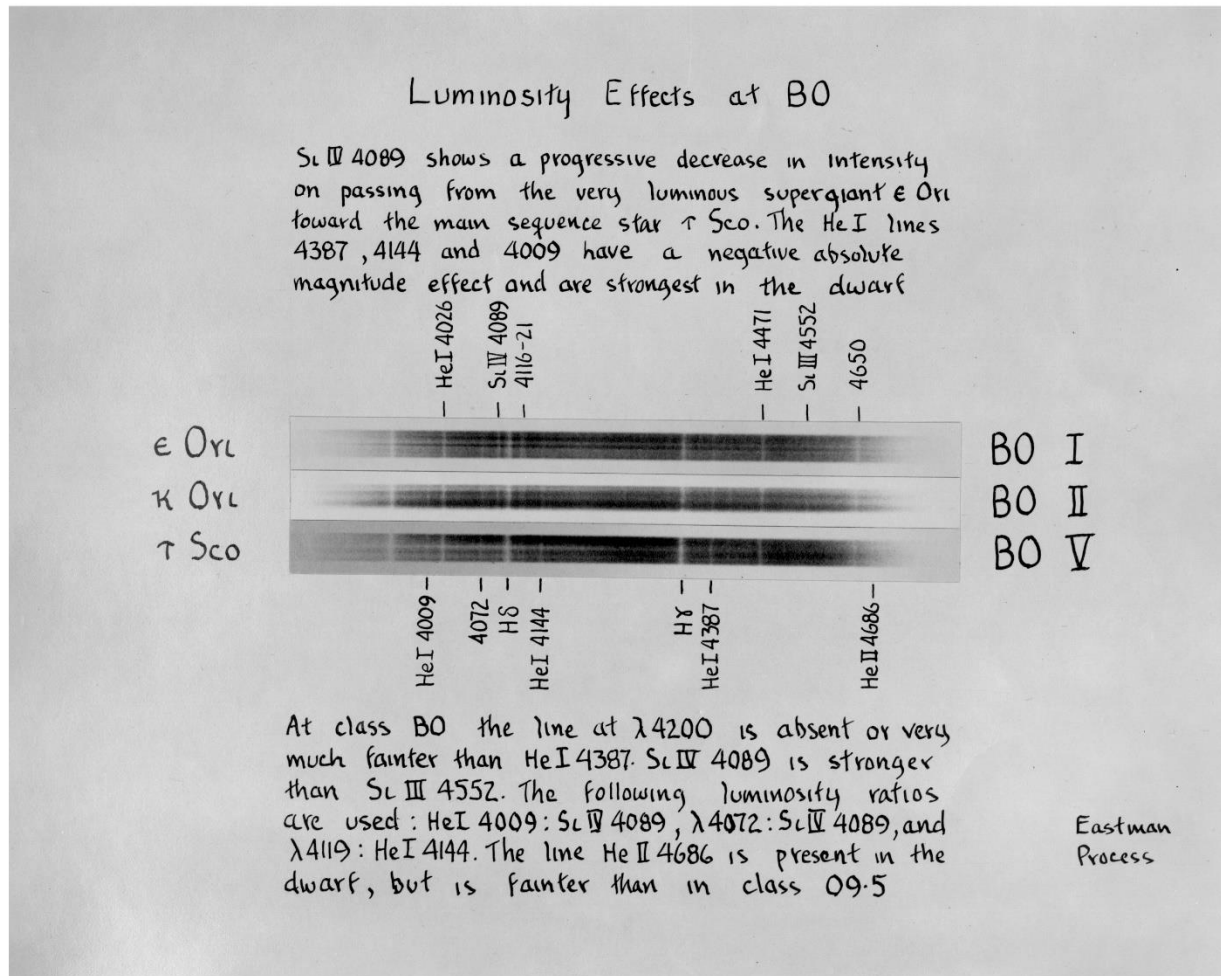
The lines of OII in the vicinity of H γ are very strong in the spectrum of the supergiant κ Cas and grow progressively fainter with decreasing luminosity. The lines of NII and Si III behave similarly.



At B0.5 Si III 4552 is approximately equal in intensity to Si IV 4089. The appearance of the blend at λ 4640-50 is intermediate between B0 and B1. Absolute magnitude line ratios are: NII 3995: HeI 4009, λ 4119: HeI 4144, OII 4349: HeI 4387 and OII 4416: HeI 4387

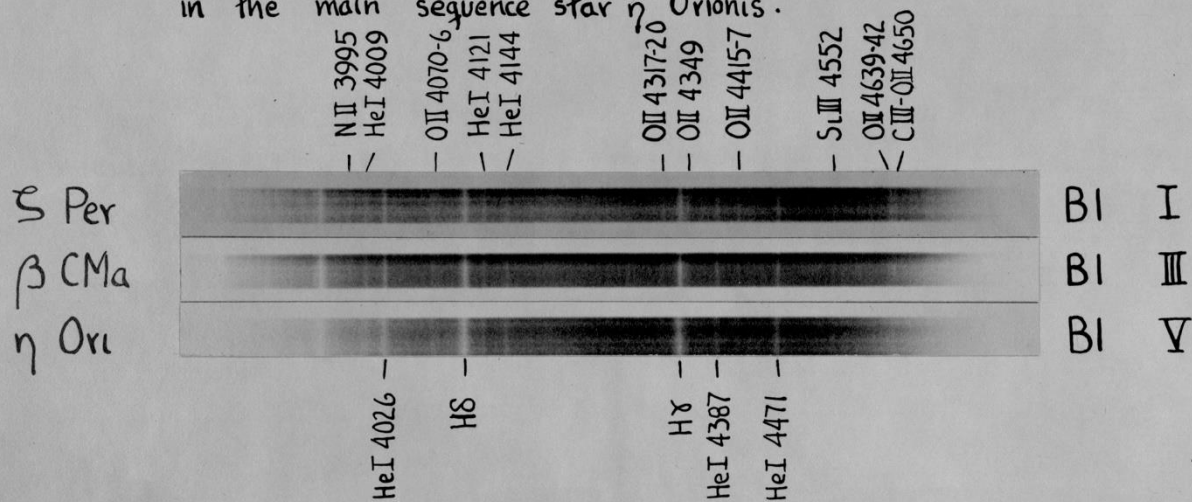
Eastman
Process





Luminosity Effects at B1

The lines of OII in the neighborhood of H γ are very strong in the spectrum of the supergiant ζ Per. They are weaker in β CMa — a star somewhat fainter than the brightest supergiants — and are weaker still in the main sequence star η Orionis.

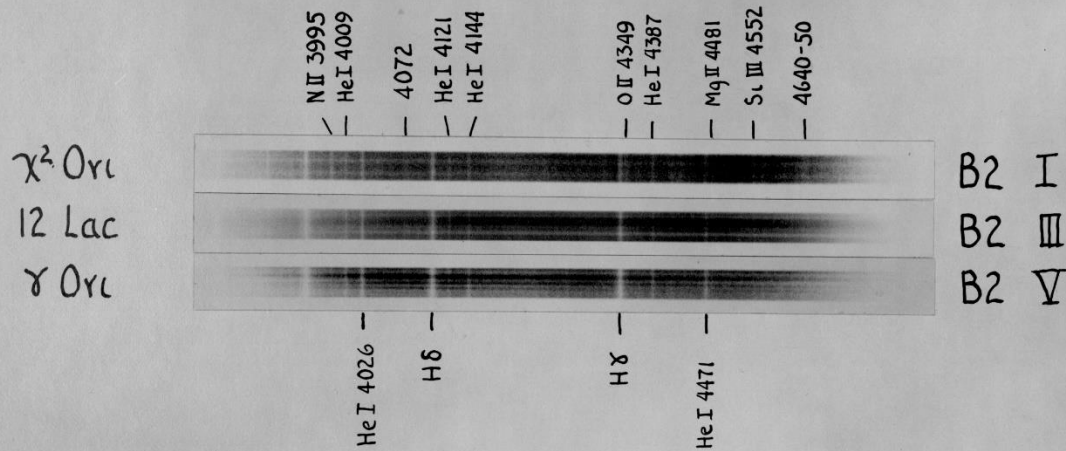


The spectral type at B1 is defined by the following: SiIII 4552 is stronger than SiIV 4089; the blend near λ 4070 is well-marked; the double feature at λ 4640-50 is present and the two components are of approximately the same intensity. The following ratios vary with luminosity: NII 3995 : HeI 4009, HeI 4121 : HeI 4144, HeI 4144 : OII 4416, and HeI 4387 : OII 4416.

Eastman
Process

Luminosity Effects at B2

The lines N II 3995 and Si II 4552 are very strong in the supergiant χ^2 Orionis. The H lines show a pronounced negative absolute magnitude effect.



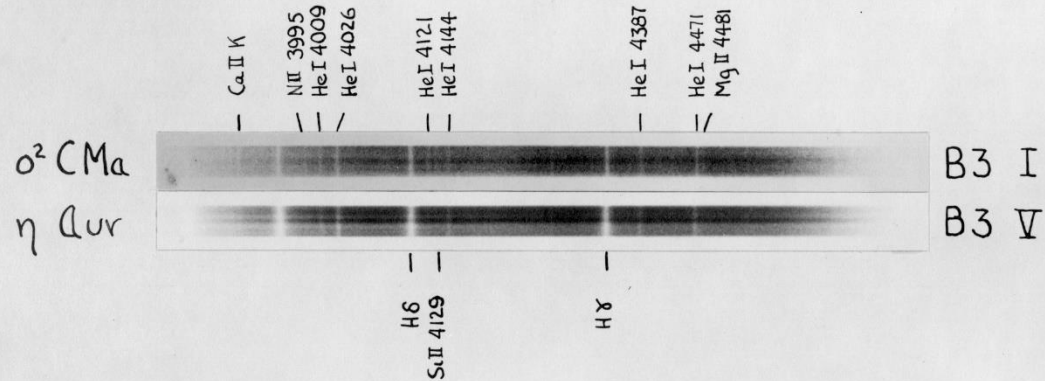
The blend near λ 4072 is weaker than at B1. The Si II doublet 4128-30 is fainter than in class B3. Luminosity line ratios are: N II 3995: He I 4009, He I 4121: He I 4144 and Si II 4552: He I 4387

Eastman
Process



Luminosity Effects at B3

The H lines show a marked negative absolute magnitude effect. Luminosity line ratios are:
NII 3995 : HeI 4009 and HeI 4121 : HeI 4144.

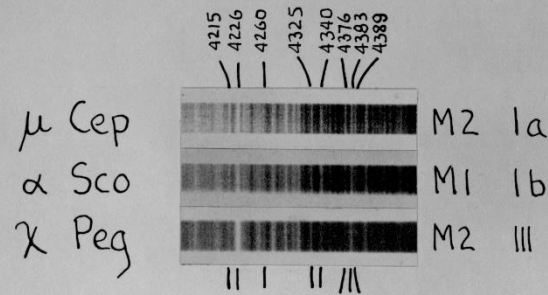


The Si II blend at $\lambda 4129$ is slightly weaker than or equal to HeI 4121 at spectral type B3, on plates similar to the ones illustrated.

Eastman Process

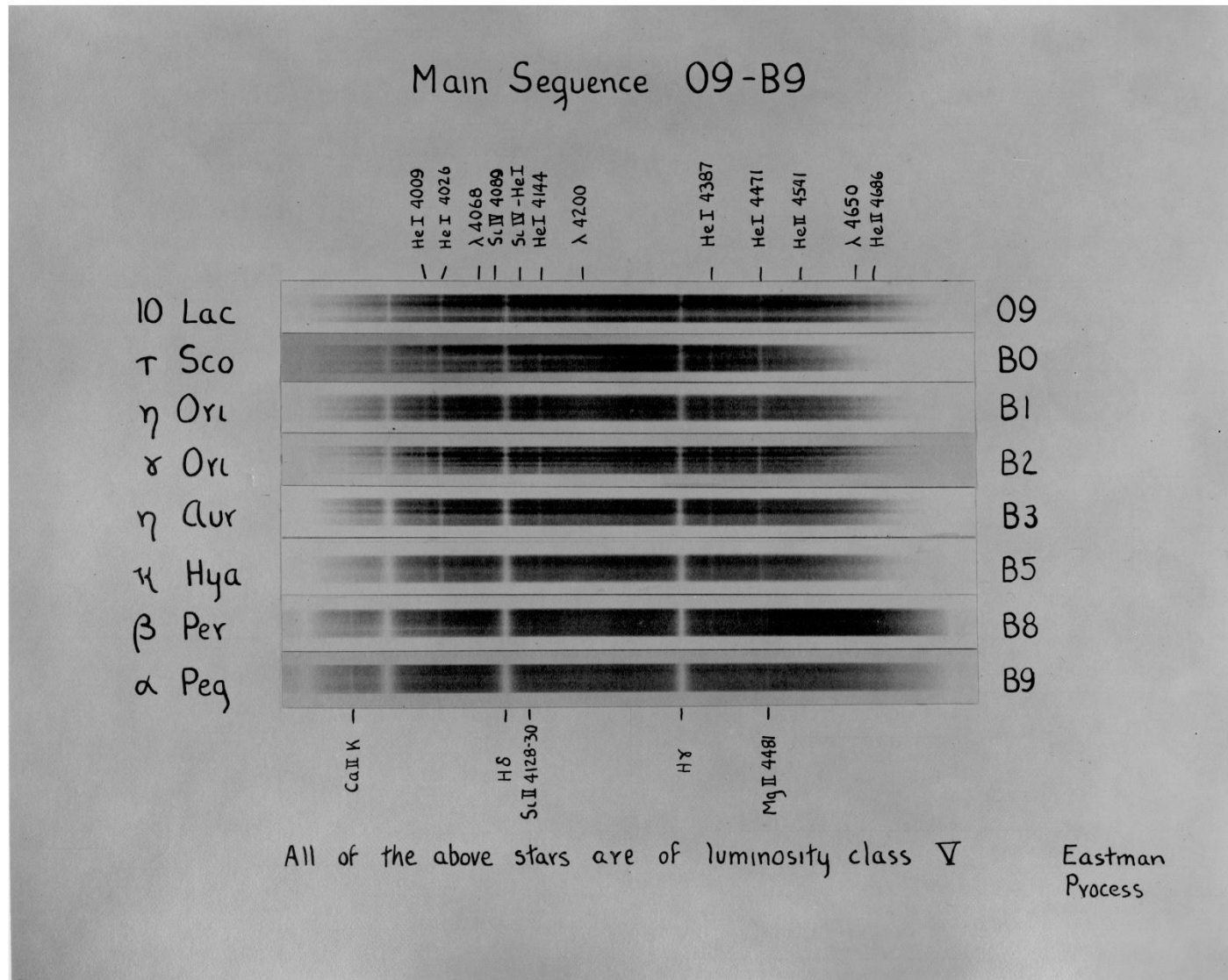
Luminosity Effects In The Early M Giants

The spectral types were determined from the intensity of the green TiO bands, which are not shown in the illustration. The line CaI 4226 has a pronounced negative absolute magnitude effect. The CN break at $\lambda 4215$ is present in μ Cep, possibly faintly present in α Sco, and probably absent in χ Peg.



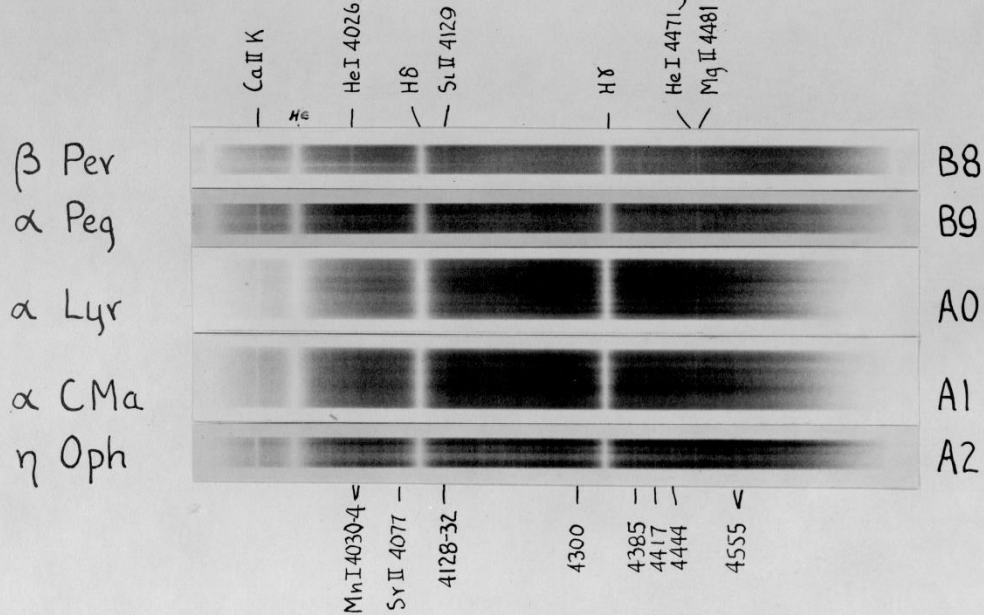
Luminosity line ratios are: $\lambda\lambda$ 4215:4260, 4376:4383, and 4389:4383. The absolute magnitude of μ Cep is probably around -6, that of α Sco is near -4.0. χ Peg appears to be an ordinary M giant with an absolute magnitude of about 0.
 Cramer Hi-Speed Special





Main Sequence B8-A2

He I 4026, which is equal in intensity to K in the B8 dwarf β Per, becomes fainter at B9 and disappears at A0. In the B9 star α Peg He I 4026 = Si II 4129. He I 4471 behaves similarly to He I 4026.



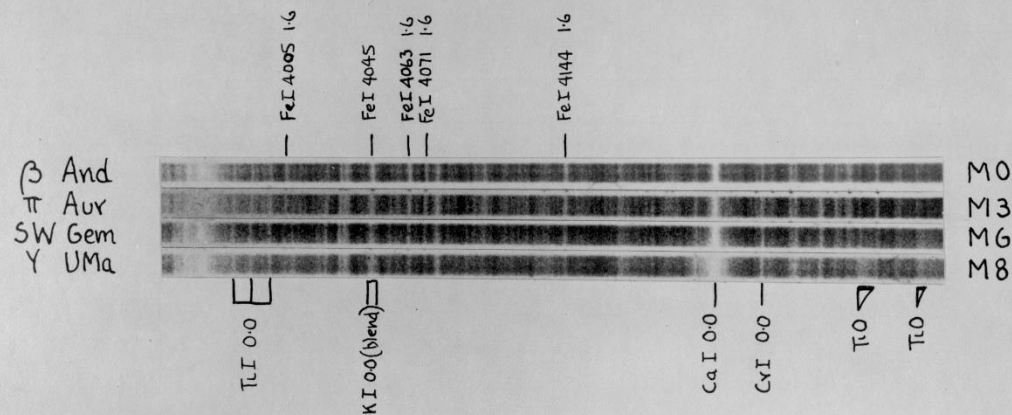
The singly ionized metallic lines are progressively stronger in α CMa and η Oph than in α Lyr. The spectral type is determined from the ratios: B8, B9: He I 4026:Ca II K, He I 4026:Si II 4129, He I 4471:Mg II 4481. A0-A2: Mg II 4481:4385, Si II 4129:Mn I 4030-4.

Eastman Process

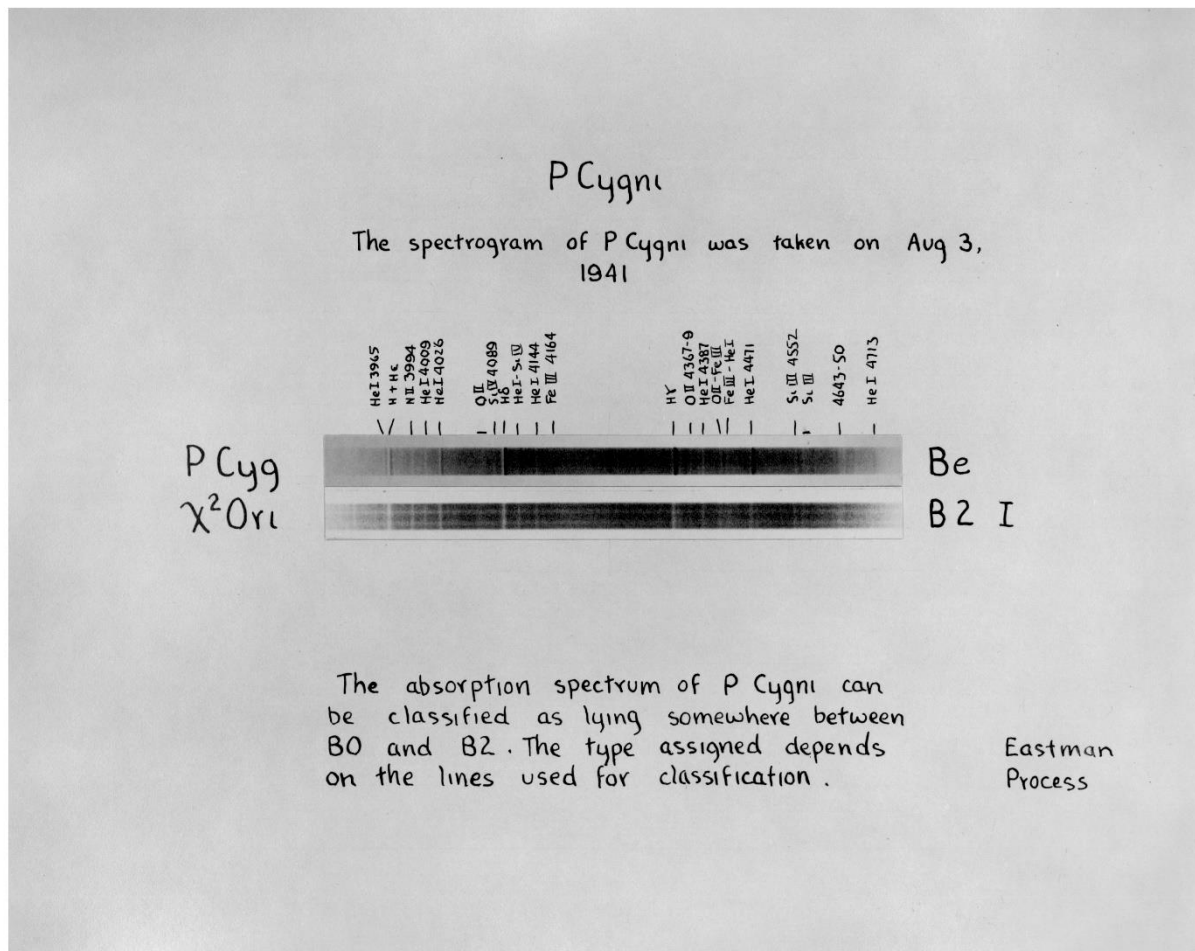


The M Sequence Is A Temperature Sequence

The spectral types of the four stars were determined from the TiO bands in the blue-green region (not shown in the illustration). The arrangement in order of increasing band absorption has the following characteristics: the strong FeI lines having excitation potentials of around 1.6 volts grow systematically weaker; ultimate lines of TiI, CaI and CrI grow systematically stronger;

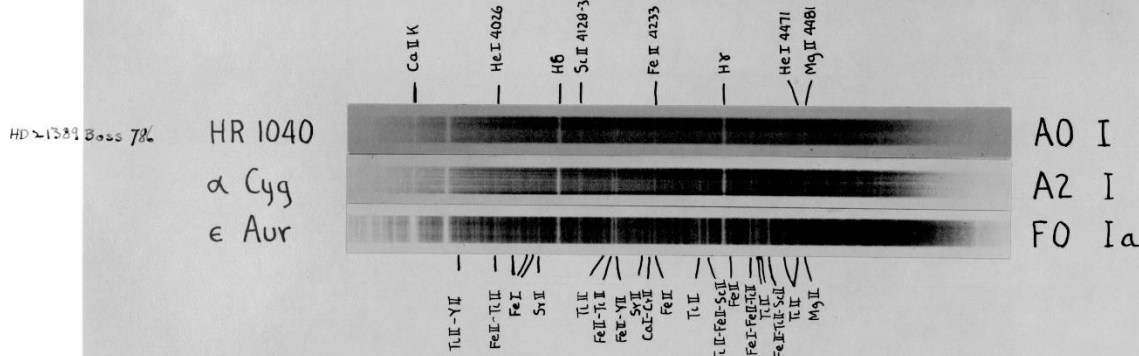


the KI pair situated on each side of FeI 4045, and blended with it on the spectra shown, become systematically stronger. This is shown by the change in the width of the line from M0 to M8. These changes indicate that stars having the strongest bands have also the lowest excitation temperatures among the M stars. They thus show that the TiO bands do not pass through a maximum of intensity. The plates were taken by Keenan with the McDonald 82-inch reflector and a spectrograph giving a dispersion of 65 Å per mm at λ 4200. The progressive change in the line spectra of M giants was first described in detail by Merrill and his associates at Mount Wilson. Agfa Super Plenachrome Press



Supergiants AO-FO

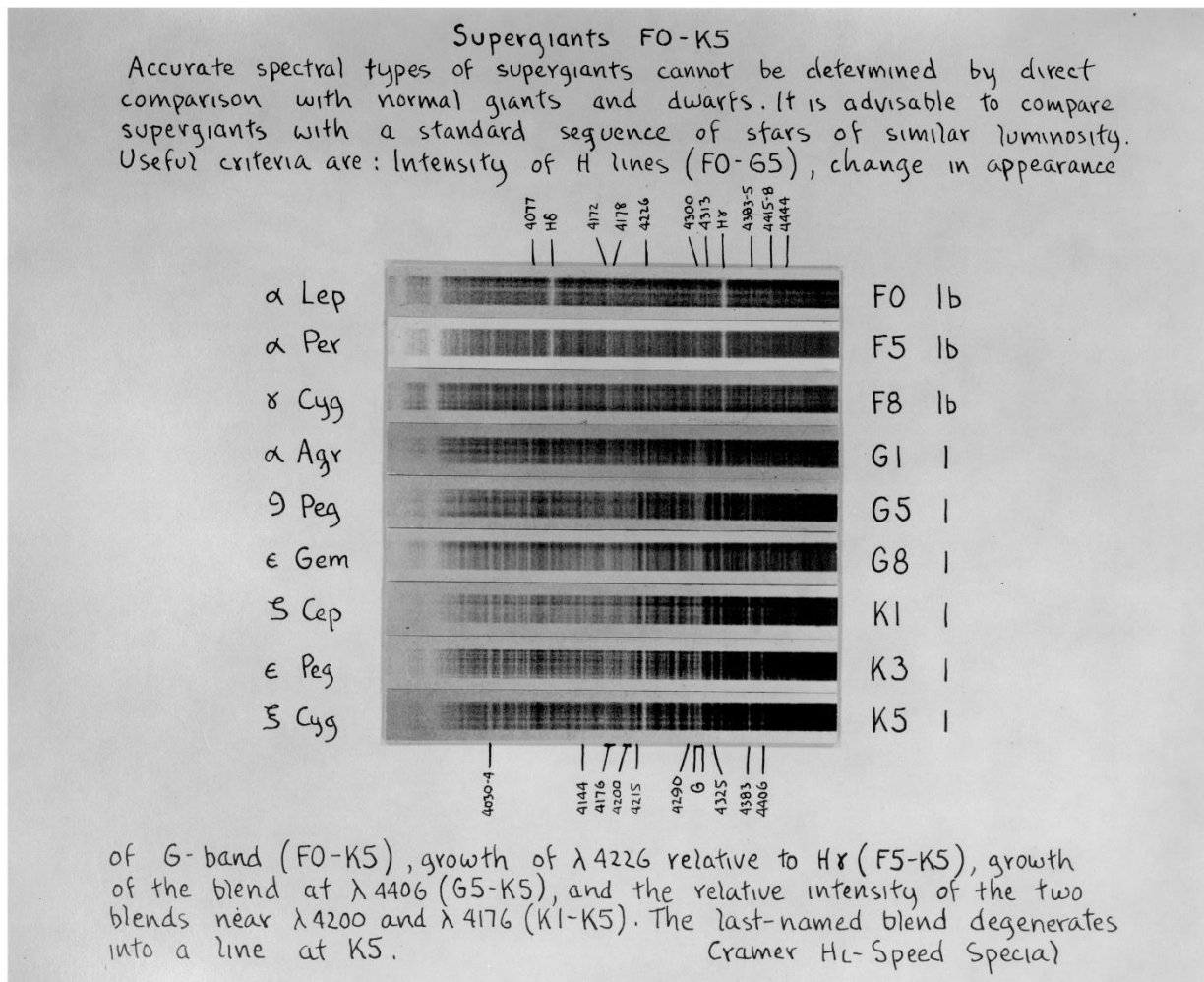
The strongest lines of HeI are faintly visible in HR 1040. They are not visible on low dispersion spectra of α Cygni. The lines of FeII are very strong in the spectrum of α Cygni and are of about the same intensity in ϵ Aurigae. The lines of TiII and SrII are considerably stronger in ϵ Aurigae.



The classification of the supergiants of type AO and later is a difficult problem. Their spectra differ so much from stars of lower luminosity that line ratios suitable for the latter cannot be used. Supergiants of classes A to M can be best classified by referring them to a normal sequence of high luminosity stars whose spectra as a whole can be considered to define the class assigned.

Eastman Process





Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Ξενοφών Δ. Μουσάς 2015. «Εισαγωγή στην Αστροφυσική. Φυσική των Αστέρων». Έκδοση :1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση : <http://opencourses.uoa.gr/courses/PHYS1/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

