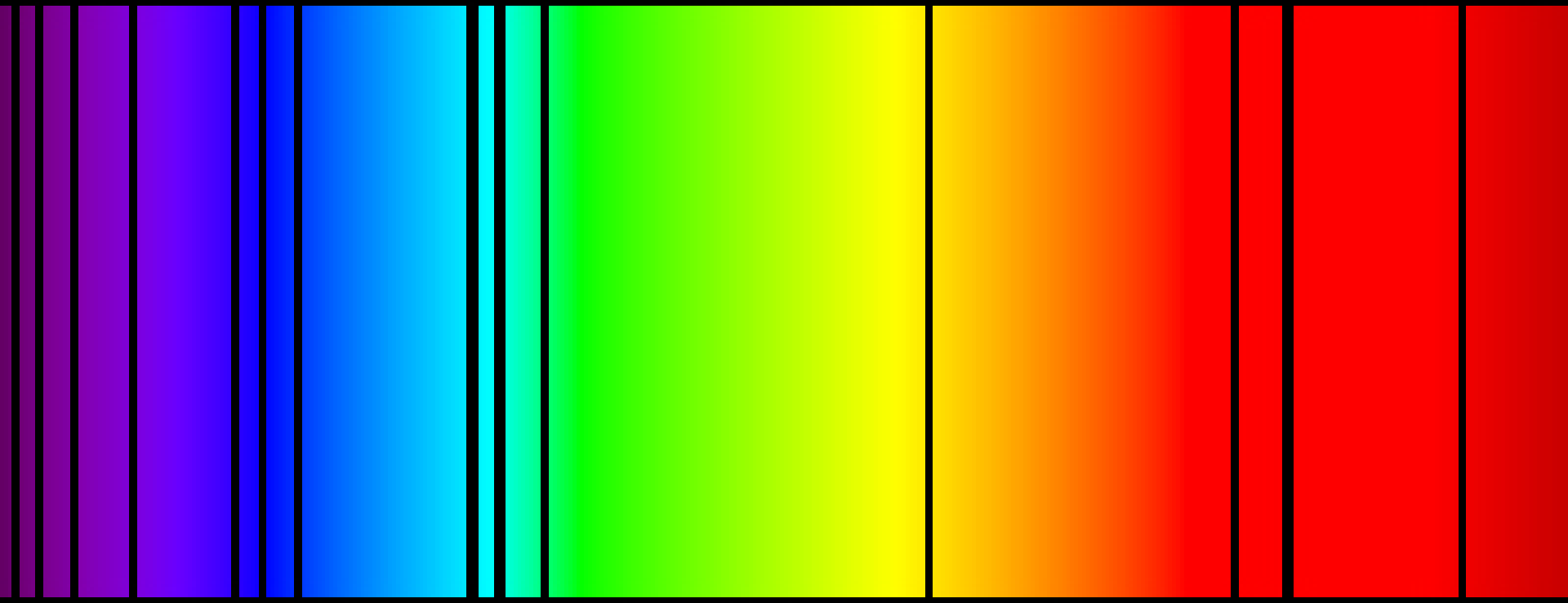
ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΤΕΡΩΝ



Εισαγωγή στην κβαντομηχανική και στην ατομική Φυσική

ΦΩΣ = Ηλεκτρομαγνητικό κύμα με σωματιδιακές ιδιότητες (δυική φύση)

Τα «σωματίδια» του φωτός ονομάζονται ΦΩΤΟΝΙΑ και έχουν μηδενική μάζα και ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο

Η ενέργεια των φωτονίων είναι κβαντισμένο μέγεθος και διαδίδεται σε κυματοπακέτα

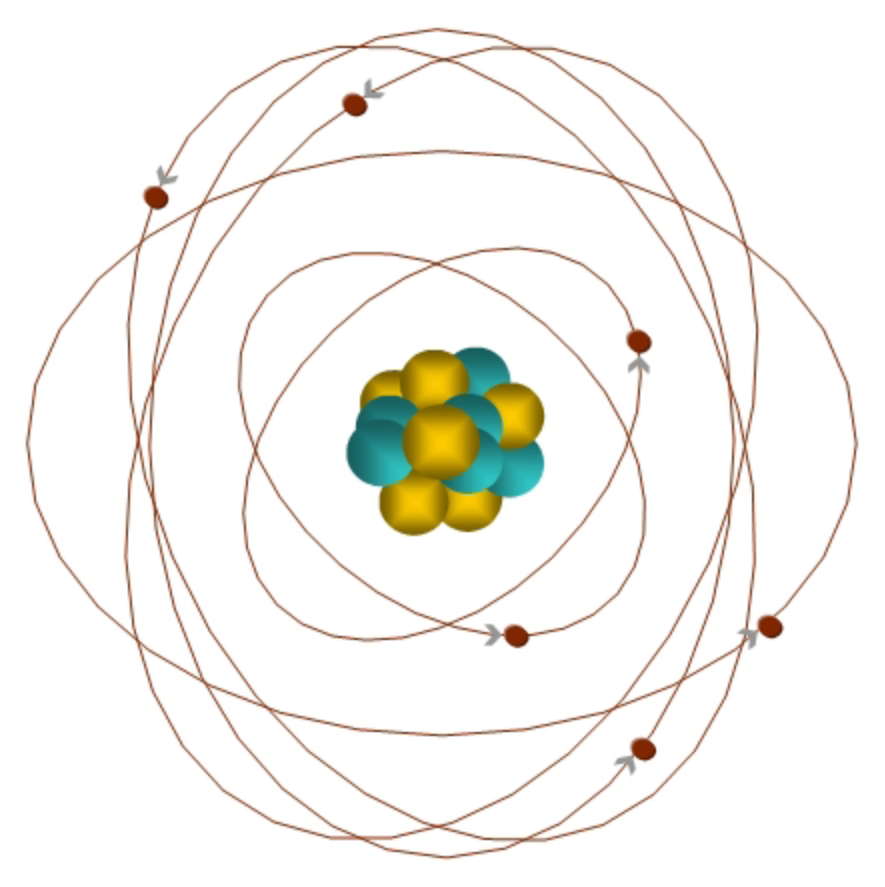
=

ΚΒΑΝΤΑ ΦΩΤΟΣ

$$E = h\nu$$

Από τους νόμους της κυματικής ισχύει: $c = \lambda \nu$

Ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα (πρωτόνια και νετρόνια) και τα ηλεκτρόνια του σε «τροχιές» γύρω από αυτόν (Bohr)



Συνολικά τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα

Οι «τροχιές» των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα είναι ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΕΣ

Θέτουμε ως **n** τον αριθμό των τροχιών (ή σταθμών) γύρω από τον πυρήνα, και τον ονομάζουμε ***κύριο κβαντικό αριθμό*** και προφανώς μπορεί να πάρει μόνο ακέραιες τιμές (1, 2, …)

Ο De Broglie έδειξε ότι οι τροχιές των ηλεκτρονίων μπορούν να περιγραφούν με στάσιμα κύματα

Επομένως μία κυκλική τροχιά μήκους **2πr** θα έπρεπε να ισούται με **n** φορές το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου:

$$2\pi r = n\lambda$$

Σύμφωνα με την ΚΛΑΣΣΙΚΗ μηχανική:

Κεντρομόλος δύναμη = Ελκτική δύναμη πυρήνα-ηλεκτρονίου

$$m_e\, u^2/r = -Z\, k_e\, e^2 / r^2$$

$$\rightarrow$$

$$\mathbf{u^2 = Z\, k_e\, e^2 / m_e\, r}$$

Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου: $E_{ολ} = E_{\Delta} + E_K = Z\, k_e\, e^2 / r + mu^2/2$

$$\rightarrow$$

$$E_{ολ} = -\, Zk_e\, e^2 / 2\, r$$

Σύμφωνα με την ΚΒΑΝΤΙΚΗ μηχανική:

Η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς του Planck (h/2π)

$$L = mur = nh/2\pi \rightarrow r = n\,h/2\pi mu \rightarrow$$

$$\mathbf{r_n = n^2\,[h^2/(2\pi)^2\,Z\,k_e\,e^2\,m_e] = n^2\,r_1}$$

Η r_1 είναι η μικρότερη δυνατή απόσταση (ακτίνα) ενός ηλεκτρονίου από τον πυρήνα

Αντικαθιστώντας στην ενέργεια βρίσκουμε:

$$\mathbf{E = E_1/n^2}$$

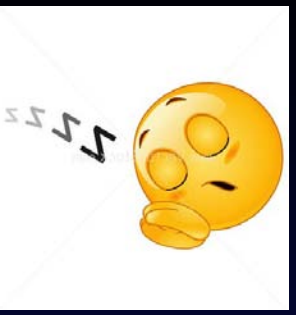
Όπου η ενέργεια για n=1 καλείται και θεμελιώδης ή βασική

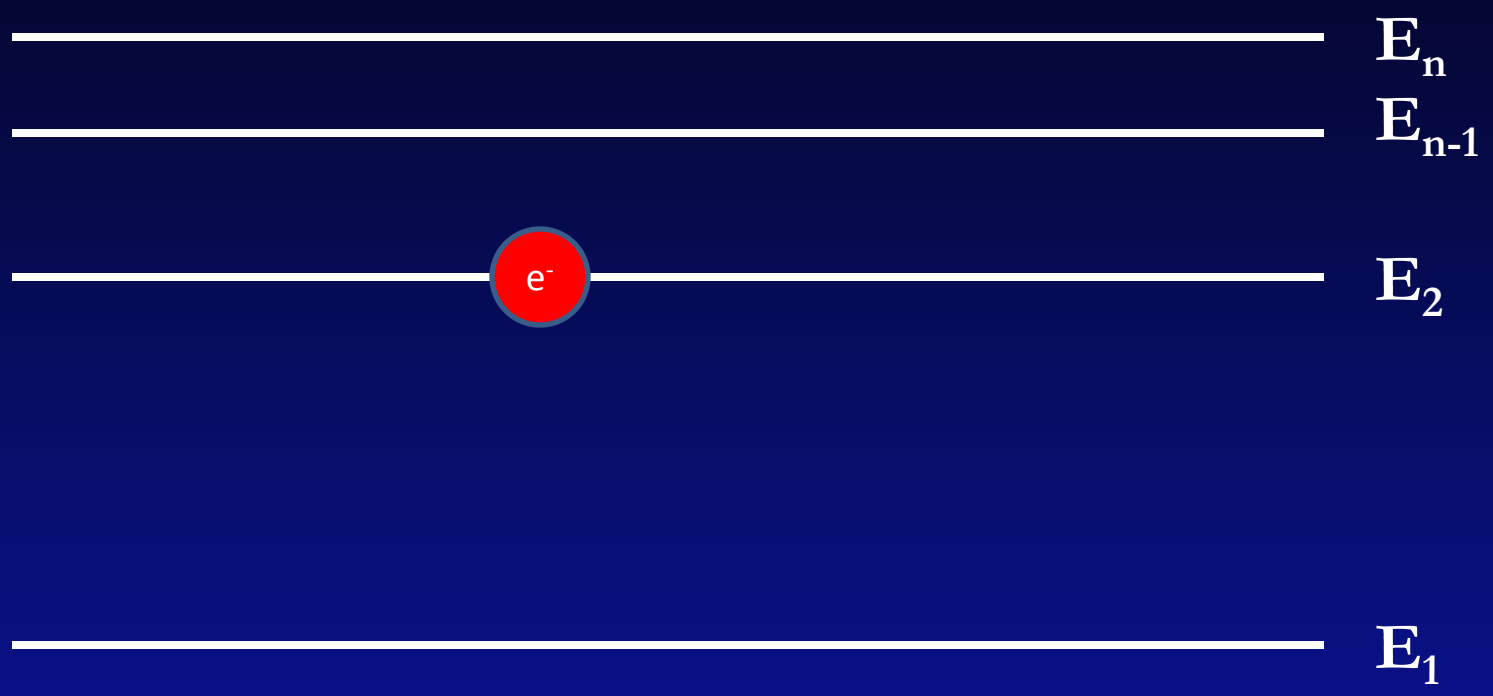
Λόγω της αρχής της αβεβαιότητας του Heisenberg δεν είμαστε σε θέση ΠΟΤΕ να γνωρίζουμε την θέση και την ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου ταυτόχρονα

$$\Delta x\,\Delta p >= h/2\pi$$

Επομένως η έννοια της τροχιάς (κίνηση από μία θέση σε μία άλλη) στην κβαντική μηχανική αντικαθίσταται από την ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ να εντοπίσουμε ένα ηλεκτρόνιο σε απόσταση r από τον πυρήνα

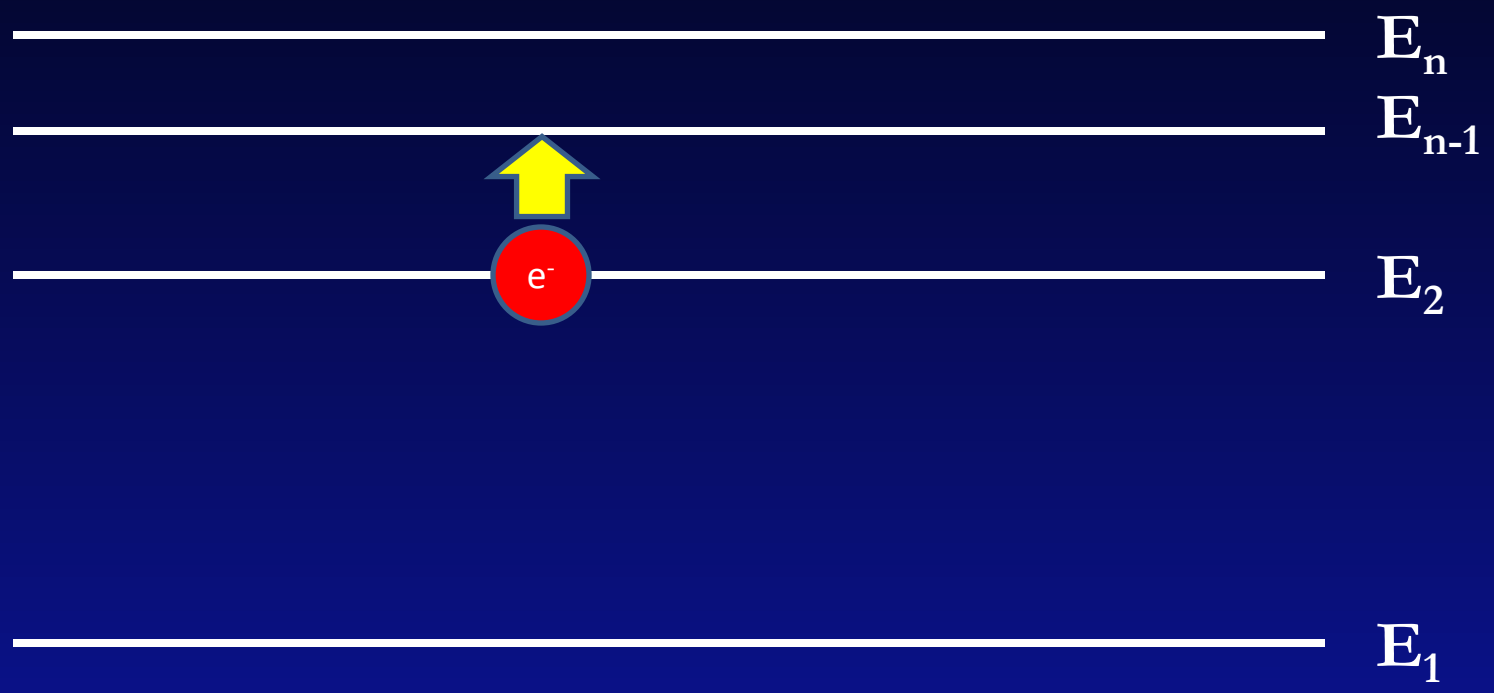
Άτομο σε ηρεμία (T=0 K)





ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Άτομο σε διέγερση
Λόγω θερμοκρασίας



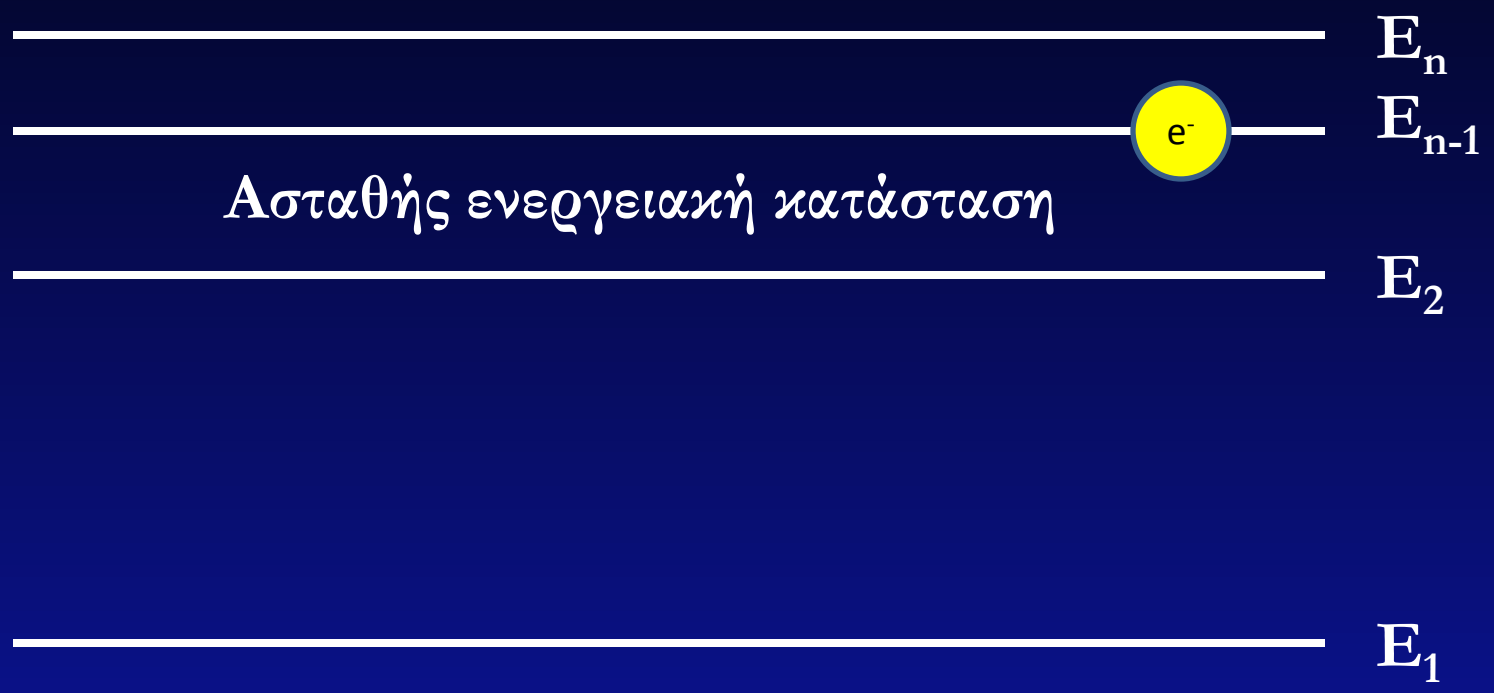
ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Άτομο σε διέγερση
Λόγω κρούσης με φωτόνια

Απορρόφηση φωτονίου → κέρδος ενέργειας

ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

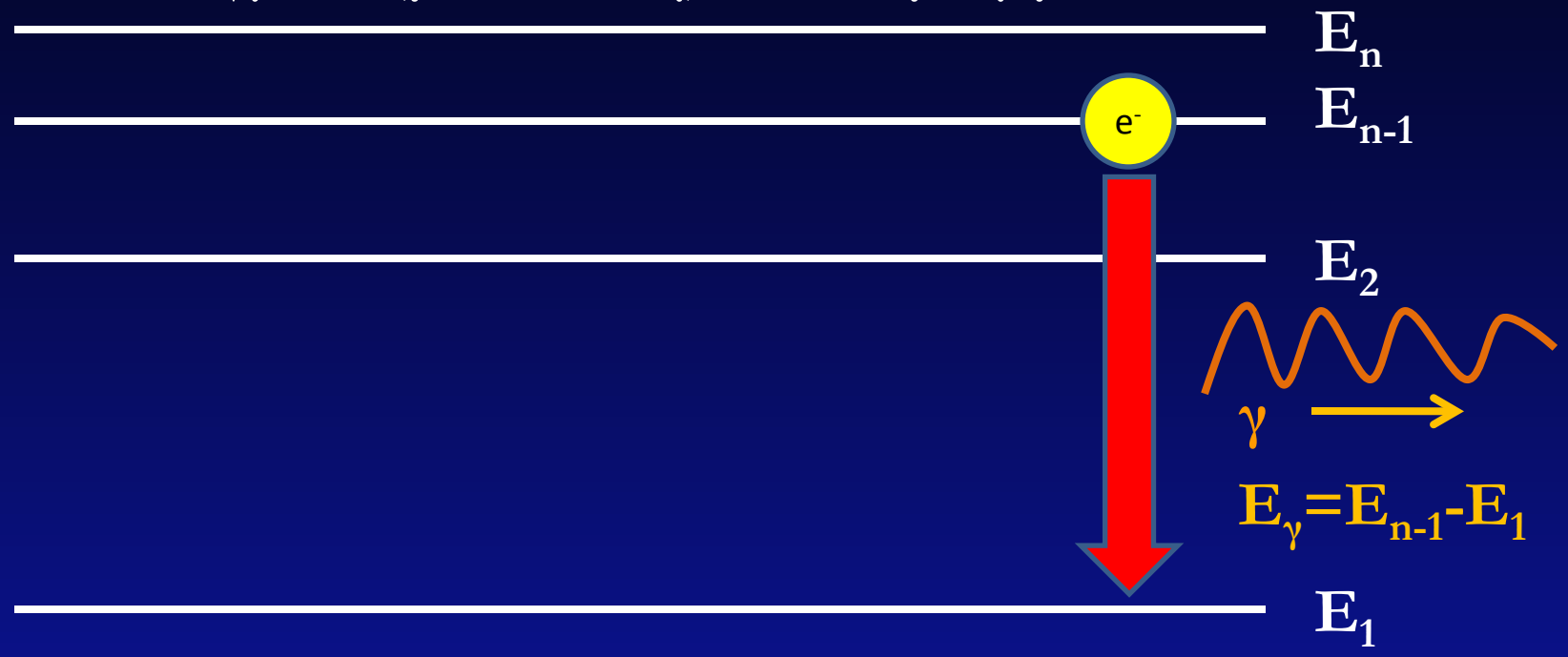
Άτομο σε διέγερση



ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Άτομο σε αποδιέγερση

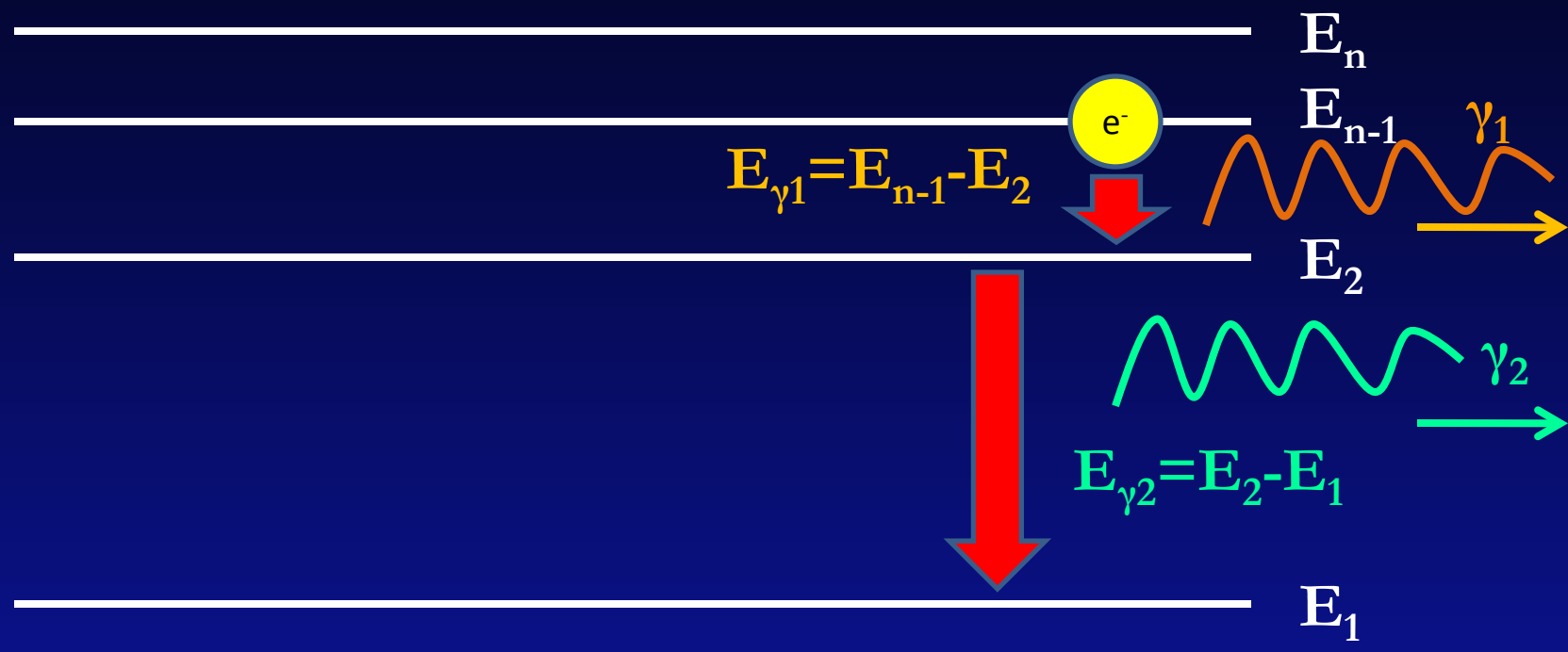
Επιστροφή στην αρχική ενεργειακή κατάσταση →
Απώλεια ενέργειας (μετάπτωση) + εκπομπή φωτονίου



ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Άτομο σε αποδιέγερση

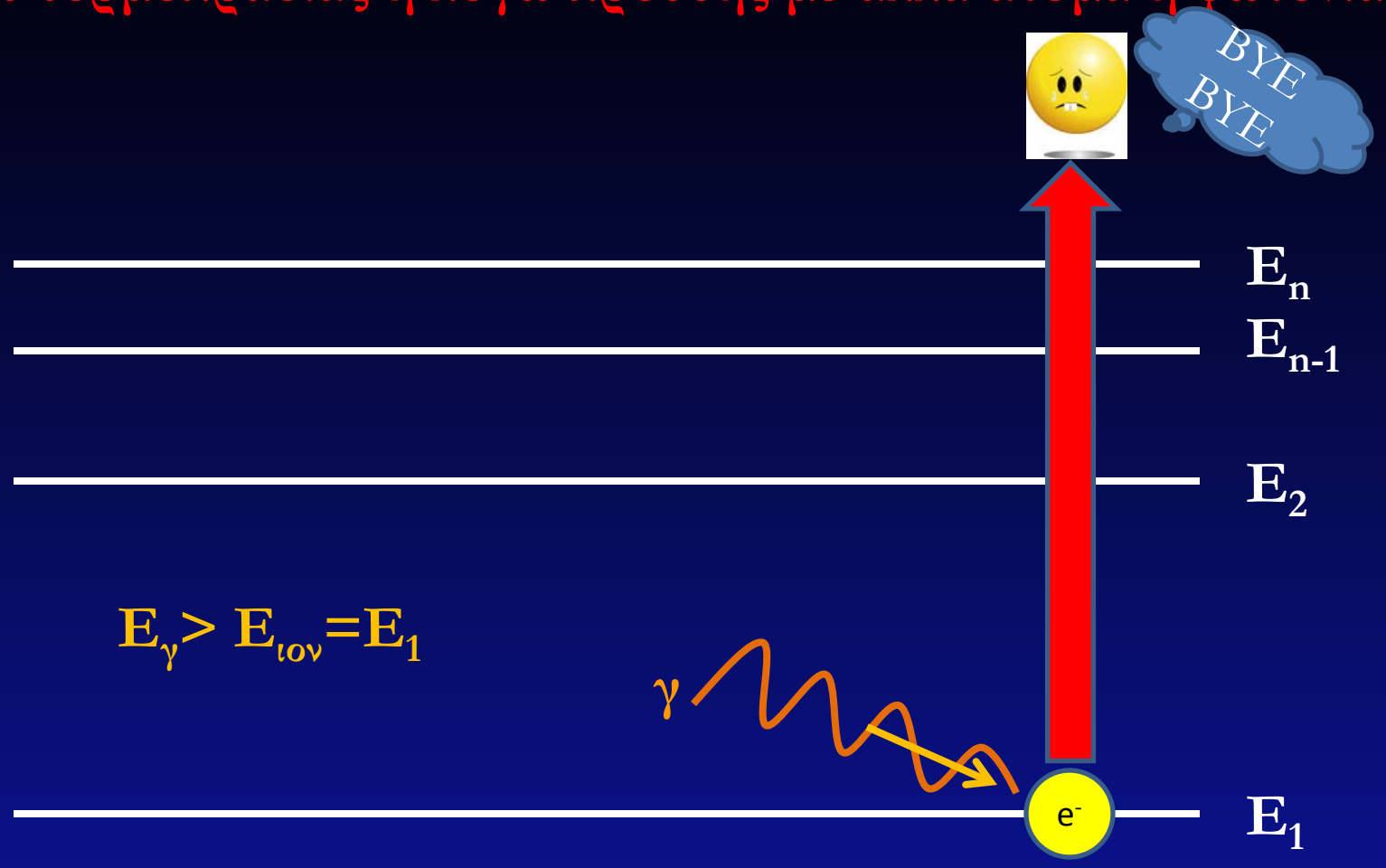
Επιστροφή στην αρχική ενεργειακή κατάσταση με διαφορετική διαδρομή → Απώλεια ενέργειας (μεταπτώσεις) + εκπομπή δύο (ή περισσότερων) φωτονίων



ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Ιονισμός ατόμου

Λόγω θερμοκρασίας ή λόγω κρούσης με άλλα άτομα ή φωτόνια



ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

Ο ιονισμός ενός ατόμου μπορεί να είναι πολλαπλός κι εξαρτάται από τα ηλεκτρόνια που διαθέτει (π.χ. ^{56}Fe)

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το άτομο βρίσκεται σε θερμοκρασία τέτοια που να το επιτρέπει ή όταν φωτόνια διαφορετικής ενέργειας προσπίπτουν επάνω του

Οι βαθμοί ιονισμού συμβολίζονται με λατινικά γράμματα

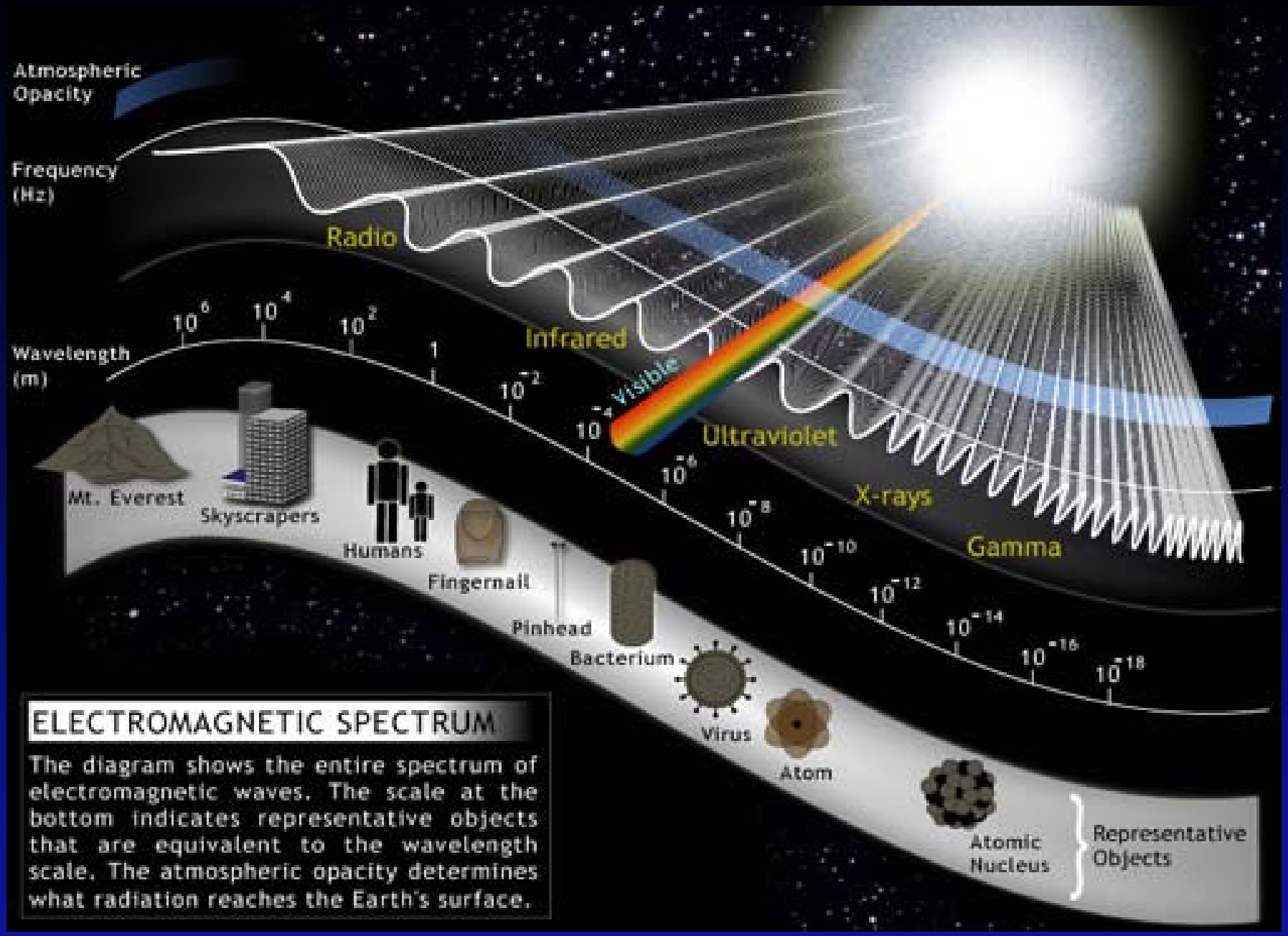
I → Ουδέτερο άτομο – όχι ιονισμένο (FeI)
II → Μονά ιονισμένο (έχουν διαφύγει τα e^- της τελευταίας στιβάδας, π.χ. FeII)
III→ Διπλά ιονισμένο (έχουν διαφύγει τα e^- της τελευταίας και της προτελευταίας στιβάδας, π.χ. FeIII)
Χωρίς λατινικό γράμμα αναφέρονται τα μόρια (π.χ. H_2)

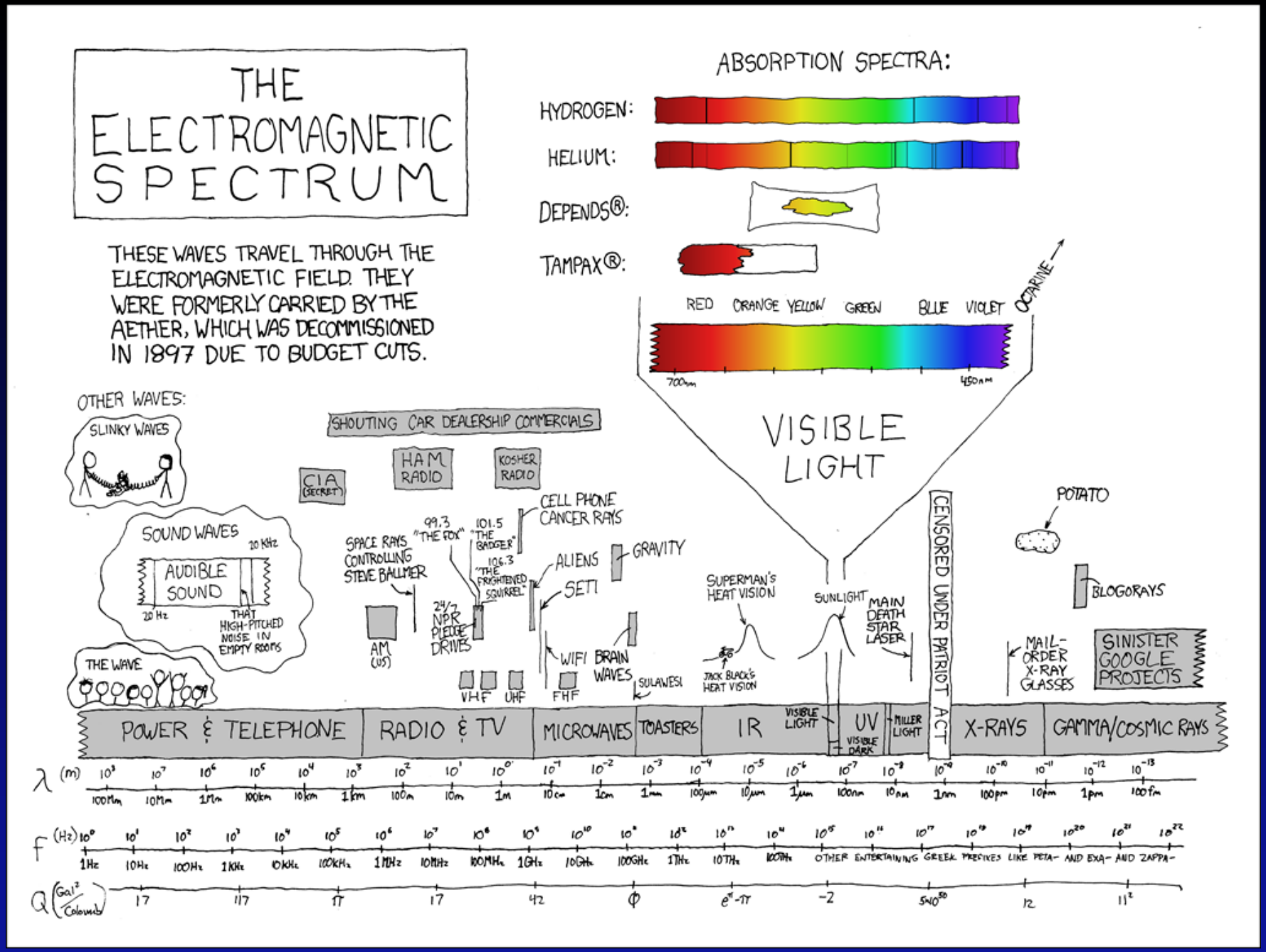
Λόγω διατήρησης της ενέργειας οποιαδήποτε διέγερση (λόγω κρούσης με φωτόνιο) ή αποδιέγερση ατόμου απαιτεί απορρόφηση ή εκπομπή φωτονίου με ενέργεια ίση με αυτή που κερδήθηκε ή χάθηκε, αντίστοιχα

$$E_\gamma = \Delta E = |E_{ΤΕΛ} - E_{ΑΡΧ}| = h\nu$$

Ορισμός του Φάσματος

Η ανάλυση μίας πολυχρωματικής δέσμης φωτός στις επιμέρους μονοχρωματικές ακτινοβολίες


Atmospheric Opacity
Frequency (Hz)
Radio
Infrared
Visible
Ultraviolet
X-rays
Gamma
Wavelength (m)
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
10^{-18}
Mt. Everest
Skyscrapers
Humans
Fingernail
Pinhead
Bacterium
Virus
Atom
Atomic Nucleus
Representative Objects
ELECTROMAGNETIC SPECTRUM
The diagram shows the entire spectrum of electromagnetic waves. The scale at the bottom indicates representative objects that are equivalent to the wavelength scale. The atmospheric opacity determines what radiation reaches the Earth's surface.


THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM
THESE WAVES TRAVEL THROUGH THE ELECTROMAGNETIC FIELD. THEY WERE FORMERLY CARRIED BY THE AETHER, WHICH WAS DECOMMISSIONED IN 1897 DUE TO BUDGET CUTS.
ABSORPTION SPECTRA:
HYDROGEN:
HELIUM:
DEPENDS®:
TAMPAX®:
RED ORANGE YELLOW GREEN BLUE VIOLET OCTARINE
700nm
450nm
VISIBLE LIGHT
OTHER WAVES:
SLINKY WAVES
SOUND WAVES
20 KHz
AUDIBLE SOUND
20 Hz
THAT HIGH-PITCHED NOISE IN EMPTY ROOMS
THE WAVE
SHOUTING CAR DEALERSHIP COMMERCIALS
CIA (SECRET)
HAM RADIO
KOSHER RADIO
CELL PHONE CANCER RAYS
99.3 "THE FOX"
101.5 "THE BADGER"
106.3 "THE FRIGHTENED SQUIRREL"
SPACE RAYS CONTROLLING STEVE BALLMER
ALIENS
GRAVITY
SETI
AM (US)
24/7 NPR PLEDGE DRIVES
WIFI
BRAIN WAVES
SULAWESI
VHF
UHF
FHF
SUPERMAN'S HEAT VISION
JACK BLACK'S HEAT VISION
SUNLIGHT
MAIN DEATH STAR LASER
CENSORED UNDER PATRIOT ACT
POTATO
BLOGORAYS
MAIL-ORDER X-RAY GLASSES
SINISTER GOOGLE PROJECTS
POWER & TELEPHONE
RADIO & TV
MICROWAVES
TOASTERS
IR
VISIBLE LIGHT
UV
VISIBLE DARK
MILLER LIGHT
X-RAYS
GAMMA/COSMIC RAYS
λ (m)
100Mm 10Mm 1Mm 100km 10km 1km 100m 10m 1m 10cm 1cm 1mm 100μm 10μm 1μm 100nm 10nm 1nm 100pm 10pm 1pm 100fm
f (Hz)
1Hz 10Hz 100Hz 1KHz 10KHz 100KHz 1MHz 10MHz 100MHz 1GHz 10GHz 100GHz 1THz 10THz 100THz
OTHER ENTERTAINING GREEK PREFIXES LIKE PETA- AND EXA- AND ZAPPA-
Q (Gal²/Coloumb)
17 117 π 17 42 φ e^π-π -2 540^50 12 11²

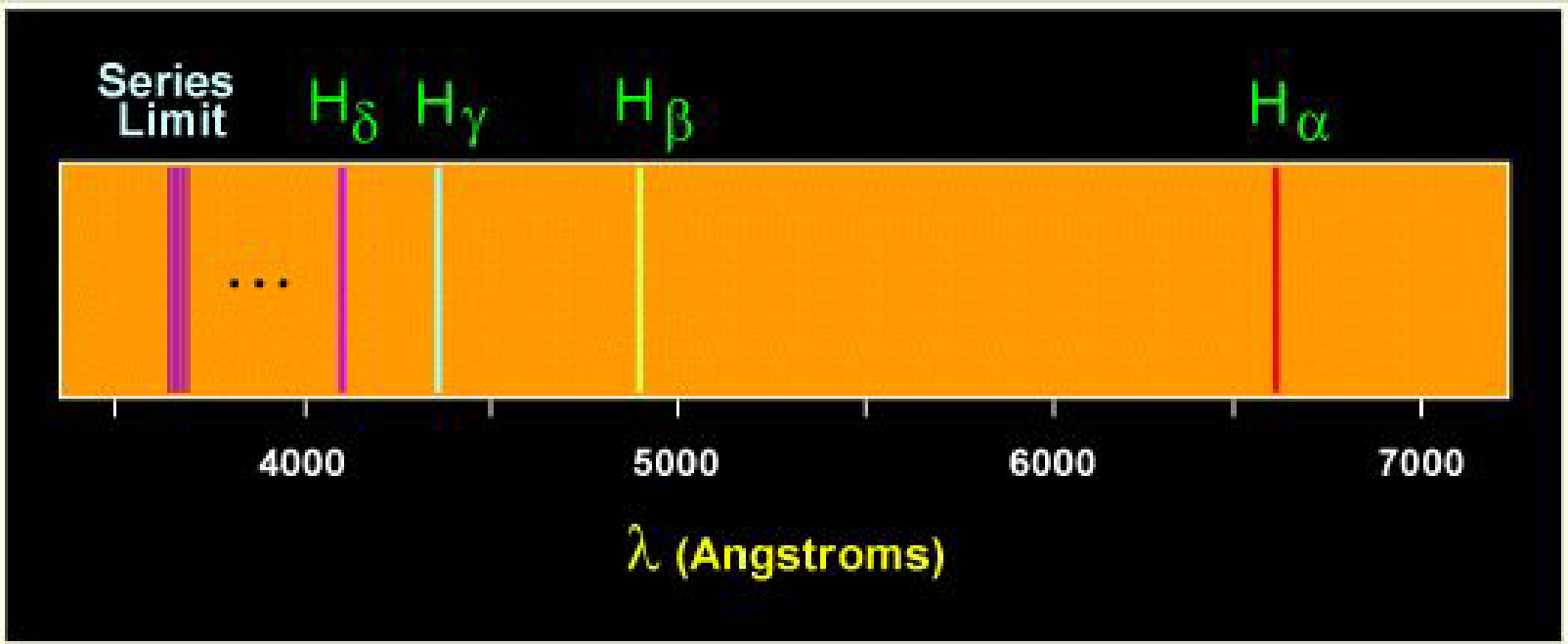
Κατηγορίες φασμάτων

Συνεχές

Εκπομπής (γραμμικά)

Απορρόφησης (γραμμικά)

Κάθε στοιχείο έχει συγκεκριμένα μήκη κύματος απορρόφησης και εκπομπής και το σύνολο τους αποτελεί την «ταυτότητα» του που είναι ΜΟΝΑΔΙΚΗ



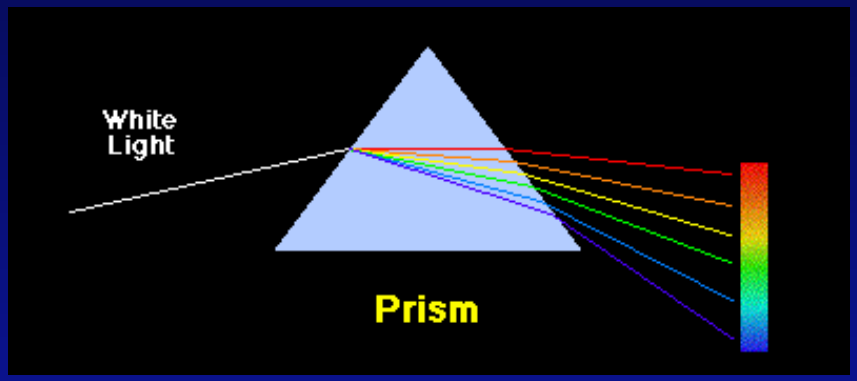
The Balmer spectrum of hydrogen

Φασματοσκοπία

Σκοπός: Άντληση πληροφοριών μέσω των φασματικών γραμμών εκπομπής ή (και) απορρόφησης του υλικού

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται ονομάζονται **φασματογράφοι**

Πρίσματος



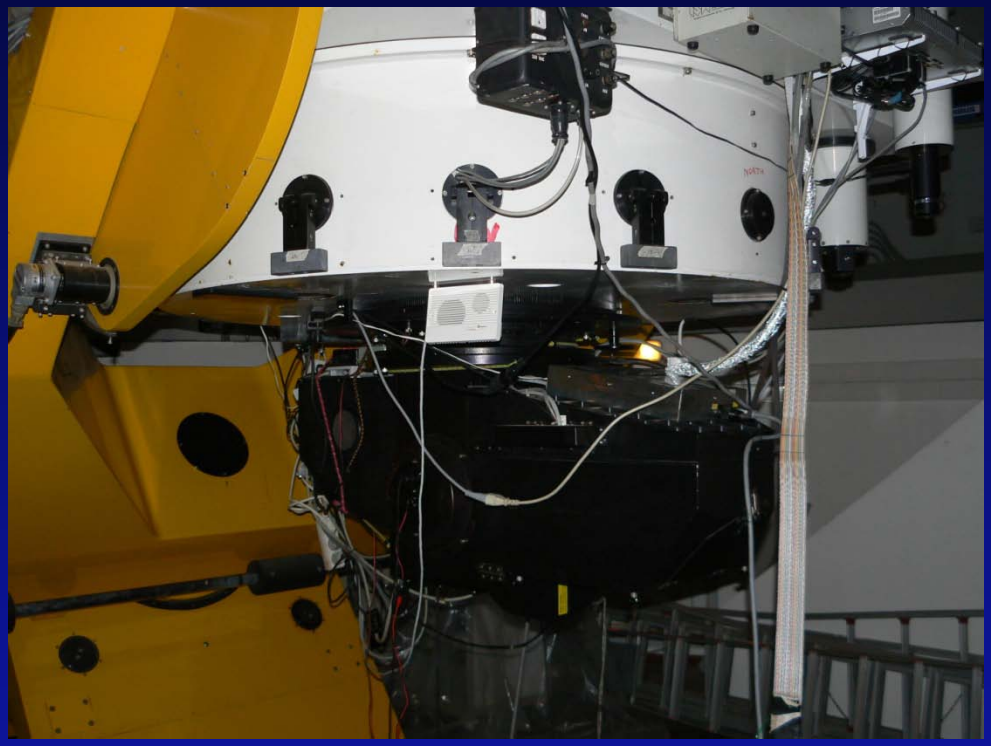
Διάθλαση

Περίθλασης

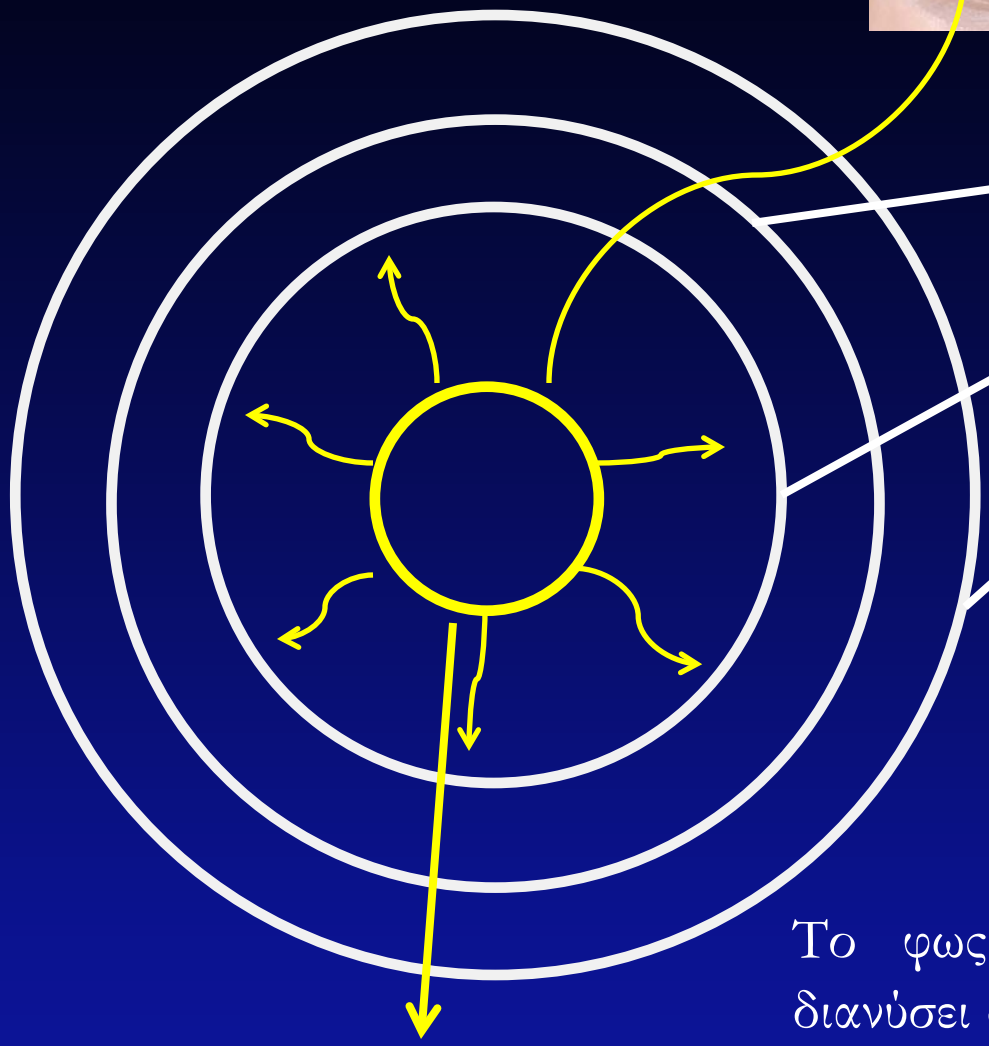
Εφαρμογή στην Αστροφυσική

Τα ουράνια σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία προερχόμενη είτε από εγγενή αίτια (π.χ. αστέρες) είτε από εξωτερικά (π.χ. ανάκλαση φωτός προερχόμενη από άλλη πηγή)

Με την χρήση του τηλεσκοπίου και CCD αισθητήρων έχουμε την δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας των φασμάτων



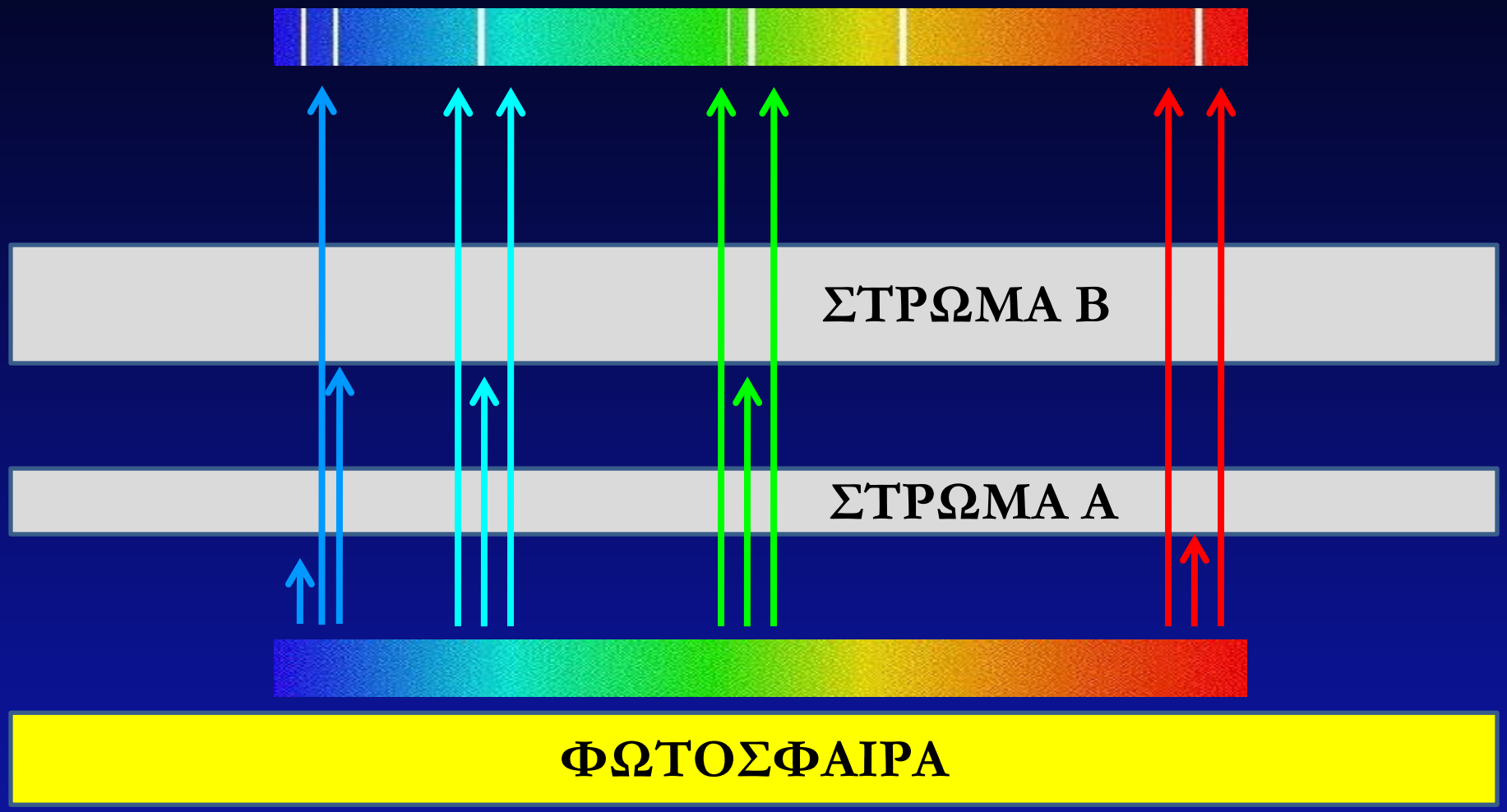
Αστρικές Ατμόσφαιρες



Το φως που φτάνει στον παρατηρητή έχει διανύσει όλη την ατμόσφαιρα του αστέρα

Οι αστρικές ατμόσφαιρες ΔΕΝ είναι ομογενείς

Τα στρώματα διαφέρουν, στη σύσταση, στην πυκνότητα και στη θερμοκρασία



Λόγω των μεταπτώσεων θα αναμέναμε ότι όταν ένα στοιχείο απορροφά σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, θα εξέπεμπε σε ακριβώς το ίδιο ύστερα από λίγο, άρα ΔΕΝ θα έπρεπε να έχουν γραμμές απορρόφησης

Αυτό όμως δεν συμβαίνει για δύο λόγους:

Α: Το ηλεκτρόνιο μπορεί να ακολουθήσει διαφορετικές διαδρομές αποδιέγερσης, άρα δύο ή παραπάνω φωτόνια διαφορετικής ενέργειας θα παραχθούν

Με αυτόν τον τρόπο όμως θα έπρεπε να έχουμε σε όλους αστέρες γραμμές εκπομπής κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί!!!

Β: Σκέδαση (διάχυση) της ακτινοβολίας

Φωτόνια διαφορετικής ενέργειας

Θα δώσει γραμμή εκπομπής

Θα δώσει γραμμή απορρόφησης

Φωτόνια ίδιας ενέργειας

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ - Διέγερση ατόμων

Φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας

ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑ

Σε άτομα με πολλά ηλεκτρόνια (π.χ. ^{56}Fe) η πιθανότητα η αποδιέγερση να έχει ακριβώς την αντίθετη διαδρομή με την διέγερσή του e^- είναι πρακτικά πολύ μικρή, επομένως δημιουργούνται φωτόνια διαφόρων ενεργειών και πολύ λίγα από αυτά φτάνουν στο παρατηρητή ώστε να δει γραμμές εκπομπής, επομένως αντιλαμβάνεται μόνο την απουσία των φωτονίων από τα οποία προήλθε η μετάπτωση

Συνεπώς οι γραμμές απορρόφησης κυριαρχούν στα αστρικά φάσματα

Μέλαν σώμα

Ιδεατό σώμα του οποίου η ένταση της ακτινοβολίας του ακολουθεί την **συνάρτηση (νόμος) Planck**

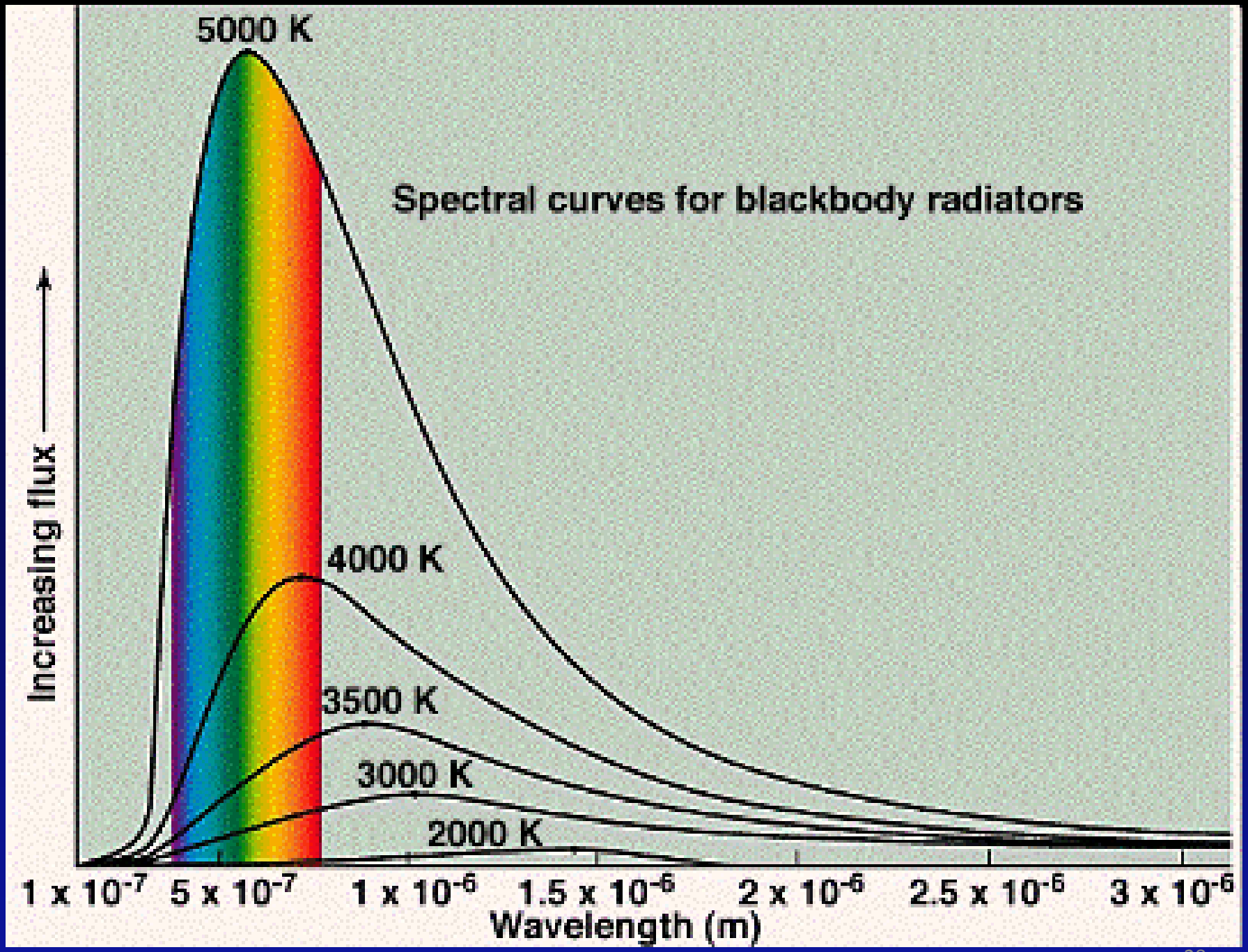
$$I(\nu, T) = 2h\nu^3/c^2\,(e^{h\nu/kT}-1)^{-1}$$

Εκπέμπει και απορροφά ΑΚΡΙΒΩΣ στα ίδια μήκη κύματος

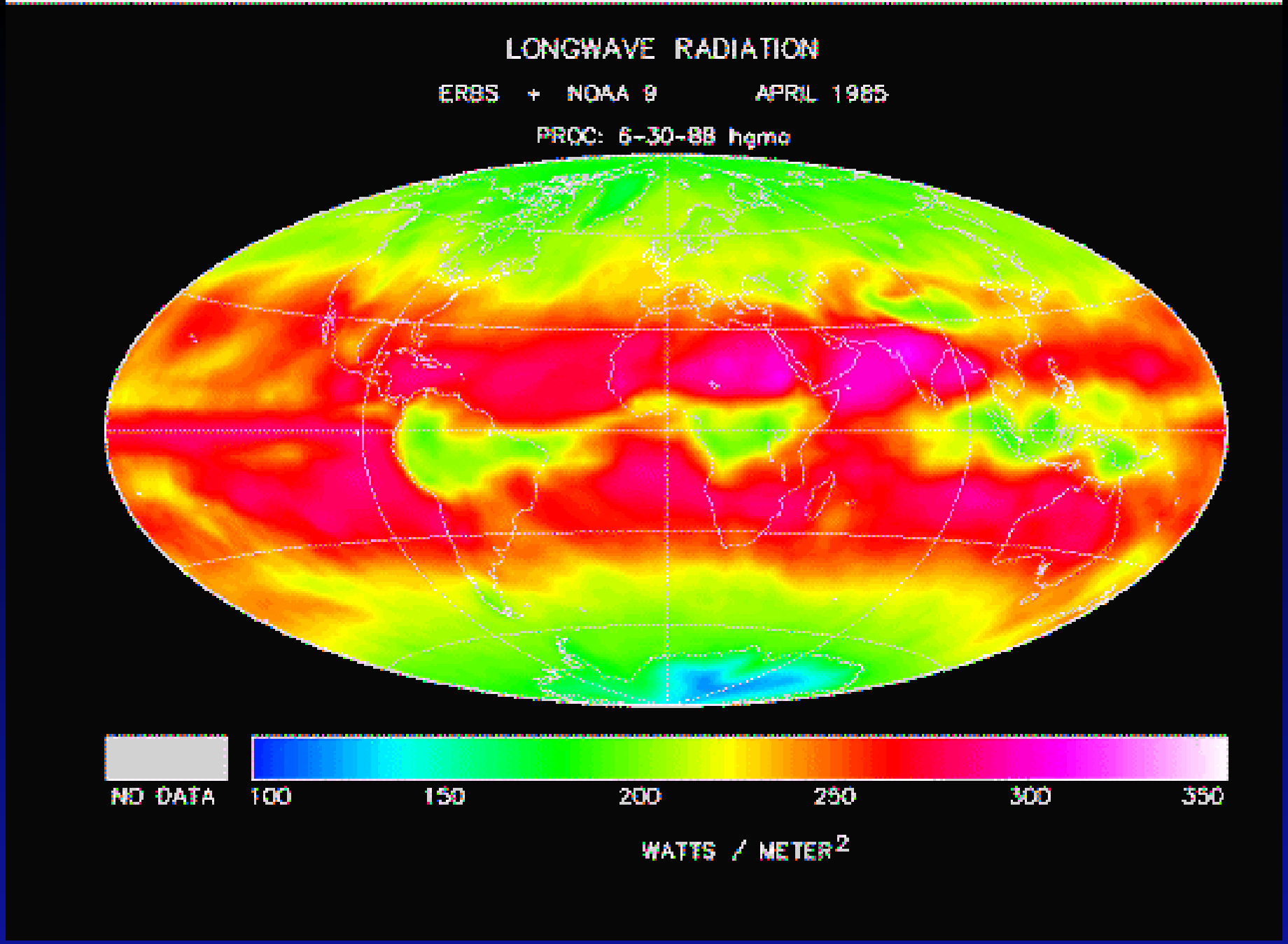
Νόμος του Wien $\lambda_{max}\,T = 2.897$ **mmK**

λ_{max} → Μήκος κύματος στο οποίο λαμβάνουμε την ΜΕΓΙΣΤΗ ροή ακτινοβολίας

Νόμος Stefan-Boltzmann $F = \sigma T^4$

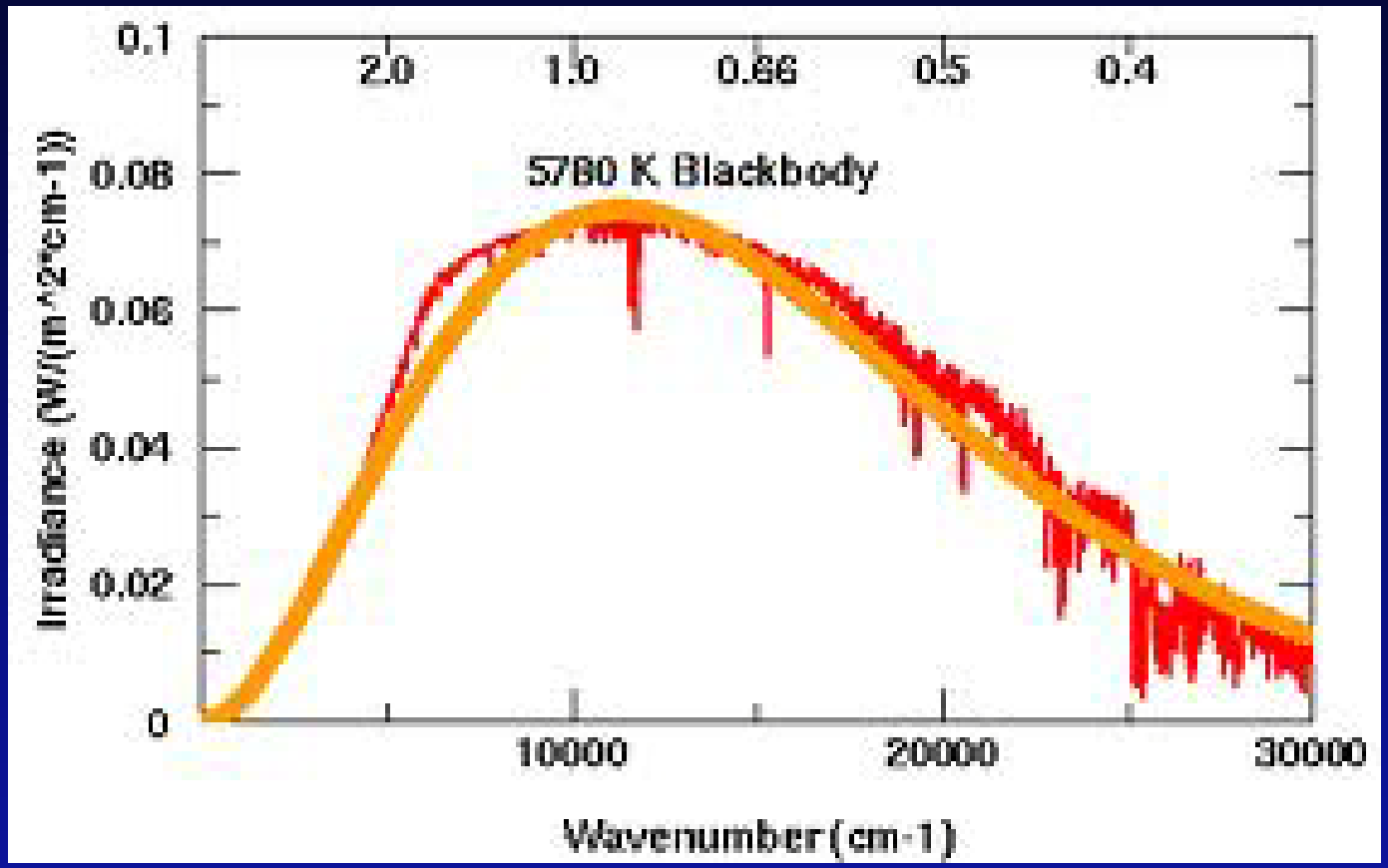

5000 K
Spectral curves for blackbody radiators
Increasing flux
4000 K
3500 K
3000 K
2000 K
1 x 10-7
5 x 10-7
1 x 10-6
1.5 x 10-6
2 x 10-6
2.5 x 10-6
3 x 10-6
Wavelength (m)

λ_{max} = 9500 nm για τους ανθρώπους (μακρινό υπέρυθρο – μικροκύματα)


LONGWAVE RADIATION
ERBS + NOAA 9 APRIL 1985
PROC: 6-30-88 hgmo
NO DATA
100
150
200
250
300
350
WATTS / METER 2

Με πολύ καλή προσέγγιση θεωρούμε ότι οι αστέρες ακολουθούν την καμπύλη μέλανος σώματος

Η ατέλειες των μοντέλων οφείλονται στις γραμμές απορρόφησης και εκπομπής των αστέρων λόγω των στοιχείων των ατμοσφαιρών τους



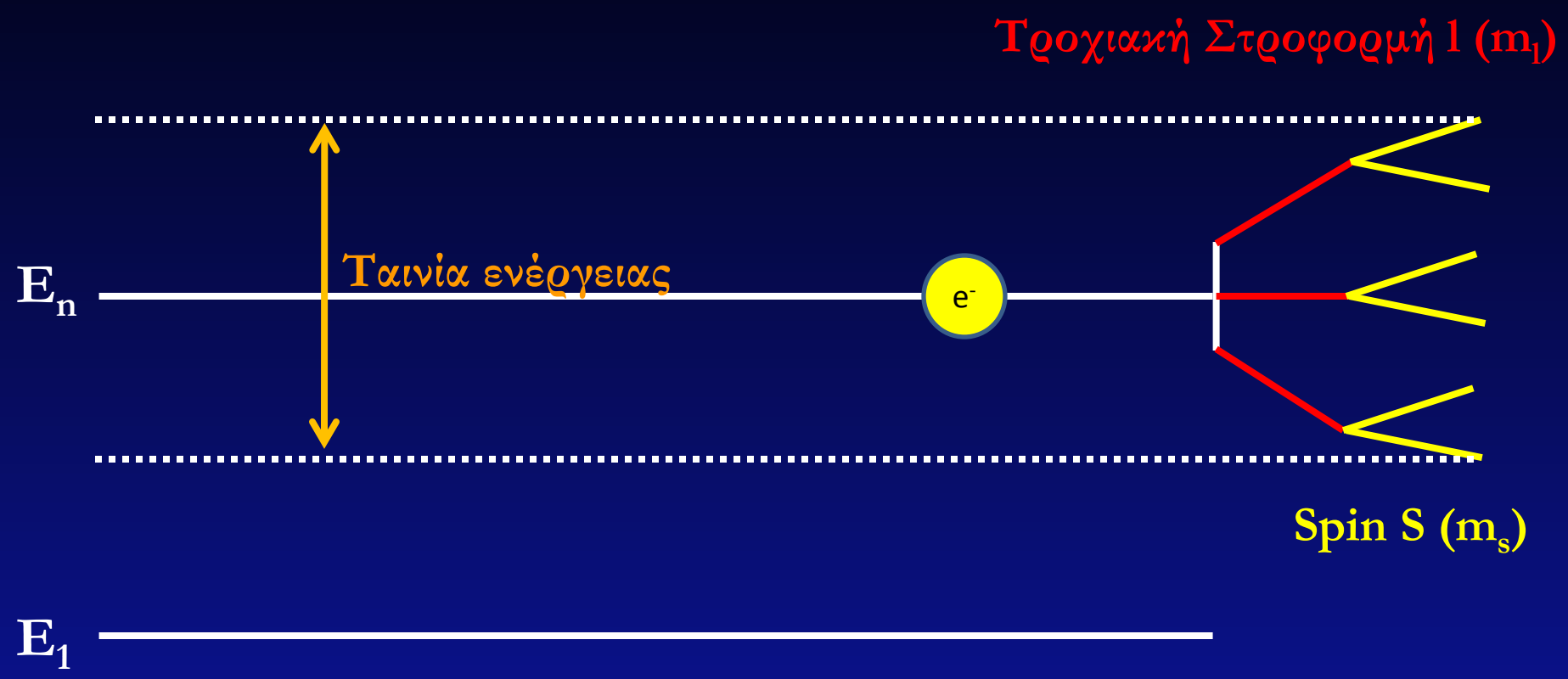
Χαρακτηριστικά των Φασματικών γραμμών

Ένταση: Εξαρτάται από την λαμπρότητα και την θερμοκρασία της πηγής και της συγκέντρωσης του εκπέμποντος (ή απορροφούντος) στοιχείου

Μετατόπιση: Οφείλεται στην σχετική κίνηση ολόκληρης της πηγής (ή μέρους της) με τον παρατηρητή (φαινόμενο Doppler-Fizeau)

Πλήθος: Συστατικά της πηγής

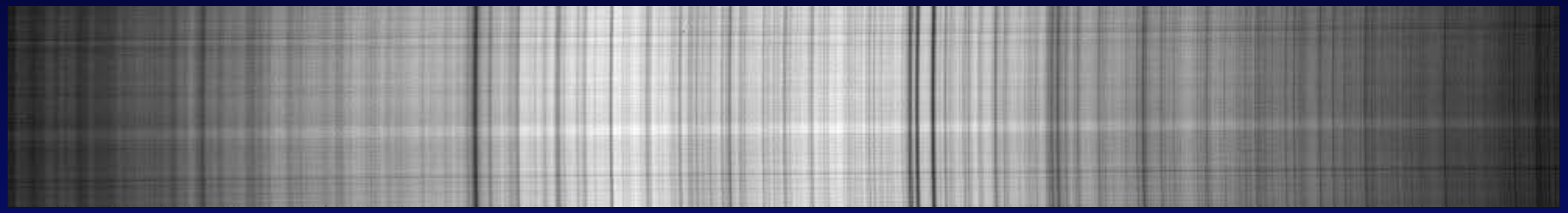
Πάχος (διεύρυνση-Πλάτυνση): Εξαρτάται α) από την θερμοκρασία της πηγής (θερμική διεύρυνση – τυχαίες κινήσεις των ατόμων - Doppler), β) από την ύπαρξη ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Zeeman και Stark), γ) σύγκρουση μεταξύ των ατόμων



ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

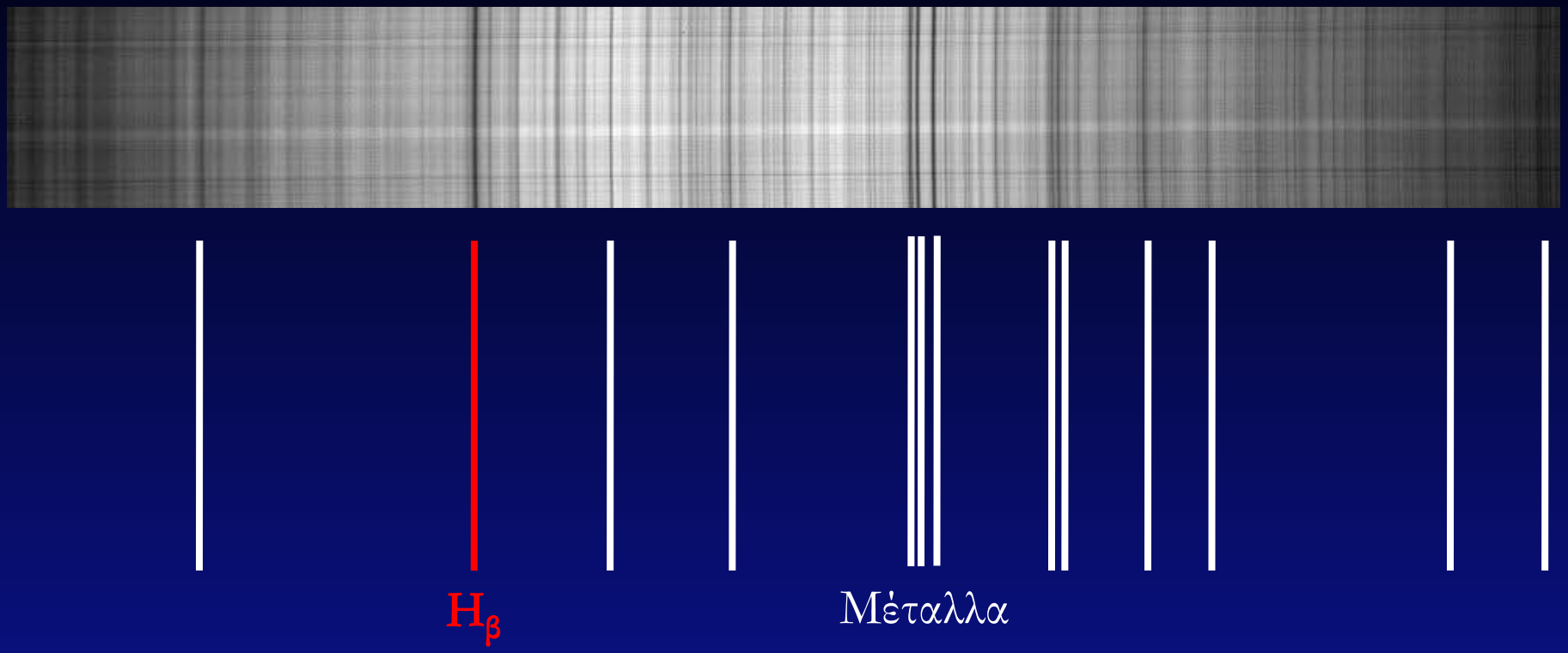
Φάσμα απορρόφησης

Μέγιστη Συνολική Ένταση



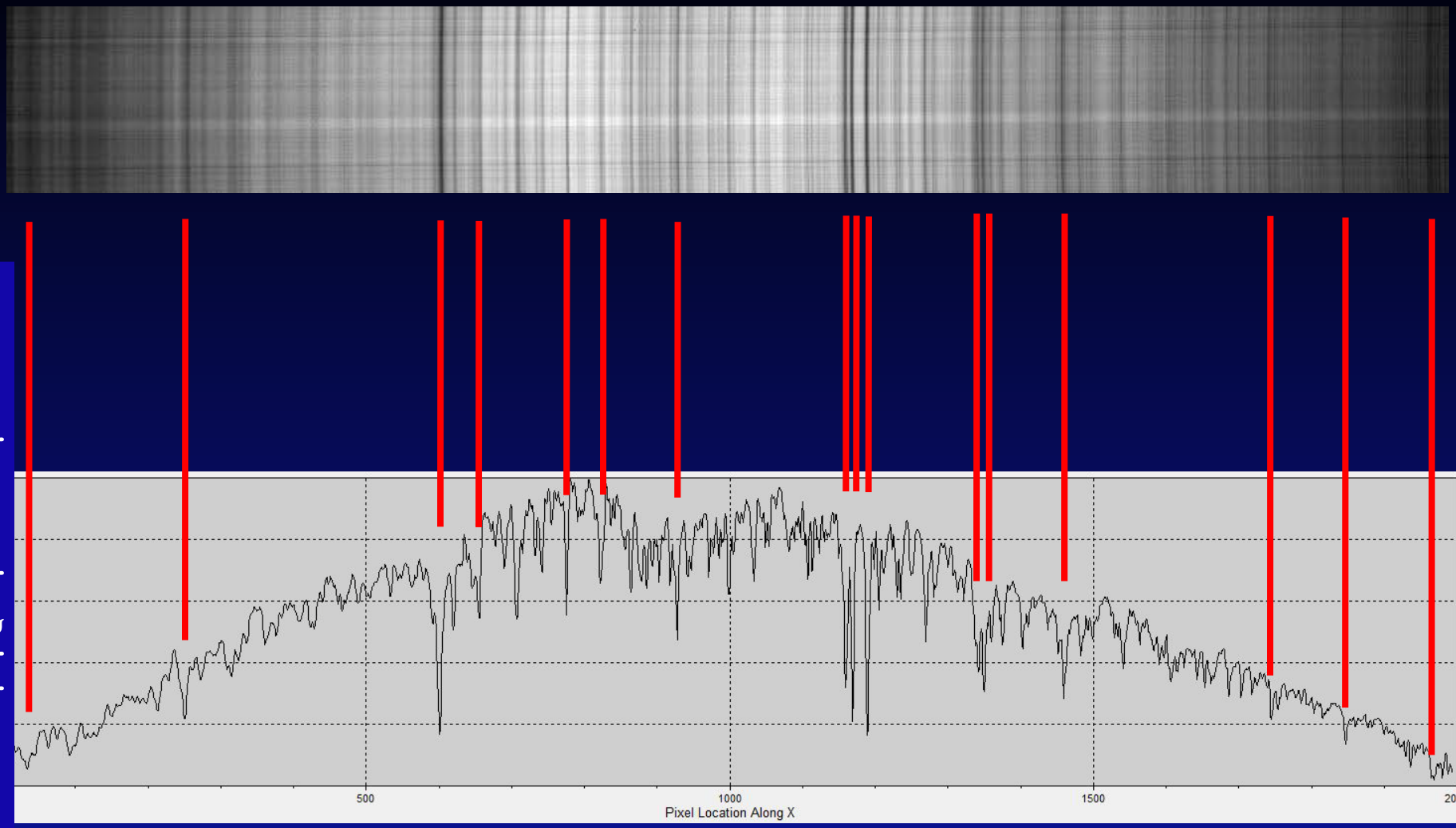
Γραμμές διαφορετικής έντασης και εύρους

Φάσμα απορρόφησης



Γραμμές διαφορετικών στοιχείων (πλήθος)

Φάσμα απορρόφησης

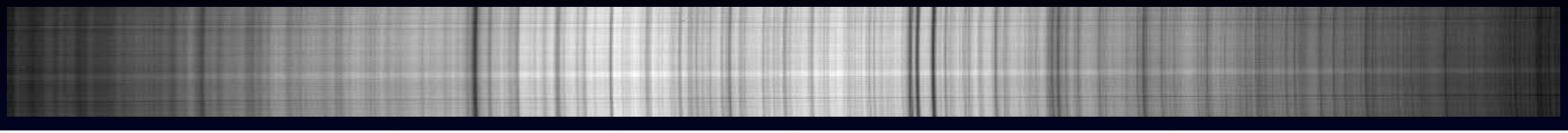


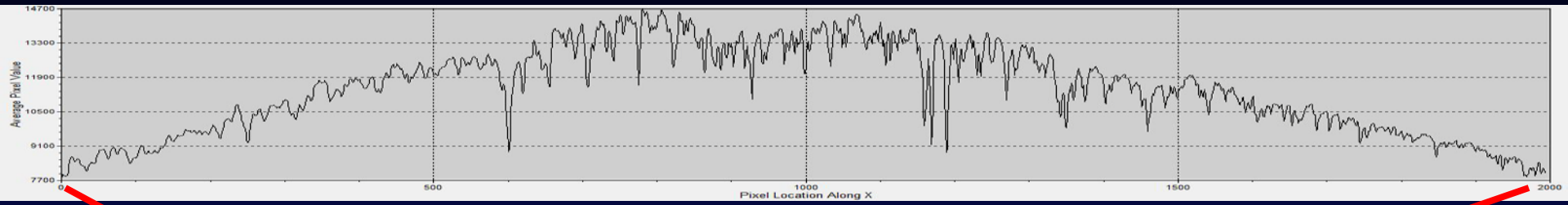
Μήκος κύματος (λ) →

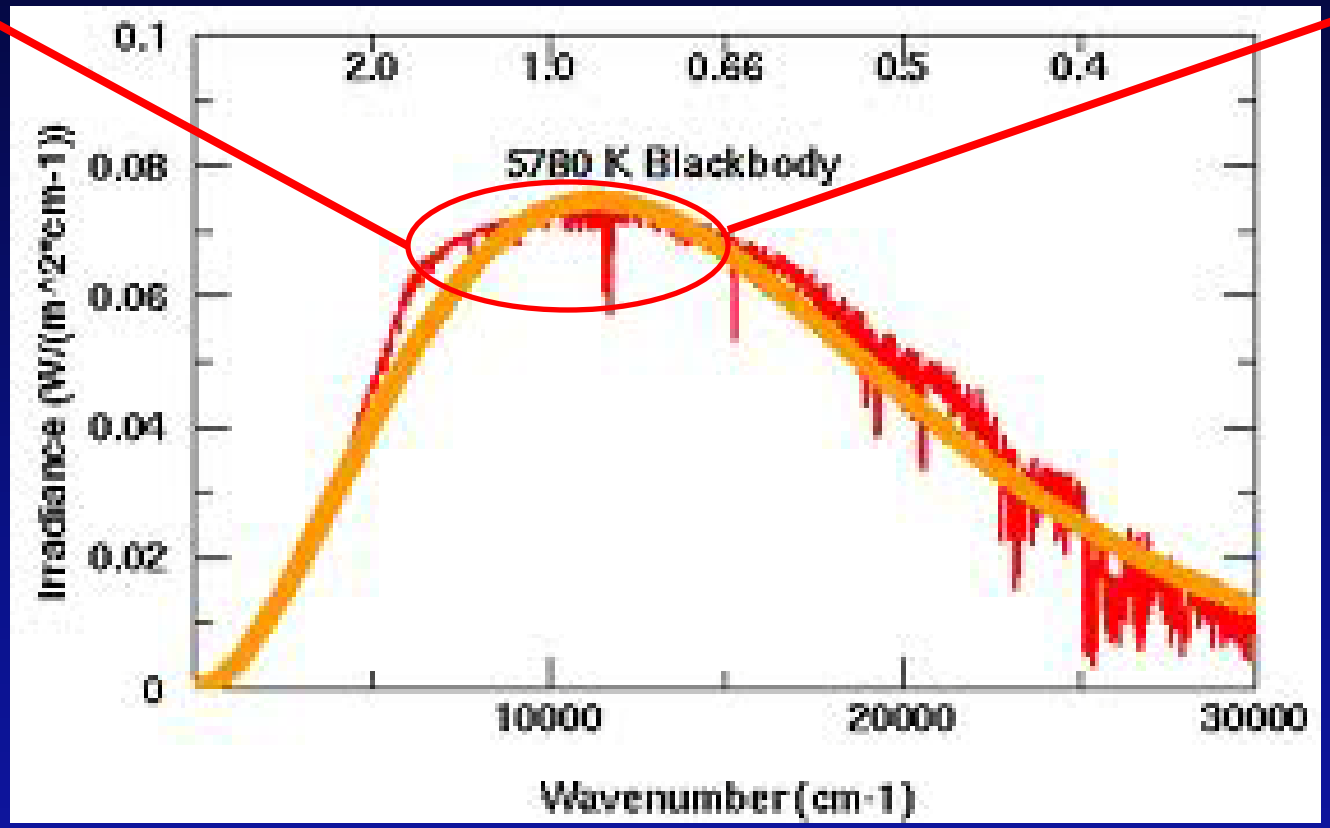
ή συχνότητα (ν=c/λ) ←

ή ενέργεια (E=hν) ←

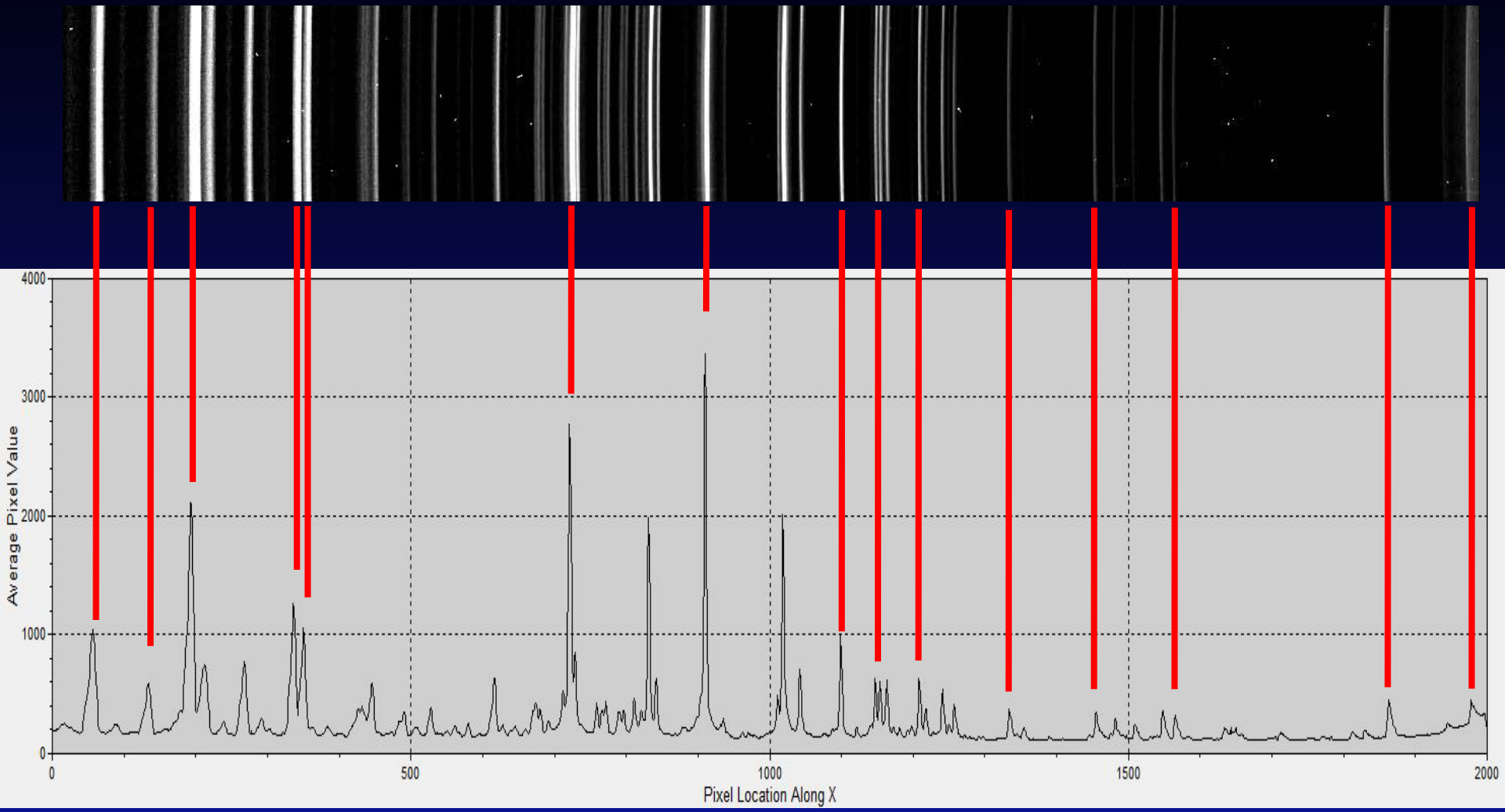
Φάσμα απορρόφησης







Φάσμα εκπομπής



Φασματική Ταξινόμηση κατά Harvard - Φασματική τάξη

Βασίζεται στην θερμοκρασία (χρώμα) του αστέρα και τις φασματικές γραμμές απορρόφησης

Προγενέστερα — Μεταγενέστερα

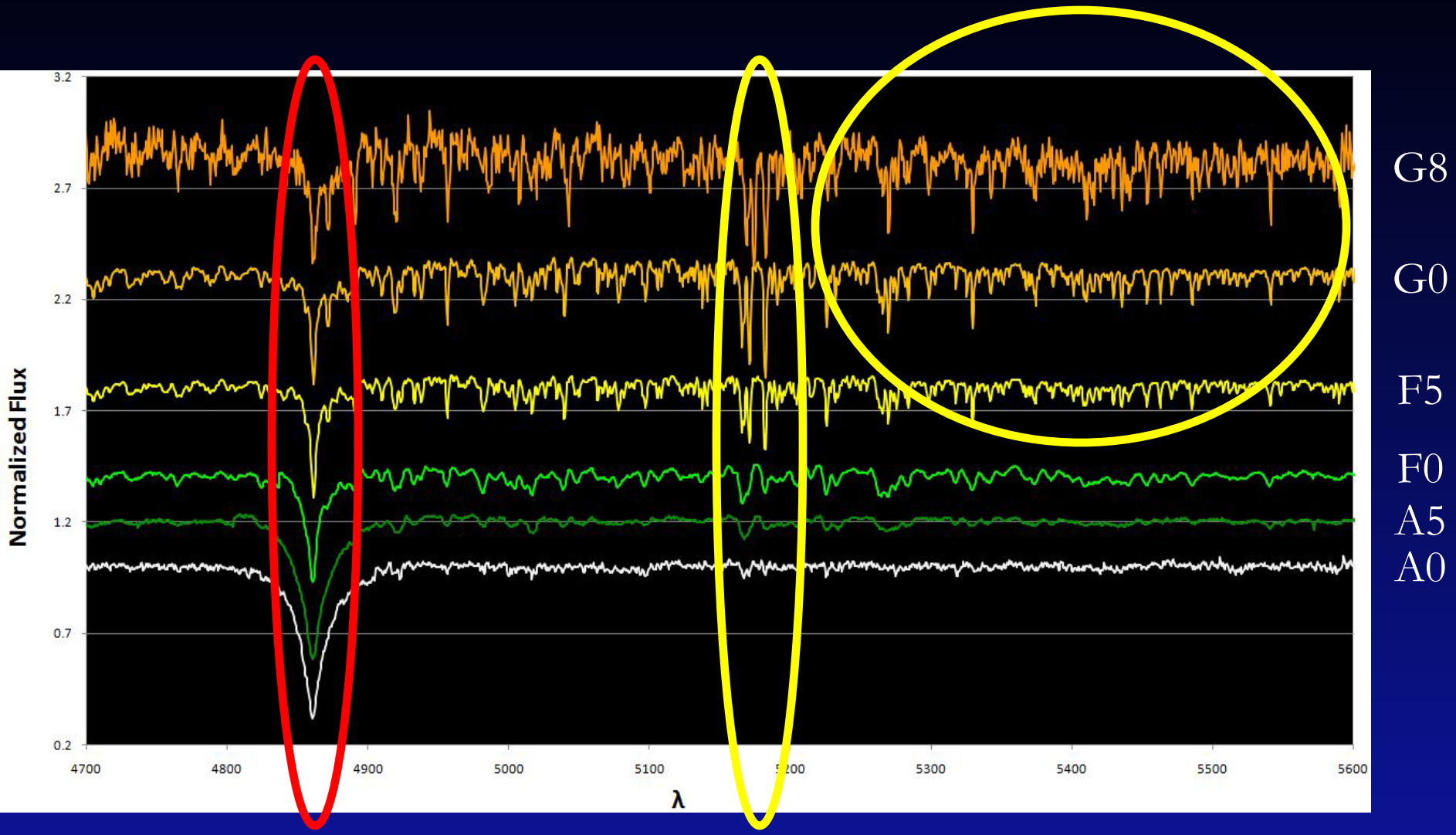
O	B	A	F	G	K	M	(R	N	S)
h	e		i	i	i	e	i	o	m
			n	r	s		g	w	a
			e	l	s		h		c
							t		k

>33000 **T (K)** **<3700**

Κάθε φασματική τάξη αποτελείται από 10 κύριες υποδιαιρέσεις (0→9, π.χ. A0, A1 … A9)

και 10 δευτερεύουσες (.5, π.χ. A0.5, A1.5 … A9.5)

Φασματική Ταξινόμηση κατά Harvard - Φασματική τάξη



Φασματική Ταξινόμηση κατά Yerkes – Τάξη Φωτεινότητας

Φωτεινότητα = Εμβαδό πηγής × Ροή ακτινοβολίας

$$L = A \times F$$

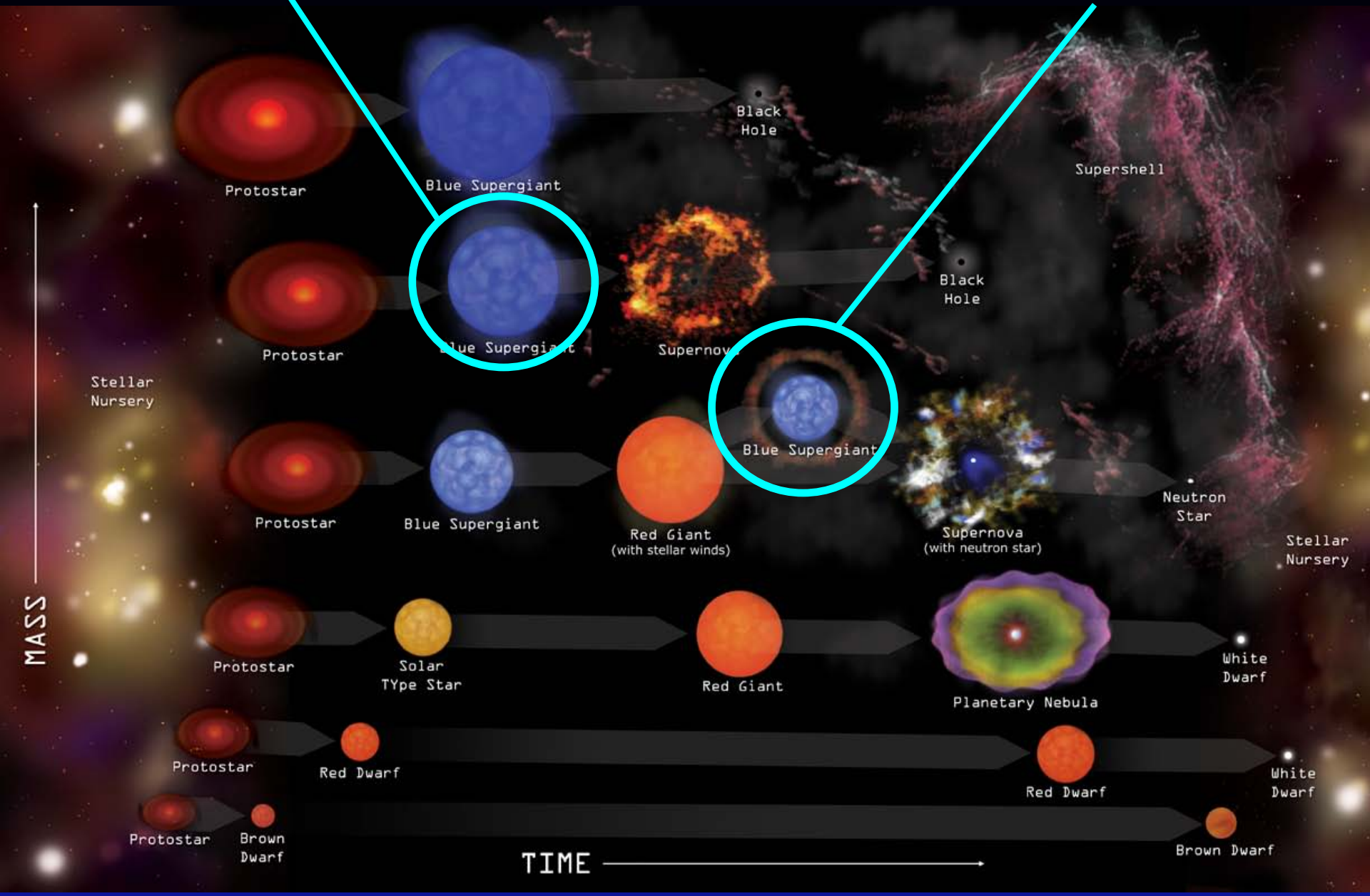
$$L = 4\pi R^2_{Star} \times \sigma T^4$$

Συμπέρασμα: Δύο αστέρες ΙΔΙΑΣ θερμοκρασίας θα έχουν διαφορετική φωτεινότητα λόγω διαφορετικής ακτίνας

Μπορεί όμως να αλλάξει η ακτίνα του αστέρα;;;;;;;

Καύση H στον πυρήνα

Καύση He στον πυρήνα



Φασματική Ταξινόμηση κατά Yerkes – Τάξη Φωτεινότητας

Νόμος παγκόσμιας έλξης

$$F = GMm/r^2$$

Επομένως θέτοντας ως $r = R_{star}$ βρίσκουμε την δύναμη που ασκείται στην <u>επιφάνεια</u> του αστέρα (μάζας M_{star}) σε ένα σώμα μάζας m

Αυτή η δύναμη ονομάζεται Βάρος: $B = GM_{star}/R^2_{star}\ m$
Ορίζουμε ως επιτάχυνση της βαρύτητας g την ποσότητα GM_{star}/R^2_{star}
Οπότε προκύπτει η σχέση $B = mg$

Για λόγους μεγάλου εύρους σε μάζες και ακτίνες, βολεύει να χρησιμοποιούμε την ποσότητα logg.

Για τον Ήλιο έχει βρεθεί $\log g = 4.438\ cm/s^2$

Φασματική Ταξινόμηση κατά Yerkes – Τάξη Φωτεινότητας

Ήλιος (σύμβολο Θ) → $g_\odot = GM_\odot/R_\odot^2$

Αστέρας → $g_{star} = GM_{star}/R_{star}^2$

Διαίρεση κατά μέλη → $g_{star}/ g_\odot = M_{star}/R_{star}^2/M_\odot/R_\odot^2$

Στην αστροφυσική χρησιμοποιούμε της Ηλιακές ποσότητες ($M_\odot$, $R_\odot$) ως μονάδες

Λογαριθμίζουμε κατά μέλη → $\log g_{star} = \log g_\odot + \log M_{star} - 2\log R_{star}$

$$\log g_{star} = 4.438 + \log M_{star} - 2\log R_{star}$$

Φασματική Ταξινόμηση κατά Yerkes – Τάξη Φωτεινότητας

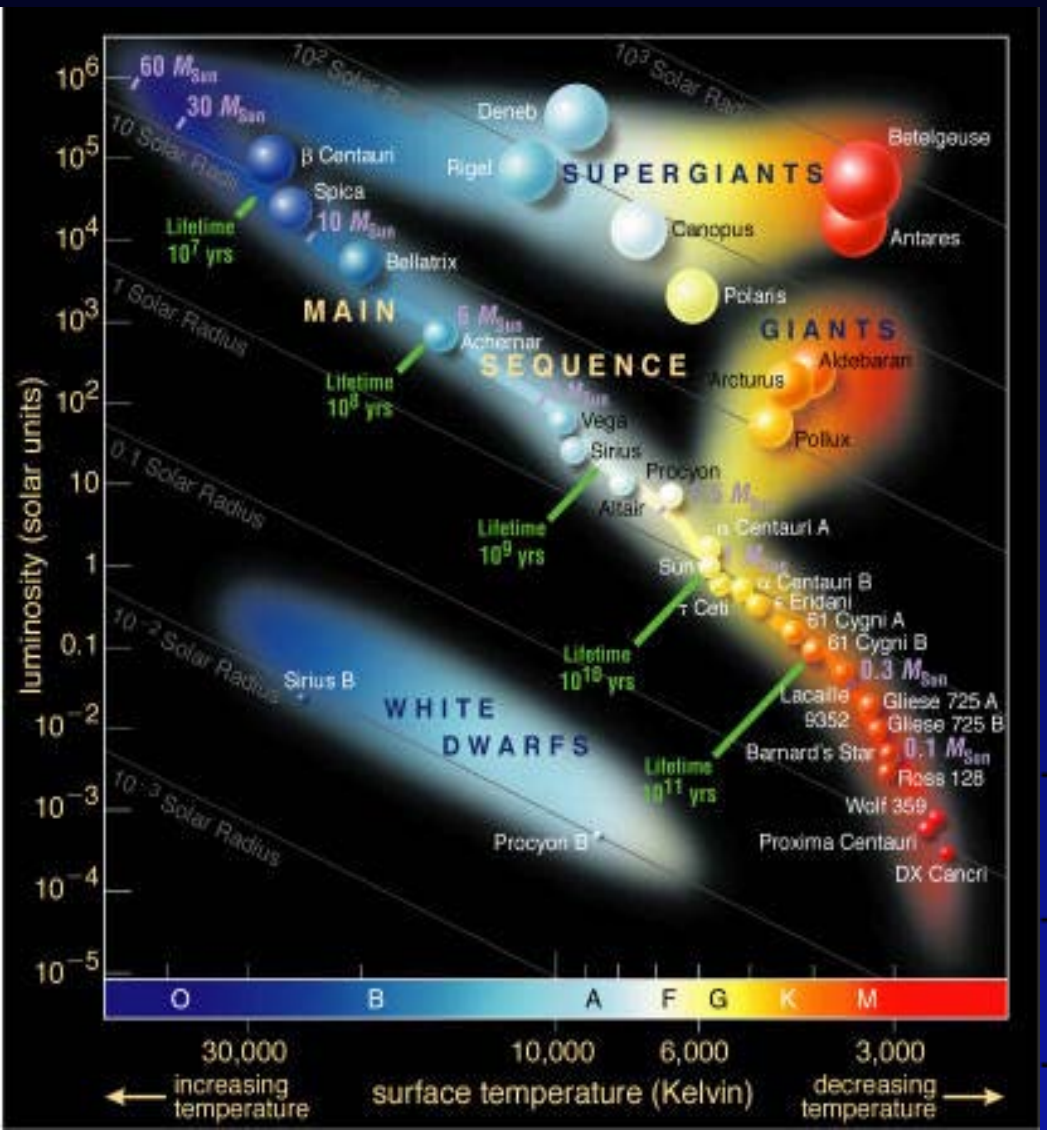
Logg$_{star}$

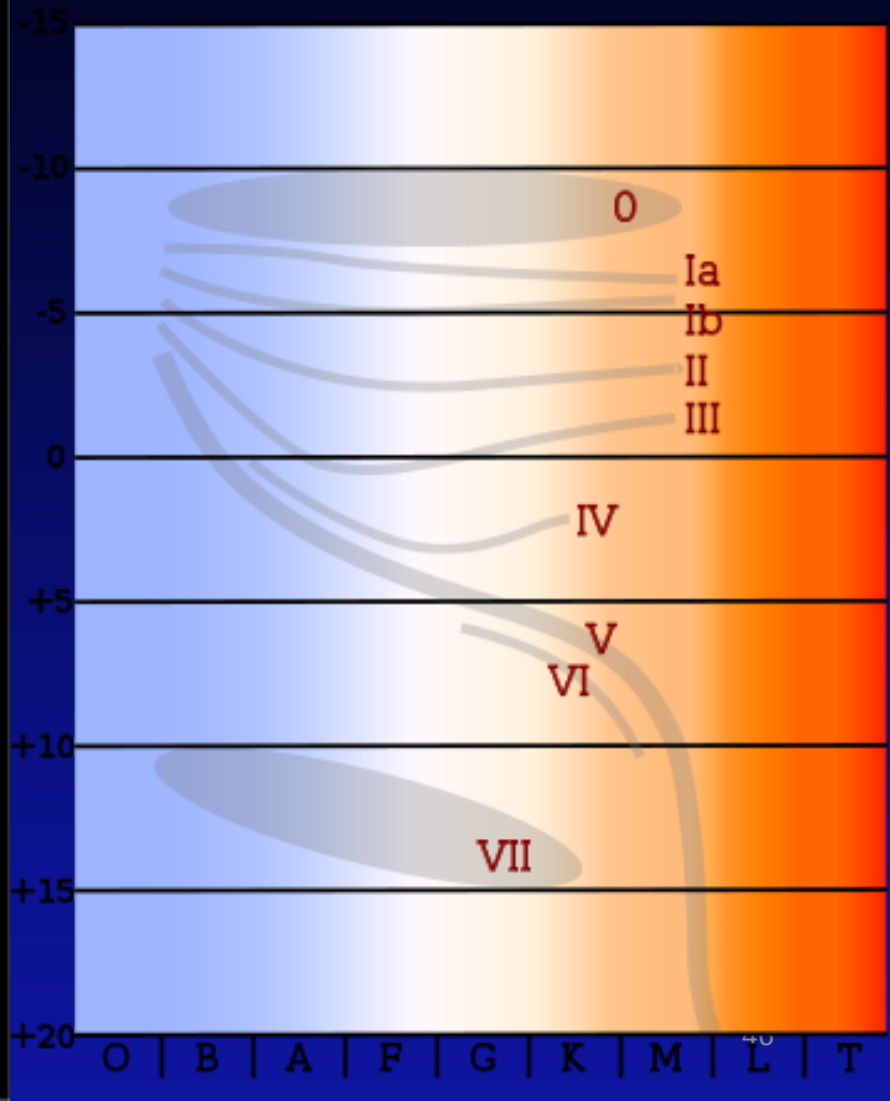
- **0 (0)→** Πάρα πολύ λαμπροί υπεργίγαντες (hypergiants)
- **1 (I)→** Υπεργίγαντες (Supergiants)
  - **Ia→** Πραγματικά Λαμπροί Υπεργίγαντες
  - **Ib→** Λαμπροί Υπεργίγαντες
- **2 (II)→** Λαμπροί γίγαντες (Bright giants)
- **3 (III)→** Κανονικοί γίγαντες (Normal giants)
- **4 (IV)→** Υπογίγαντες (Subgiants)
- **5 (V)→** Νάνοι Κυρίας Ακολουθίας (dwarfs)
- **6 (VI)→** Υπονάνοι (subdwarfs)
- **7 (VII)→** Λευκοί νάνοι (white dwarfs)

Φασματικός Τύπος – Διάγραμμα Hertzsprung - Russell

Φασματικός Τύπος = Φασματική τάξη + Τάξη Φωτεινότητας

G2V = G2 + V





Πυκνότητα αστέρα→ $\rho = M_{star} / V_{star} = M_{star} / 4 \pi R^3_{star} / 3$

$$\rho \sim M_{star} R^{-3}_{star}$$

Όσο μεγαλύτερο το Logg τόσο ΠΥΚΝΟΤΕΡΟΣ είναι ο αστέρας

Δηλαδή η ακτινοβολία εξερχόμενη από την φωτόσφαιρα του αστέρα, ανάλογα την εξελικτική του κατάσταση (νάνος, γίγαντας) διανύει πυκνότερα ή αραιότερα ατμοσφαιρικά στρώματα

Επομένως το φάσμα δύο αστέρων **ΙΔΙΑΣ** θερμοκρασίας αλλά διαφορετικής εξελικτικής κατάστασης (π.χ. F2V και F2II) αναμένεται να διαφέρει τόσο στα συστατικά, αλλά και στην ένταση των φασματικών γραμμών

Αραιή ατμόσφαιρα → Μικρότερη συγκέντρωση στοιχείου → Μικρότερη ένταση φασματικής γραμμής και μεγαλύτερη διεύρυνση των γραμμών λόγω εντονότερης διάχυσης (σκέδασης)

Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα

Απαιτεί μία ‘βιβλιοθήκη’ πρότυπων φασμάτων όλων των φασματικών τύπων

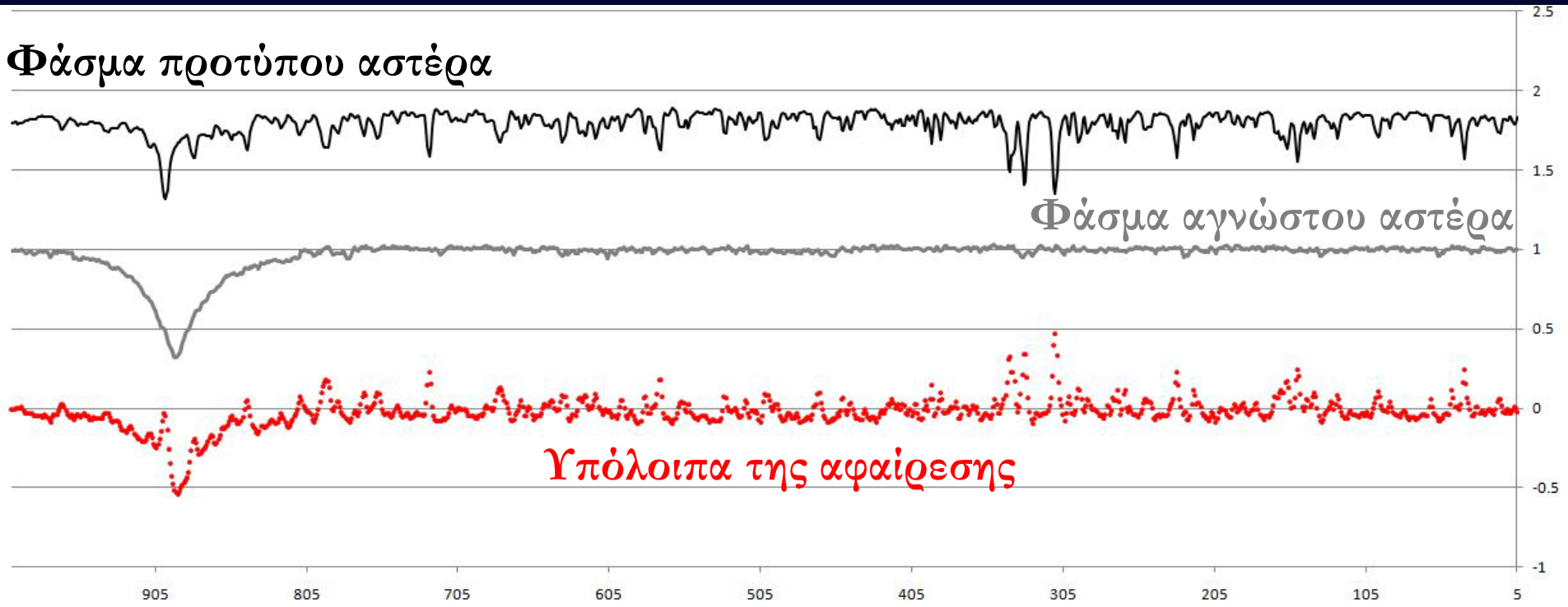
Σύγκριση του φάσματος του αγνώστου αστέρα με τα πρότυπα φάσματα

Αναλογίες έντασης και εύρους γραμμών μεταξύ τους (π.χ. αναλογία βαθών γραμμής H με διάφορες μεταλλικές γραμμές ευαίσθητες στην θερμοκρασία)

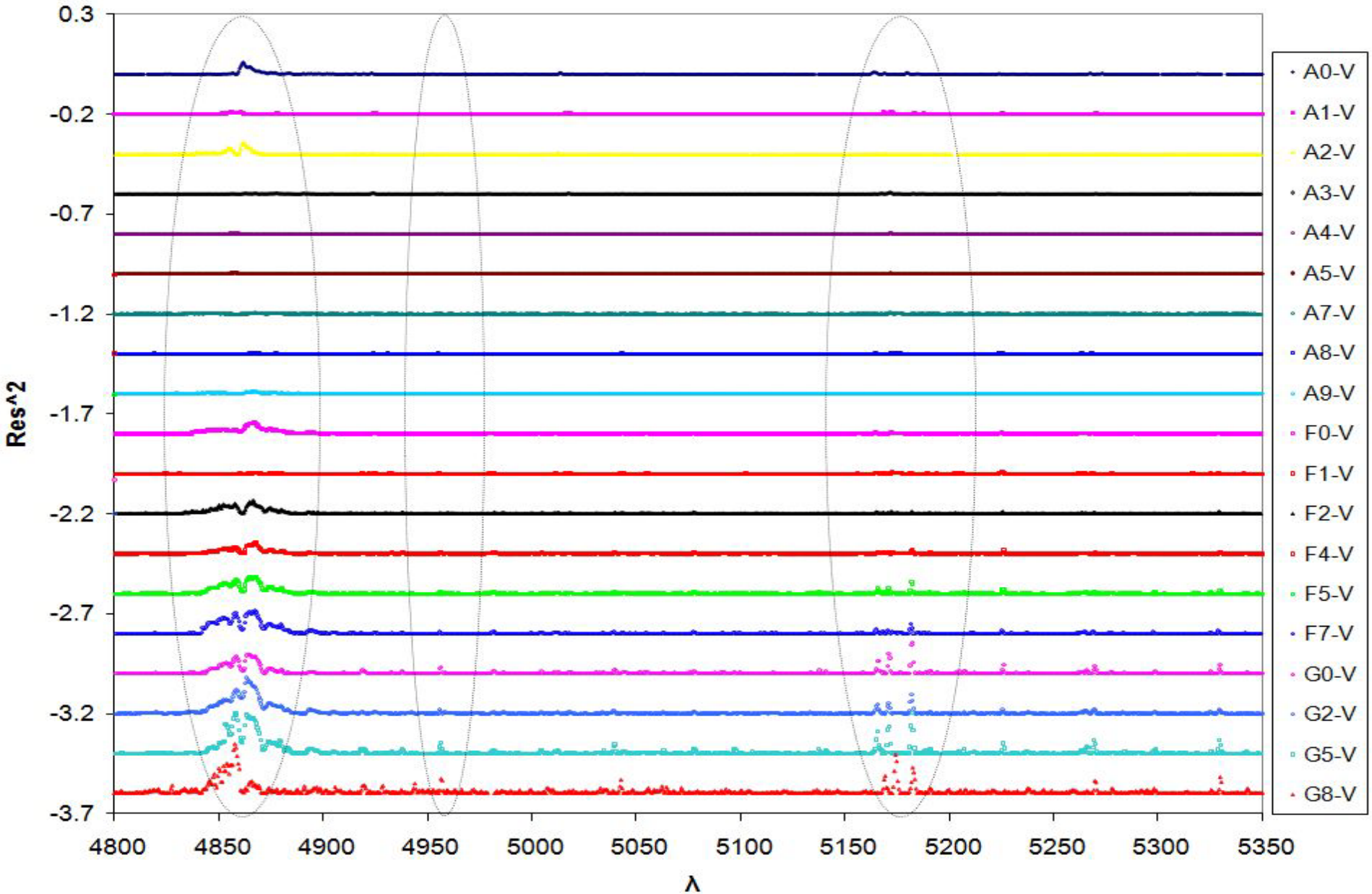
Οι πρότυποι αστέρες είναι πολύ καλά μελετημένοι και γνωρίζουμε με πολύ καλή ακρίβεια τόσο την θερμοκρασία τους όσο και τις αναλογίες των βαθών των γραμμών απορρόφησής τους

Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα

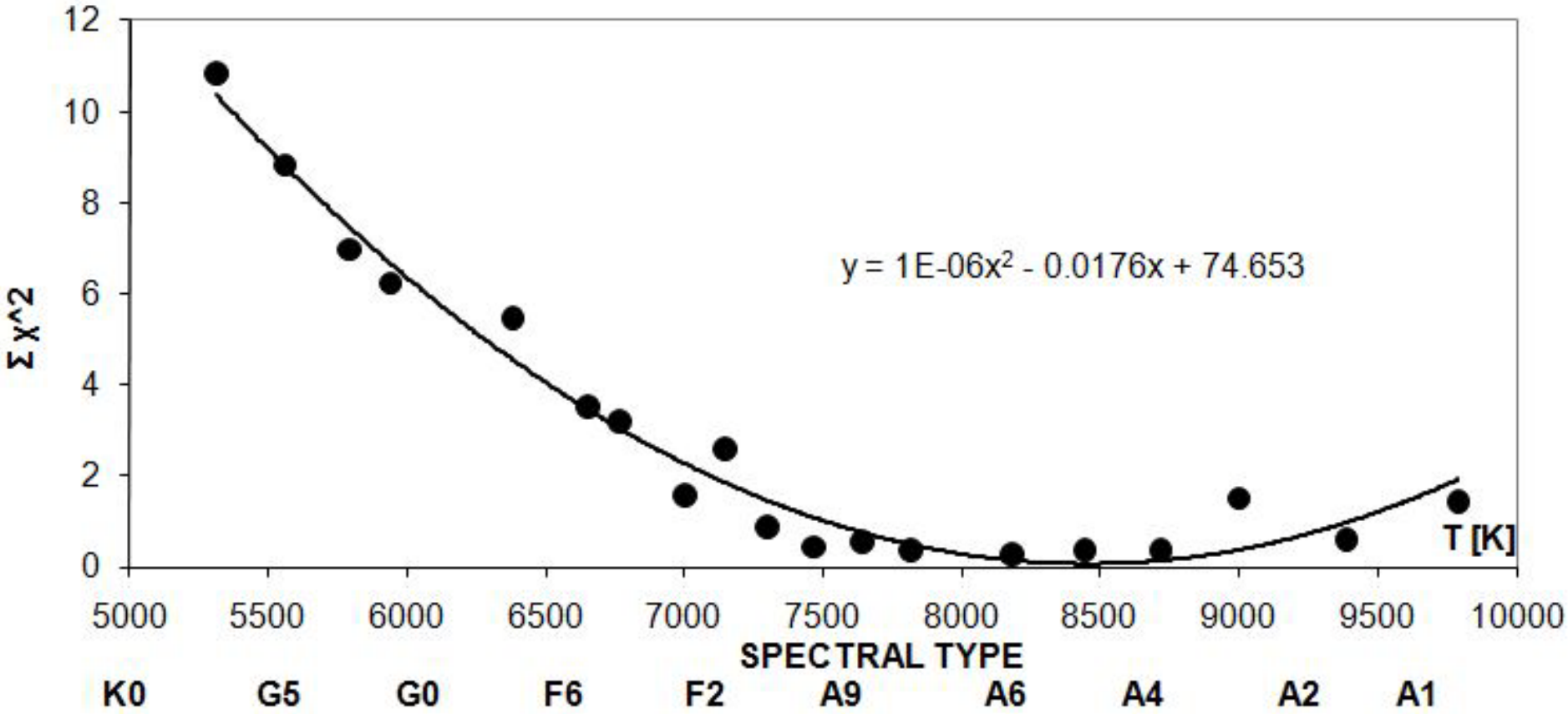
"Αφαίρεση" του φάσματος του αγνώστου αστέρα από όλα τα πρότυπα φάσματα και υπολογισμός του αθροίσματος των υπολοίπων σε κάθε περίπτωση



Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα



Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα

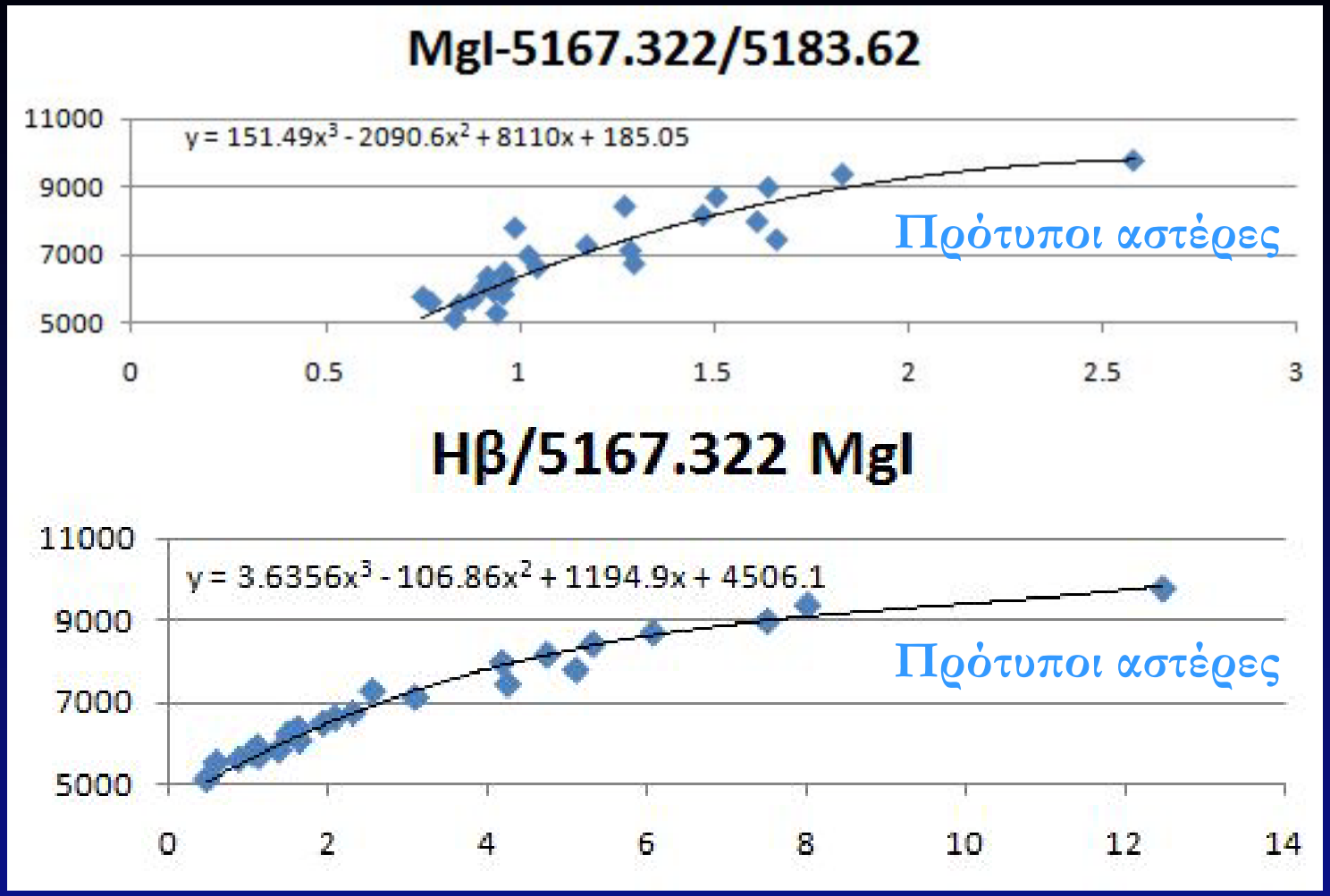


Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα

Αναλογίες βαθών γραμμών απορρόφησης: Σ_1/Σ_2 ή (και) Σ_1/Σ_3 .....

Φασματική Ταξινόμηση αγνώστου αστέρα

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Τ(Κ)



Γνωρίζοντας τις αναλογίες των βαθών γραμμών απορρόφησης του <u>αγνώστου</u> αστέρα, αντικαθιστούμε στις παραπάνω εξισώσεις και βρίσκουμε την θερμοκρασία του

Σύνοψη

- Τα γραμμικά φάσματα δημιουργούνται λόγω διέγερσης και αποδιέγεσης ή ακόμα και ιονισμού των ατόμων μέσα στις αστρικές ατμόσφαιρες

- Μας προσφέρουν πληροφορίες για την χημική σύσταση των αστρικών ατμοσφαιρών

- Με την φασματική ταξινόμηση είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την ενεργό θερμοκρασία του αστέρα

- Ο πλήρης φασματικός τύπος μας πληροφορεί τόσο για την φασματική τάξη του αστέρα όσο και για την εξελικτική του κατάσταση

- Η φασματική ταξινόμηση γίνεται με την μέθοδο της σύγκρισης των φασμάτων μεταξύ πρότυπων και αγνώστων αστέρων