



Παραγωγή Ενέργειας σε Πυρήνες Γαλαξιών

Βασίλης Χαρμανδάρης

(Πανεπιστήμιο Κρήτης & Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Περιεχόμενα

- ❑ Δύο επιθυμίες ενός αισιόδοξου αστροφυσικού...
 - ❑ *Να υπολογίσει την πυκνότητα ενέργειας (μάζα + ακτινοβολία) ανά μονάδα όγκου στο Σύμπαν, από τη δημιουργία του (Μεγάλη Έκρηξη) έως και σήμερα*
 - ❑ *Να αναγνωρίσει τους φυσικούς μηχανισμούς υπεύθυνους για την παραγωγή αυτής της ενέργειας, (πυρηνικές αντιδράσεις στα εσωτερικά των άστρων, ακτινοβολία λόγω περιστροφής & πρόσπτωσης ύλης γύρω/σε μελανές οπές, μηχανική ενέργεια λόγω ωστικών κυμάτων ή κινούμενων σωματιδίων)*
- ❑ Θεματολογία:
 - ❑ Τρεις Προβληματισμοί
 - ❑ Το φως και η αλληλεπίδρασή του με την ύλη
 - ❑ Ο ρόλος της σκόνης
 - ❑ Η Ενεργιακή Φασματική Κατανομή (Spectral Energy Distribution - SED) ενός γαλαξία

Προβληματισμός 1

- ❑ Γνωρίζουμε ότι μπορούμε να εκτιμήσουμε την ενέργεια των φωτονίων από τις φασματικές γραμμές διαφόρων στοιχείων
- ❑ Τι είδους παρατηρήσεις φασματικών γραμμών είναι καλύτερο να σχεδιάσει κάποιος για να μπορέσει να αναγνωρίσει πιο εύκολα Ενεργούς Γαλαξιακούς Πυρήνες (Active Galactic Nuclei; AGN) στο «κοντινό σύμπαν» ($z \sim 0$);

Για παράδειγμα:

- ❑ Ποια χημικά στοιχεία θα πρέπει να προτιμηθούν και σε ποιες ενέργειες;
- ❑ Υπάρχει εξάρτηση από το είδος του γαλαξία
- ❑ Είναι καλύτερα να έχω τηλεσκόπια στο έδαφος ή στο διάστημα;
- ❑ Κτλ....

❑ Βιβλιογραφία

IPAC/LEVEL5 <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5>

Προβληματισμός 2

- ❑ Γνωρίζουμε ότι στο μισό της ηλικίας του Σύμπαντος ($z \sim 1$) η πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου ήταν ~ 10 φορές μεγαλύτερη απ'ότι σήμερα. Επίσης οι γαλαξίες είχαν περισσότερο αέριο μια που ήταν πιο «νέοι».
- ❑ Πώς η απόσταση και η ταχύτητα απομάκρυνσης (λόγω διαστολής του Σύμπαντος) των γαλαξιών αυτών μας επηρεάζει στο να αναγνωρίσουμε την ύπαρξη ενός Ενεργού Γαλαξιακού Πυρήνα (Active Galactic Nucleus)

Για παράδειγμα:

- ❑ Πώς επηρεάζει η απόσταση την δυνατότητα παρατήρησης;
- ❑ Πως επηρεάζει η απόσταση τη διακριτική ικανότητα των οργάνων να ξεχωρίσουν τον πυρήνα από τον δίσκο του γαλαξία;
- ❑ κτλ....

❑ Βιβλιογραφία

IPAC/LEVEL5 <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5>

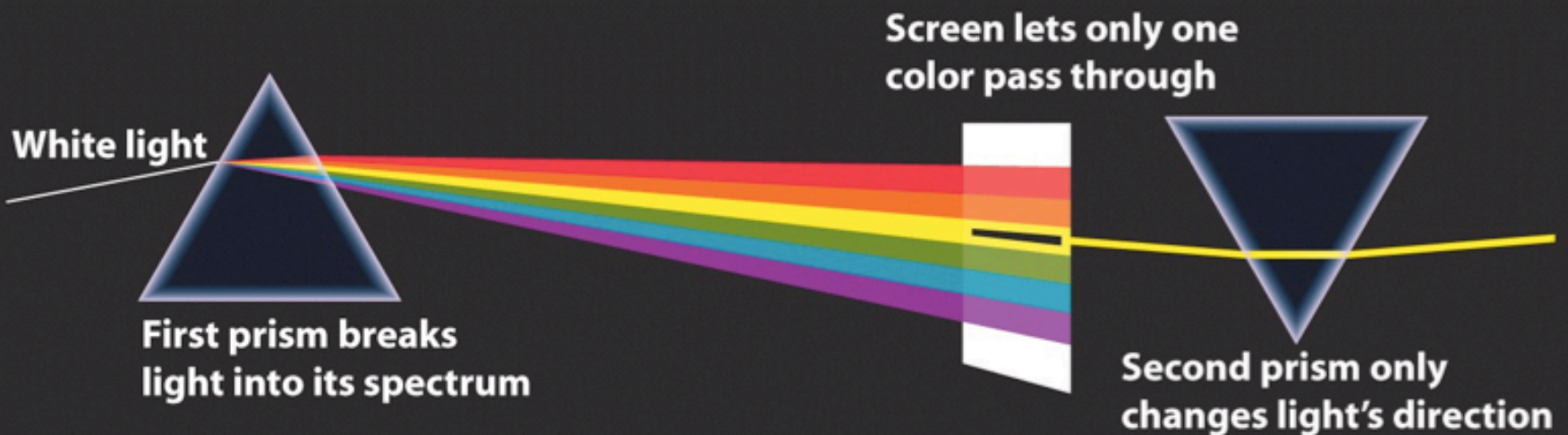
Προβληματισμός 3

- Έστω ότι αναγνωρίζουμε την ύπαρξη ενός AGN στο κέντρο κάποιου γαλαξία.
- Πώς θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε την συνεισφορά του AGN στην συνολική ενέργεια που εκπέμπει ο γαλαξίας αυτός;

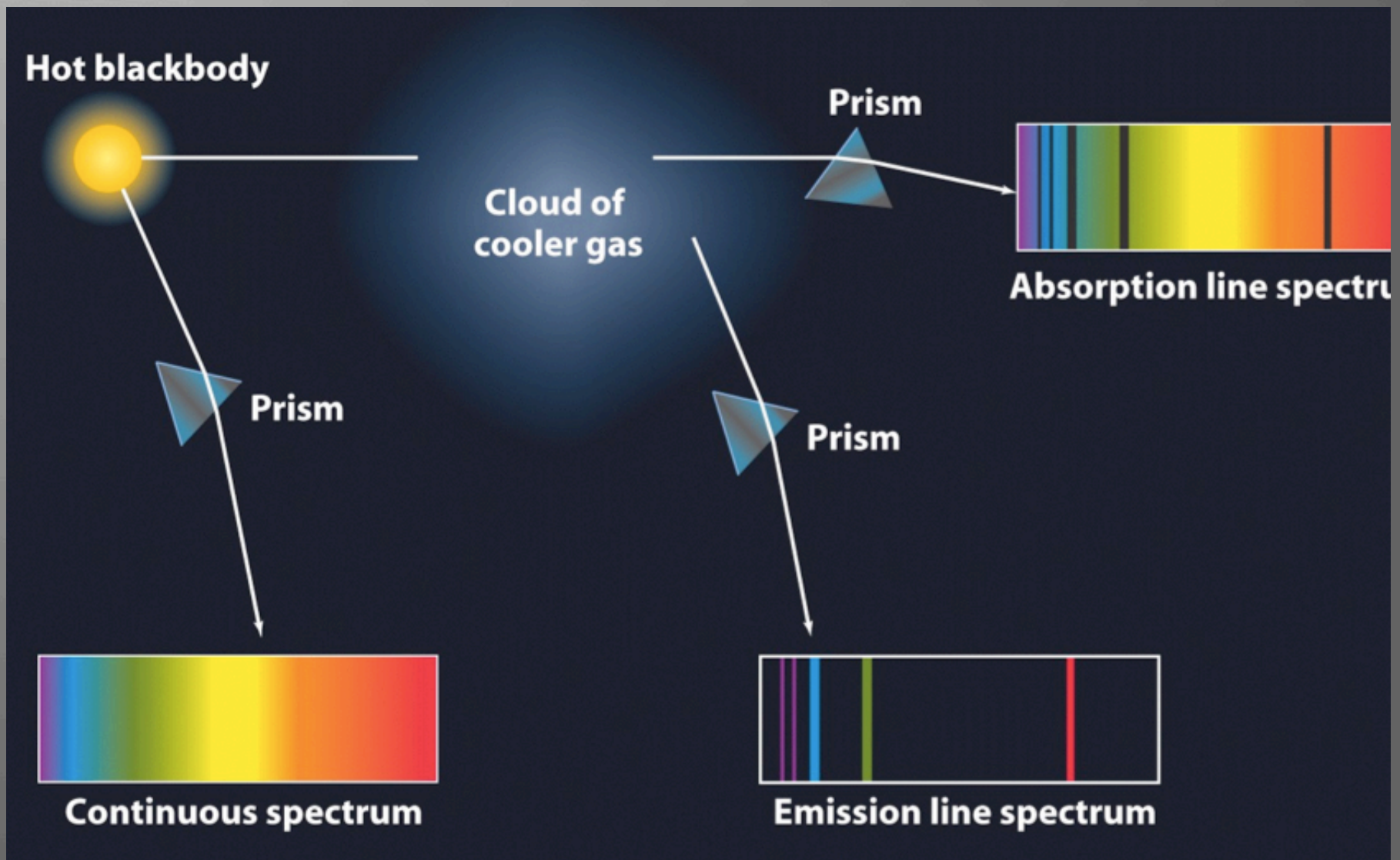
□ Βιβλιογραφία

IPAC/LEVEL5 <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5>

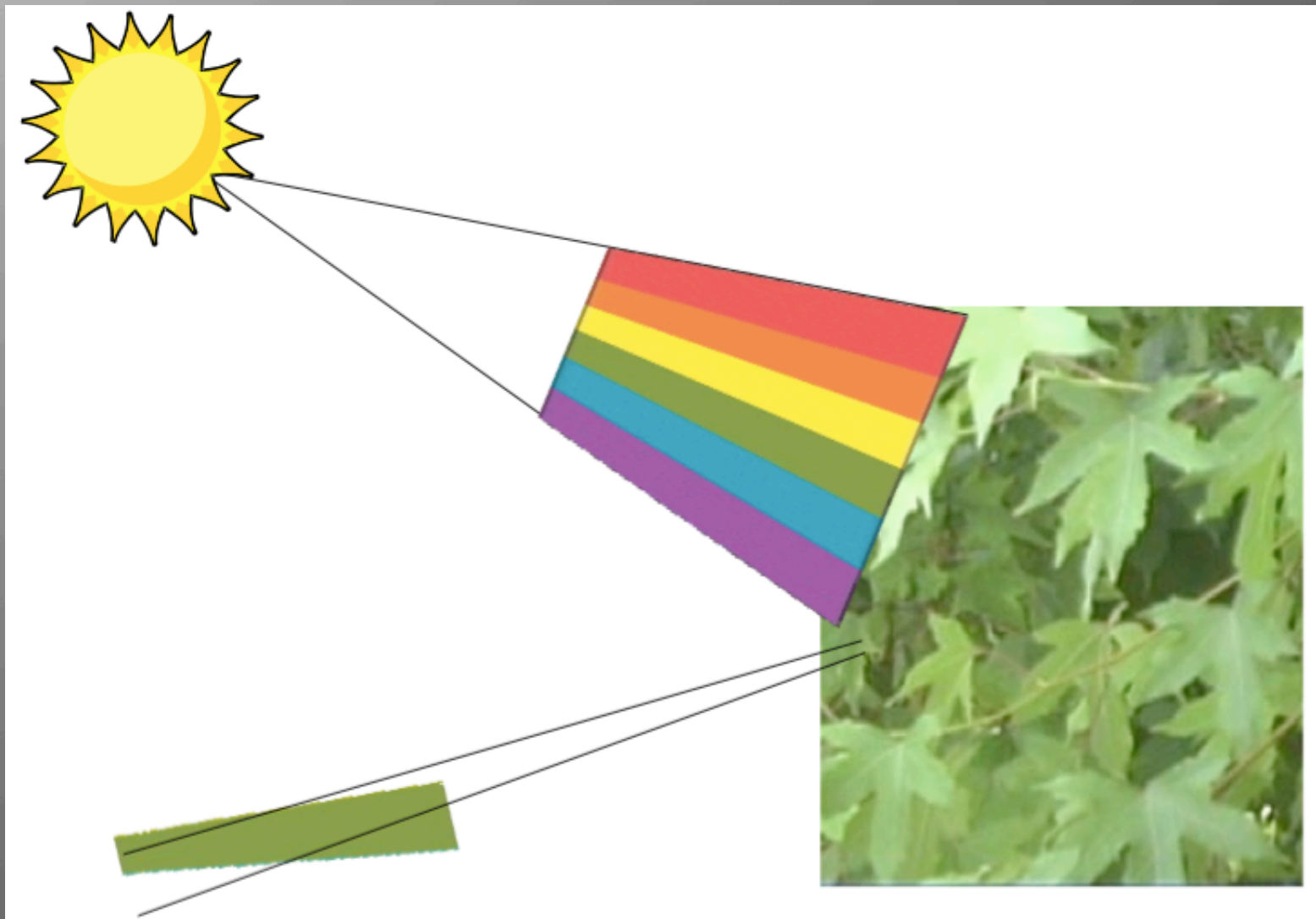
Ορατή Ακτινοβολία – Χρώματα της Ίριδας



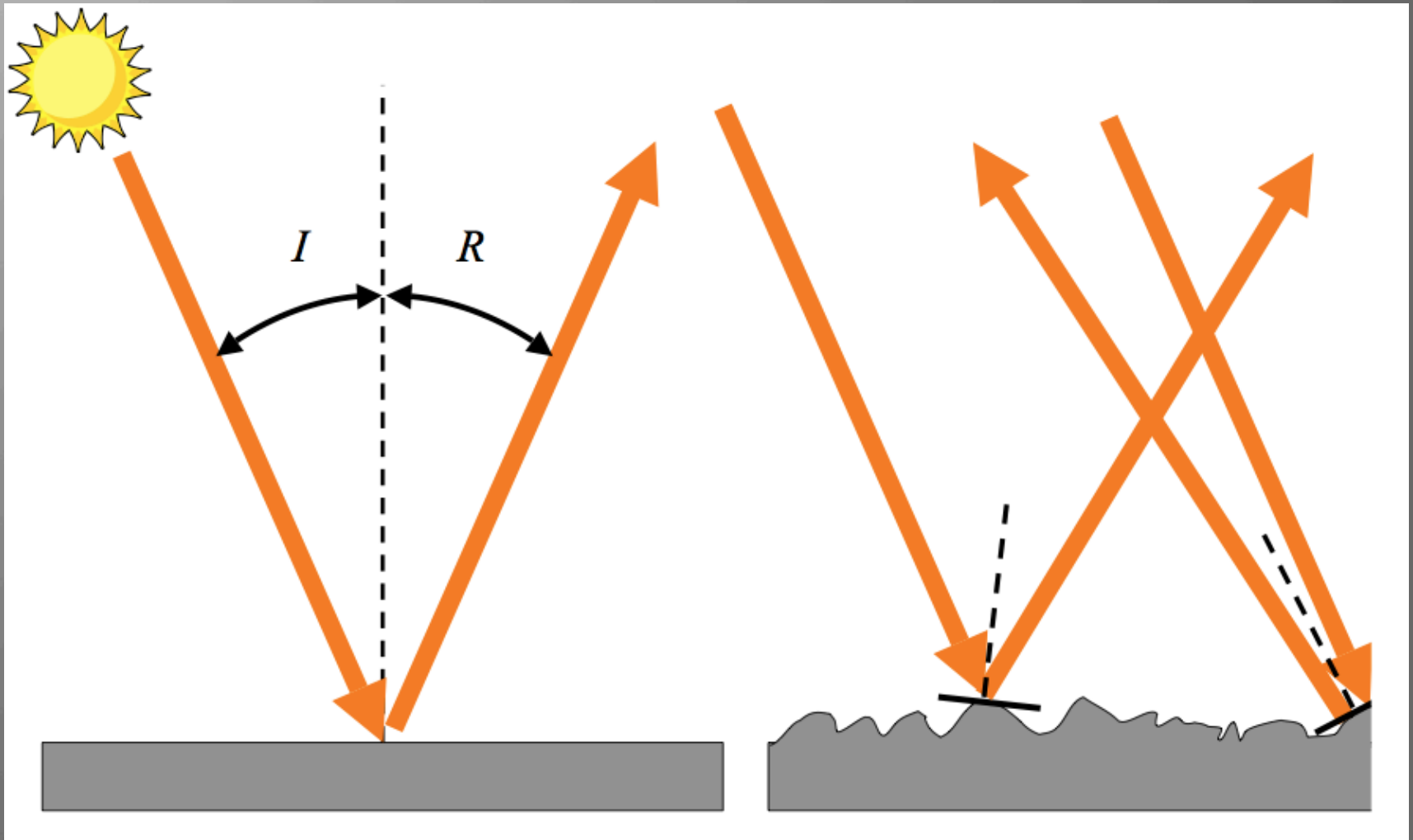
Συνεχής και Γραμμική Ακτινοβολία



Αλληλεπίδραση με ύλη - Ανάκλαση



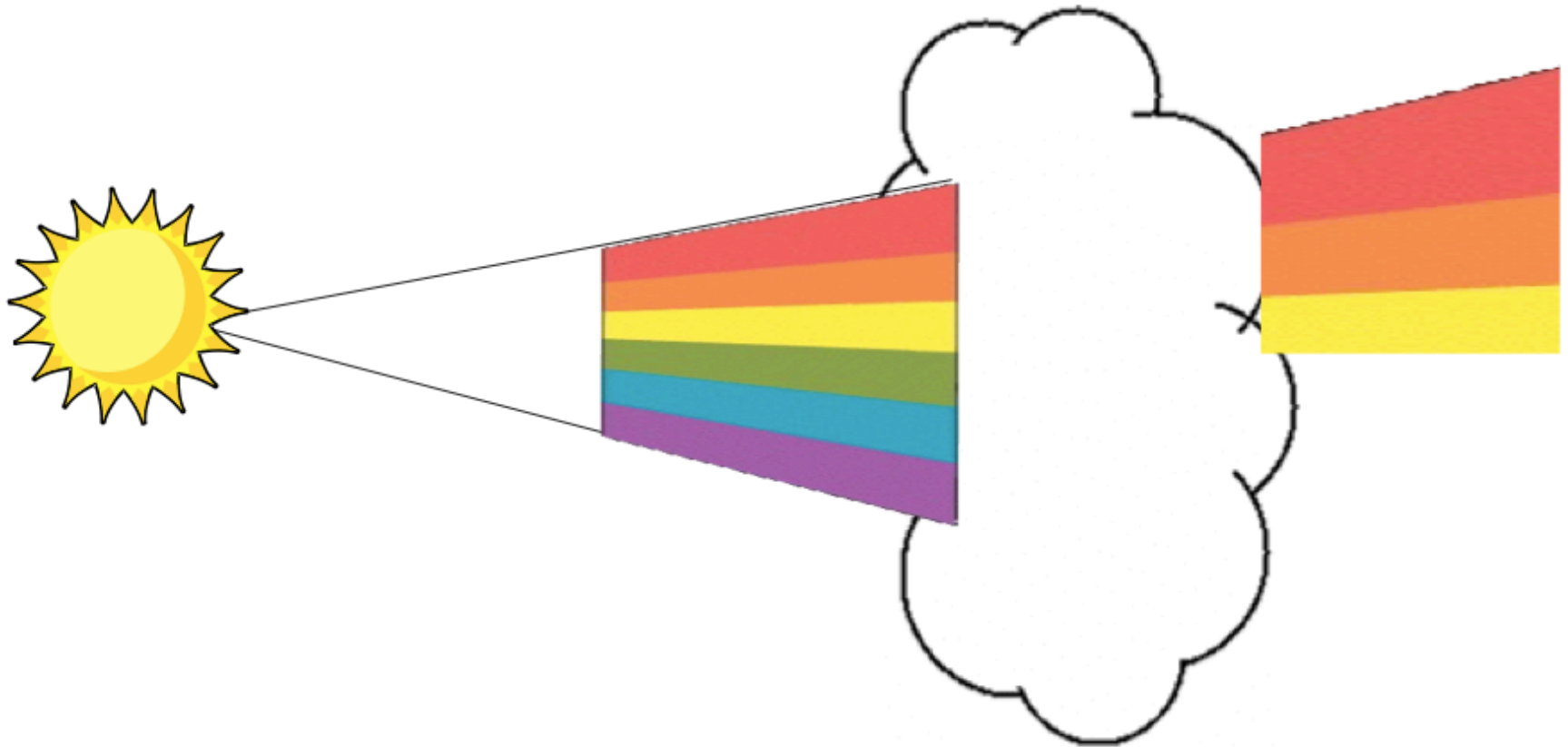
Αλληλεπίδραση με ύλη - Ανάκλαση



Ομαλή Επιφάνεια ($I=R$)

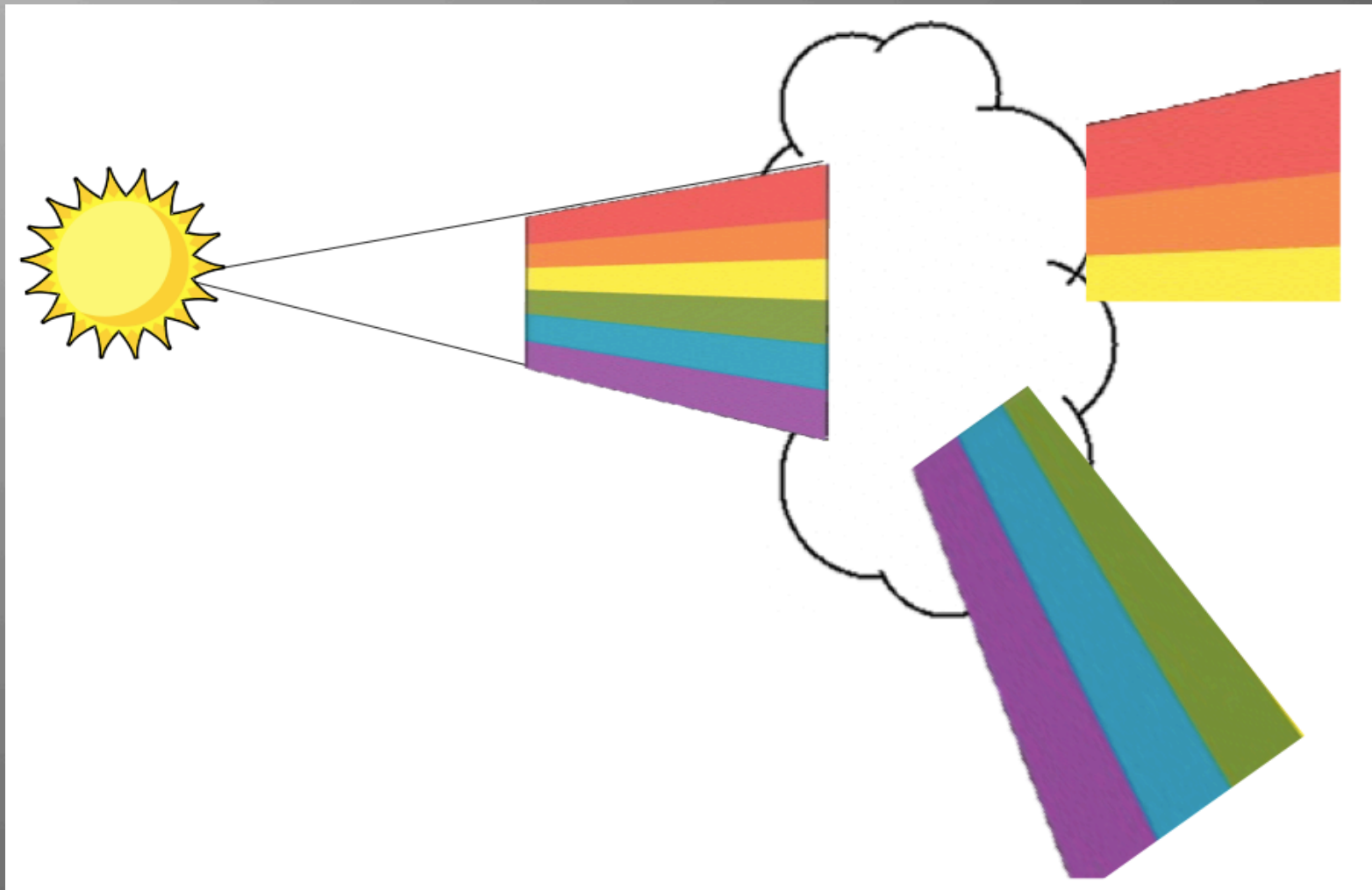
Ανώμαλη Επιφάνεια

Αλληλεπίδραση με ύλη -Απορρόφηση



$$\text{Απορρόφηση} = A(\lambda)$$

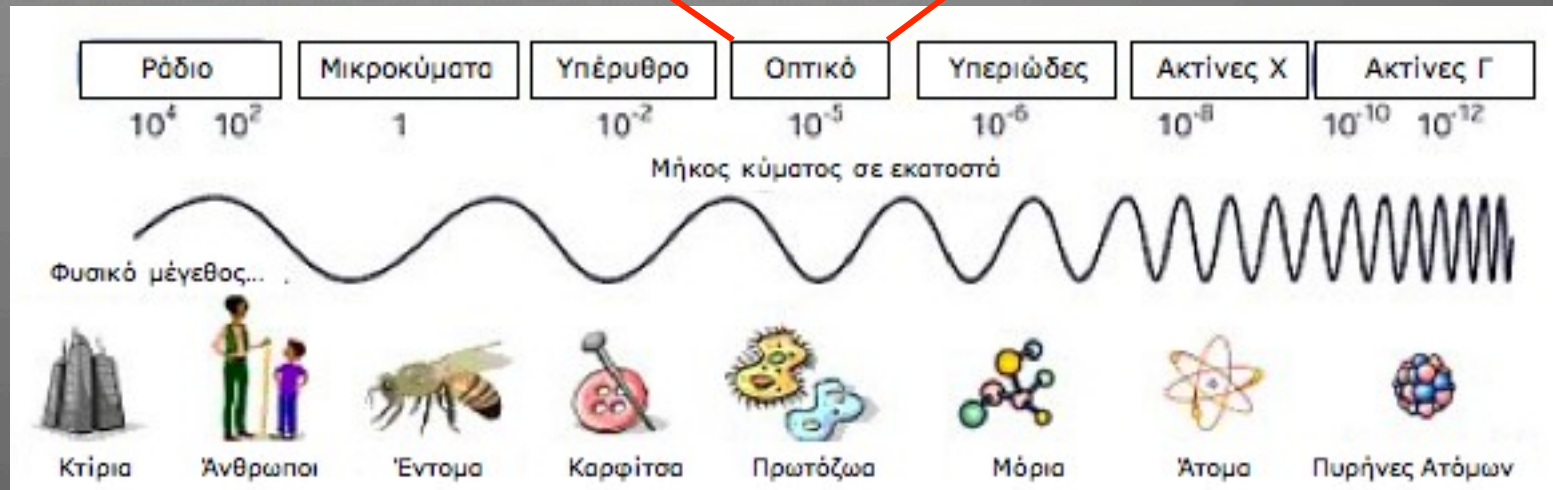
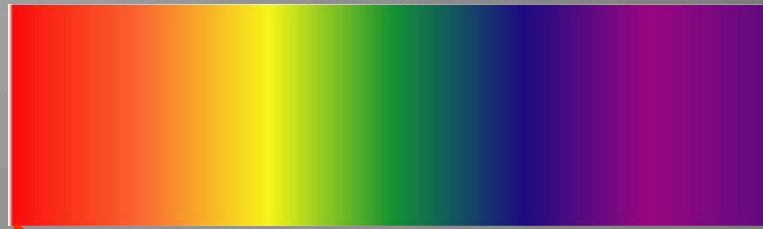
Αλληλεπίδραση με ύλη - Σκέδαση



Σκέδαση: Rayleigh: $\sim \lambda^{-4}$, Mie: $\sim \lambda^{-1}$

Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

- ❑ Το οπτικό είναι ένα μικρό μόνο μέρος της ΗΜ ακτινοβολίας
- ❑ Γνωρίζουμε ότι $λν = c$ και $E=hν$, άρα το κόκκινο φως με μεγαλύτερο μήκος κύματος από το μπλε μεταφέρει μικρότερη ενέργεια.



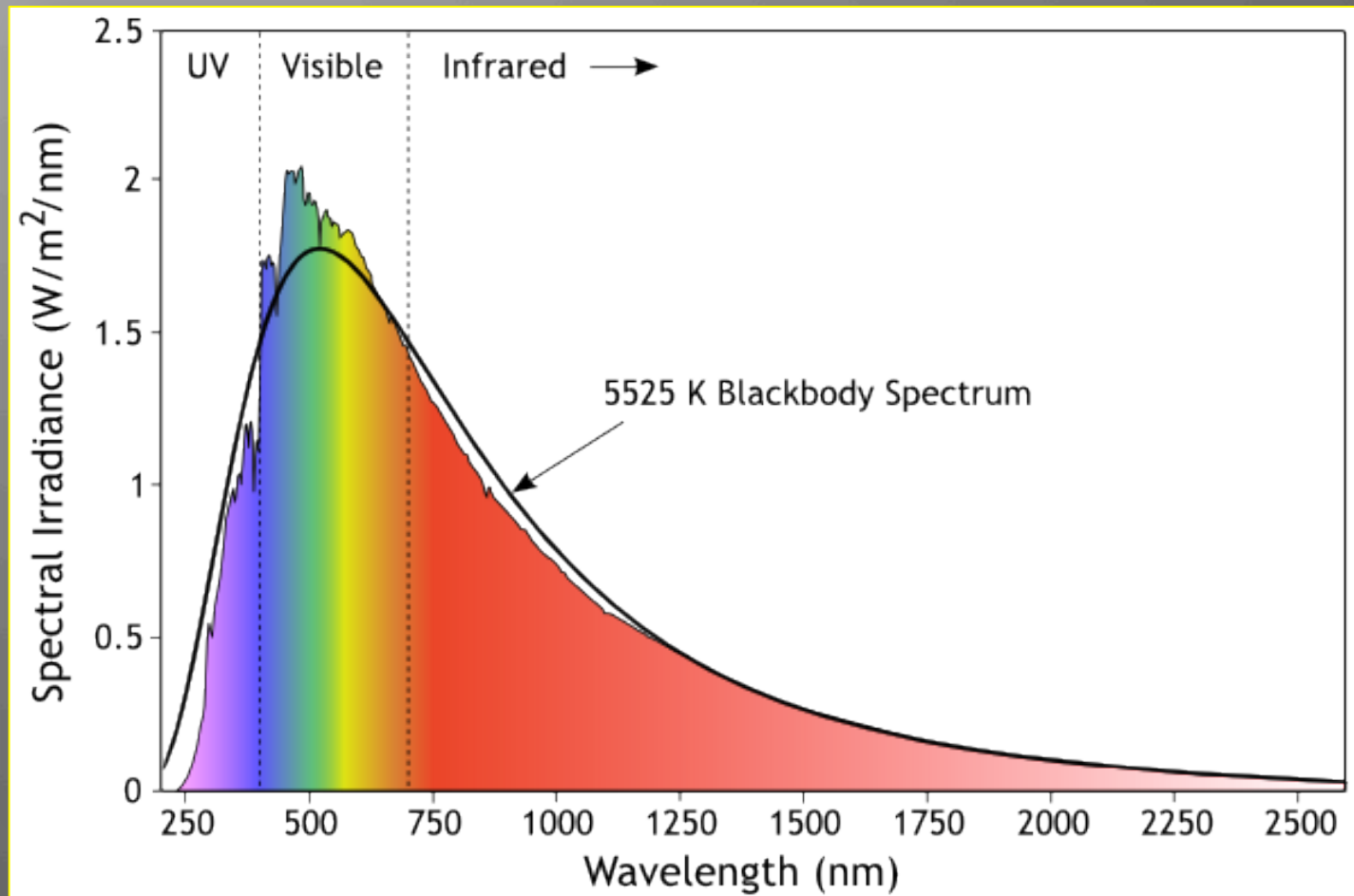
Φασματικές Γραμμές & Δομής της Ύλης

- ❑ Το 1814 ο Fraunhofer παρατήρησε ότι το φάσμα του Ήλιου είχε σκοτεινές γραμμές (απορρόφησης). Το 1857 οι Bunsen και Kirchhoff ανακαλύπτουν ότι διαφορετικά χημικά στοιχεία δημιουργούν διαφορετικές ακολουθίες γραμμών (εκπομπής)
- ❑ Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι αυτές οφείλονται στις διακριτές ενεργειακές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα δέσμια ηλεκτρόνια στα άτομα των στοιχείων καθορίζουν την ακτινοβολία που τα άτομα αυτά απορροφούν και εκπέμπουν
- ❑ Φασματικές γραμμές μπορούν να δημιουργηθούν
 - ❑ Αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ ηλεκτρονίων και πυρήνα
Ενέργειες $\sim$ eV, εκπομπή/απορρόφηση στο UV/οπτικό/near-IR, χημεία (ατομικός αριθμός)
 - ❑ Ταλαντώσεις μορίων (πχ SiO, H₂O, N₂, PAH)
Ενέργειες $\sim$ meV, εκπομπή/απορρόφηση στο mid-IR, διάγνωση ισοτόπων (μαζικού αριθμού), πολύ μικρή απορρόφηση από σκόνη
 - ❑ Περιστροφές μορίων (πχ CO, HCN)
Ενέργειες $\sim$ meV έως μεV, εκπομπή/απορρόφηση στο Far-IR, διάγνωση ισοτόπων (μαζικού αριθμού) ελάχιστη απορρόφηση από σκόνη
 - ❑ Ειδικές “απαγορευμένες μεταπτώσεις” (L-S coupling) (πχ [CII]158 μ m, [NI]205 μ m)
Ενέργεια $\sim$ μεV, εκπομπή/απορρόφηση στο Far-IR
- ❑ Το φως μπορεί να μας επιτρέψει να εκτιμήσουμε τόσο τη χημική σύσταση της ύλης που διαπερνά, αλλά και την ενέργεια και πυκνότητα στο χώρο όπου αυτό το φως παράγεται.

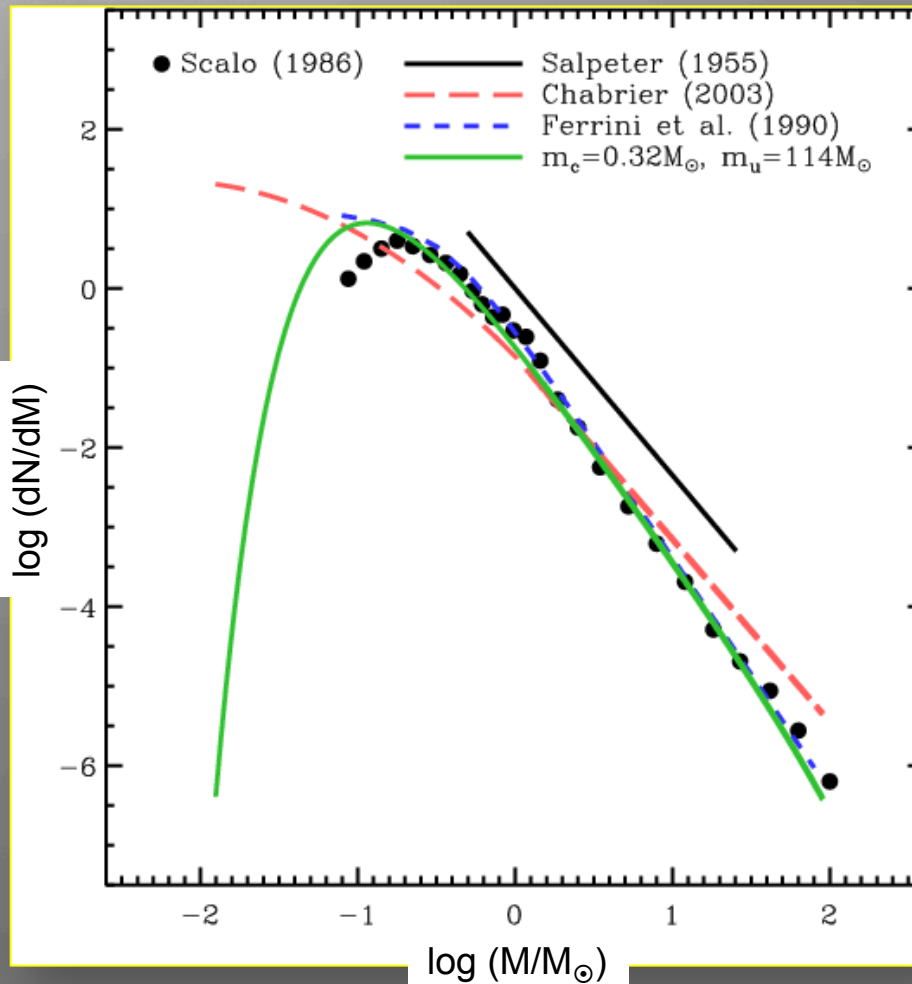
Αστέρια – Πηγές Ακτινοβολίας Μέλανος Σώματος (σχεδόν)

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$\lambda_{max}T = 0.29 \text{ cm K}$$



Η αρχική συνάρτηση μάζας των αστεριών - IMF

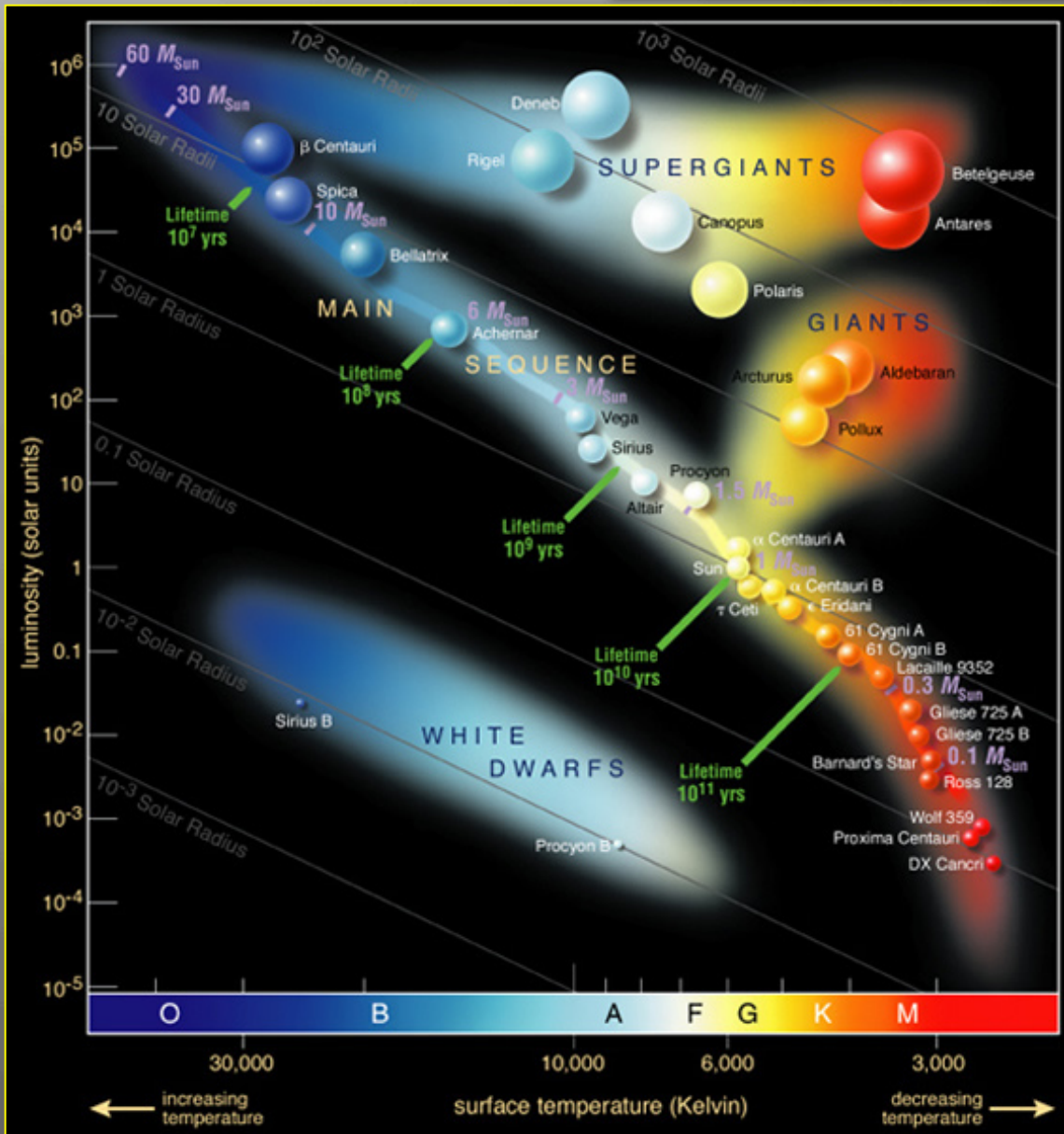


$$L \sim M^a \quad (a \sim 3.5 \text{ έως } 1)$$

$$t_{\text{MS}} \sim M^{(1-a)}$$

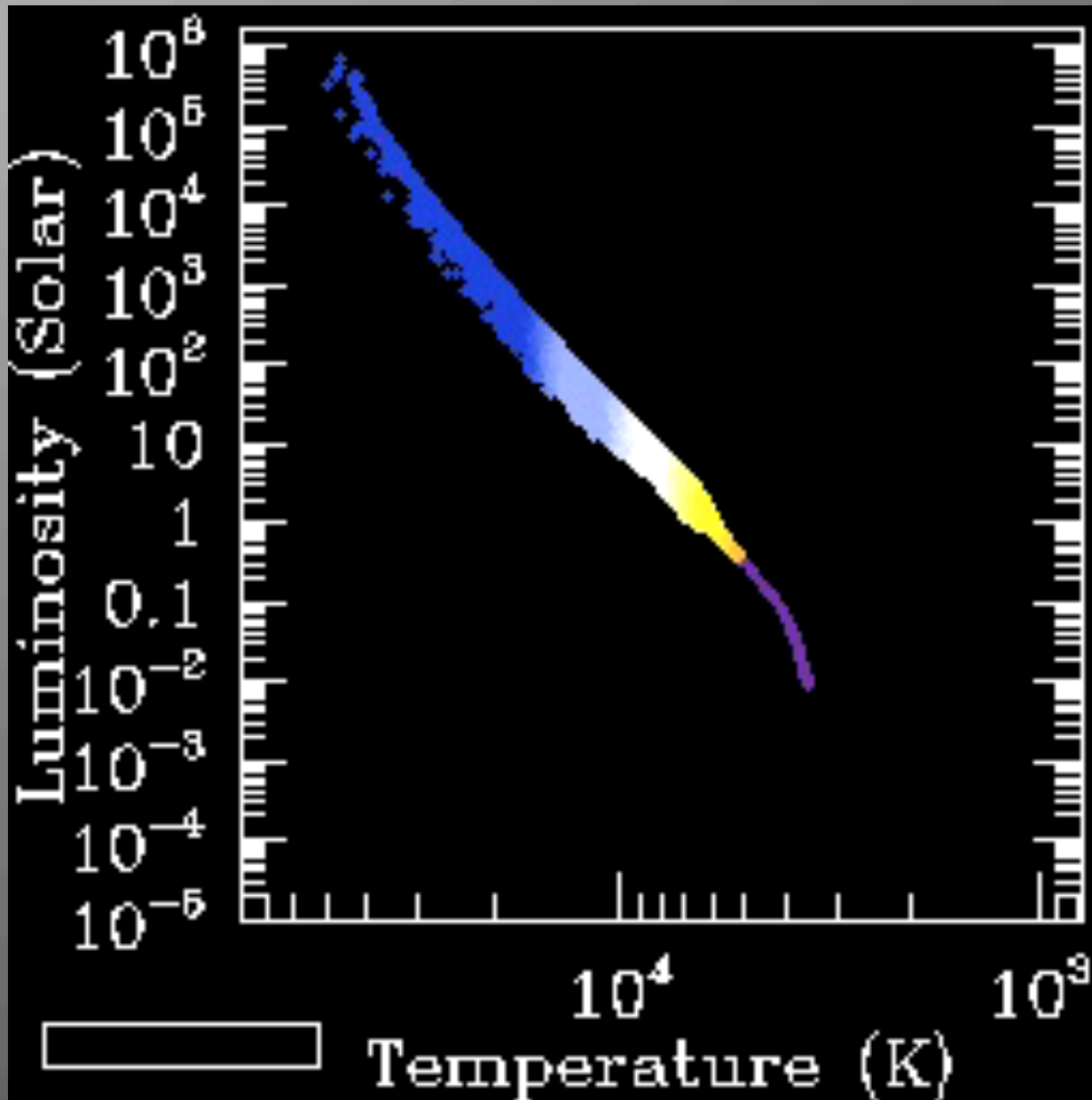
Μάζα	Ζωή στην Κύρια Ακολουθία
0.08 M _⊙	10 ¹¹ yr (brown dwarfs)
0.8 M _⊙	Hubble time
~8 M _⊙	~10 ⁷ yr (τελικά Pne ή SNe)
~80 M _⊙	< 10 ⁶ yr (άνω όριο ευσταθών αστεριών)
150-200 M _⊙	Τα μεγαλύτερα αστέρια που έχουμε δει

Το διάγραμμα HR

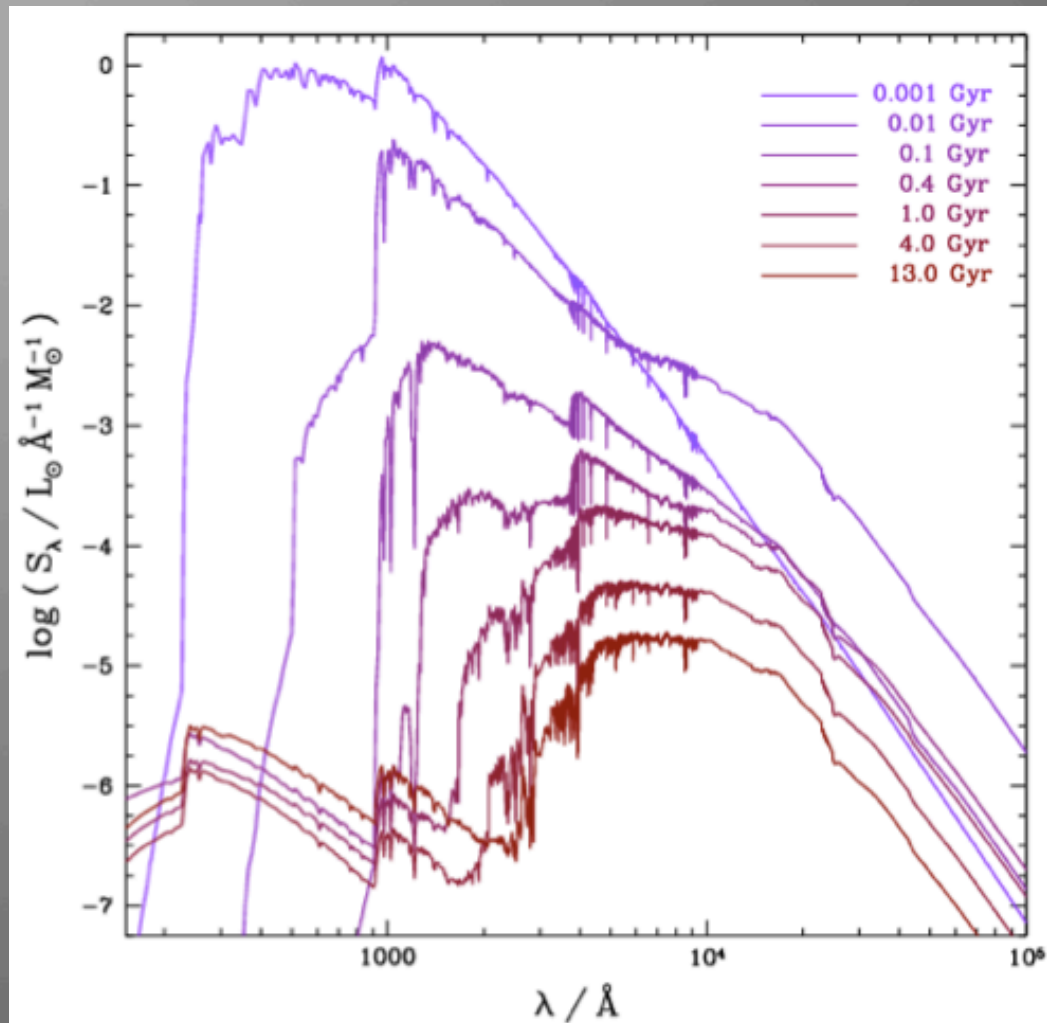


Ανάλογα με τη μάζα τους
τα άστρα καταλαμβάνουν
διαφορετικές θέσεις
στο διάγραμμα HR

Το διάγραμμα HR για 10,000 ως συνάρτηση του χρόνου



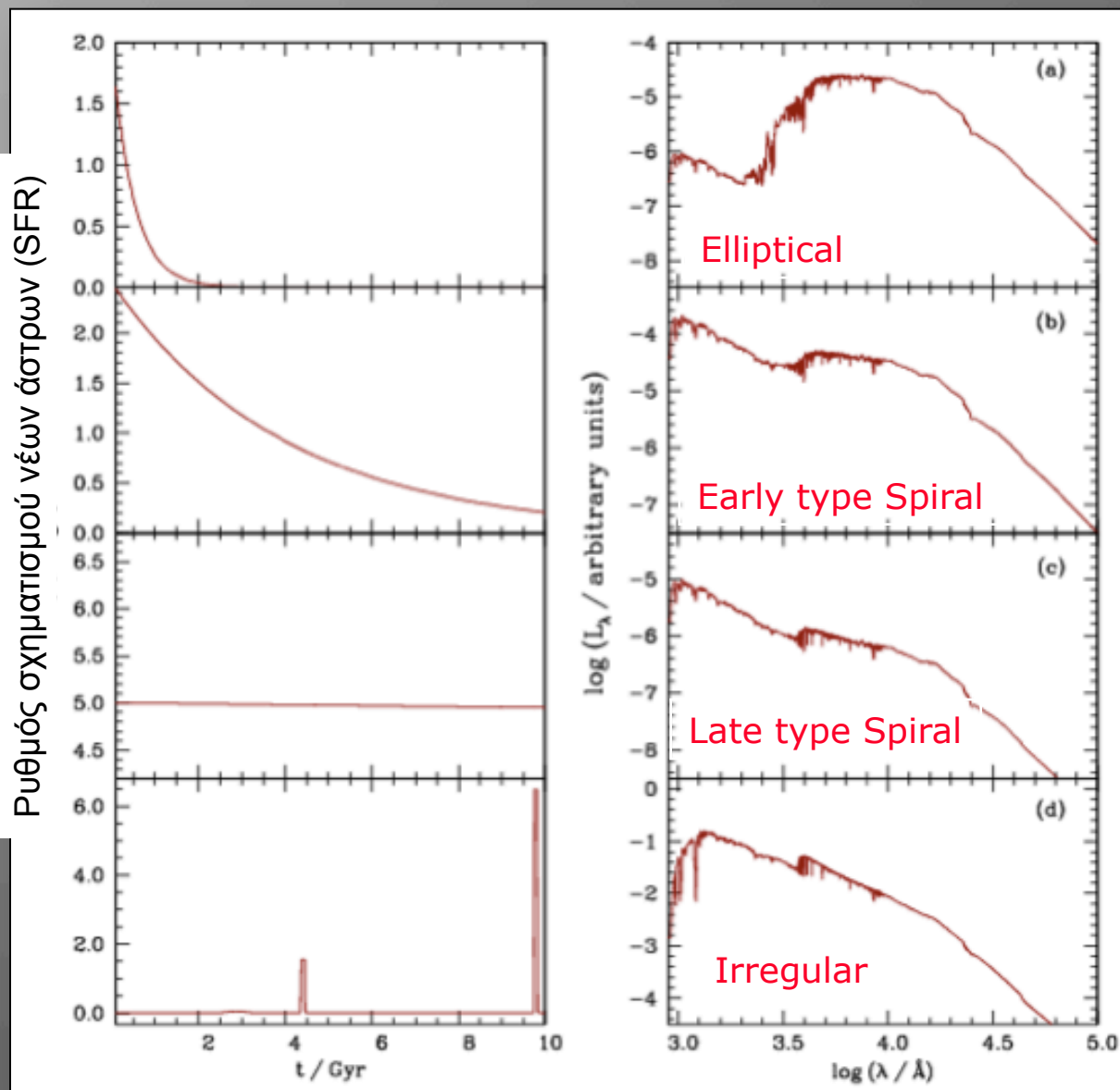
Η εκπομπή αλλάζει με την ηλικία των αστεριών



da Cunha 2008

Figure 1.7: Spectral evolution of a simple stellar population with solar metallicity and with the distribution of stellar masses following a Chabrier (2003) IMF, computed using the latest version of Bruzual & Charlot (2003) models, with ages indicated on the top right corner. Figure adapted from Bruzual & Charlot (2003).

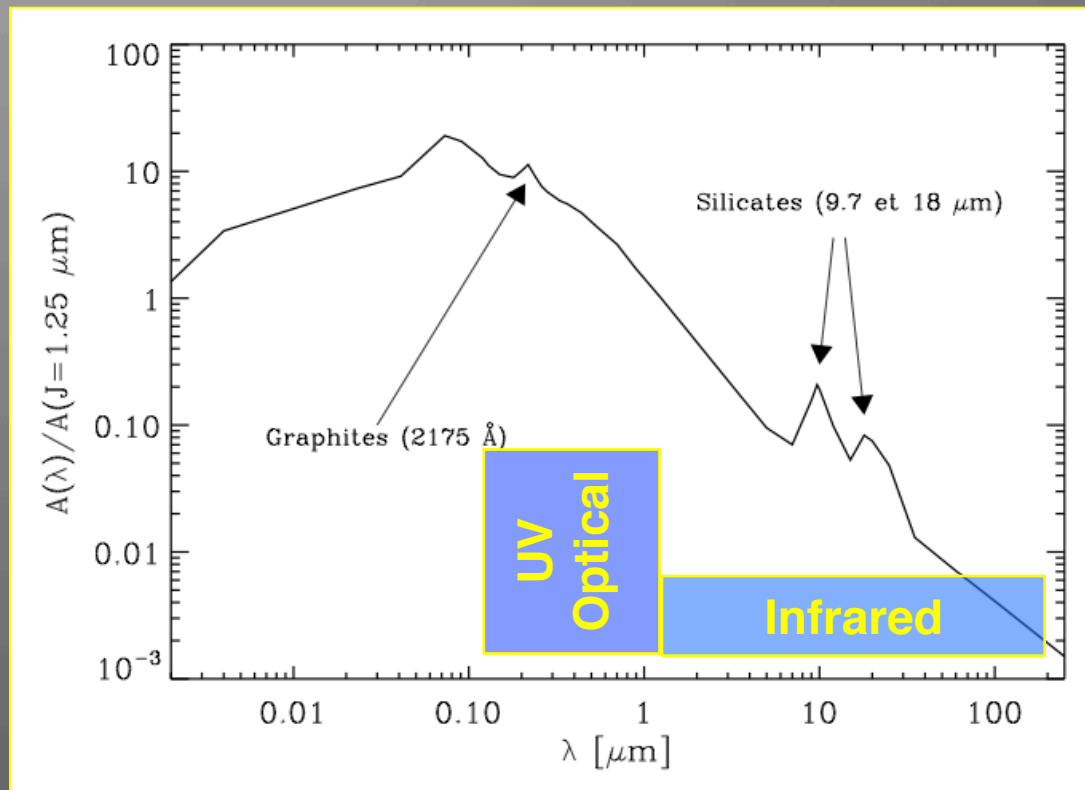
Φάσμα γαλαξιών λόγω των αστεριών τους



da Cunha 2008

Ο ρόλος της σκόνης

- ❑ Η σκόνη δημιουργείται στα τελευταία στάδια της ζωής ενός άστρου (AGB, SNe). Σχετίζεται άμεσα με τη περιοχές σχηματισμού νέων αστέρων μια που λειτουργεί ως καταλύτης για τη δημιουργία μορίων
- ❑ Η μάζα της σκόνης είναι $\sim 1\%$ της συνολικής μάζας ατομικού και μοριακού αερίου
- ❑ Η σκόνη είναι ο «κύριος υπεύθυνος» στην επιλεκτική απορρόφηση ανάλογα με το μήκος κύματος και επανεκπομπή. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως “reddening” και αποτυπώνεται από την «καμπύλη απορρόφησης» “**extinction curve**”



Είδη σκόνης

Οι κόκκοι σκόνης έχουν μέγεθος από $\sim 100 \text{ \AA}$ έως μερικά μm . Αποτελούνται κυρίως από ενώσεις άνθρακα και πυριτίου.

- “classical” dust grains → μέγεθος $0.1 \mu\text{m}$, αποτελούνται ≥ 10000 άτομα υπεύθυνοι για εκπομπή στο Far-IR, sub-mm
- very small grains → αποτελούνται ≤ 100 άτομα (μέγεθος $< 10\text{nm}$) υπεύθυνοι για την ακτινοβολία στα $\sim 10\mu\text{m}$
- PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) → Ομάδες βενζολίου με $N \sim 50$ άτομα, δημιουργούνται σε photodissociation regions.

Due to the size distribution of grains & variations in the underlying radiation field the dust temperature varies (cold, warm, hot dust)

Spectra of different dust components are fitted by modified Planck curves

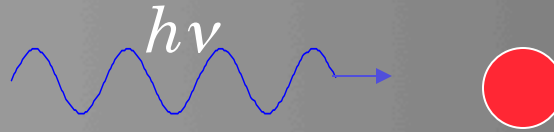
$$I_\nu \propto \epsilon_\nu B_\nu(T)$$

Power-law emissivity: $\epsilon_\nu \propto \nu^\beta$ ($\beta \sim 1-2$: is the emissivity index see Dale et al, ApJ, 2001)

Really hot dust ($\sim 200-1500\text{K}$) in a equilibrium is observed via a near/mid-IR “bump” close to tori of AGNs.

Αλληλεπίδραση φωτονίου - σκόνης

Τι θα συμβεί αν ένα φωτόνιο χτυπήσει έναν κόκκο σκόνης;
Θα ανέβει η θερμοκρασία του



$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial T} \Delta T \quad \Rightarrow \quad h\nu = C_v \Delta T$$

Γενικά η θερμοχωρητικότητα C_v , εξαρτάται από τη T . Το μέγιστο της T , T_p δίνεται από τη σχέση :

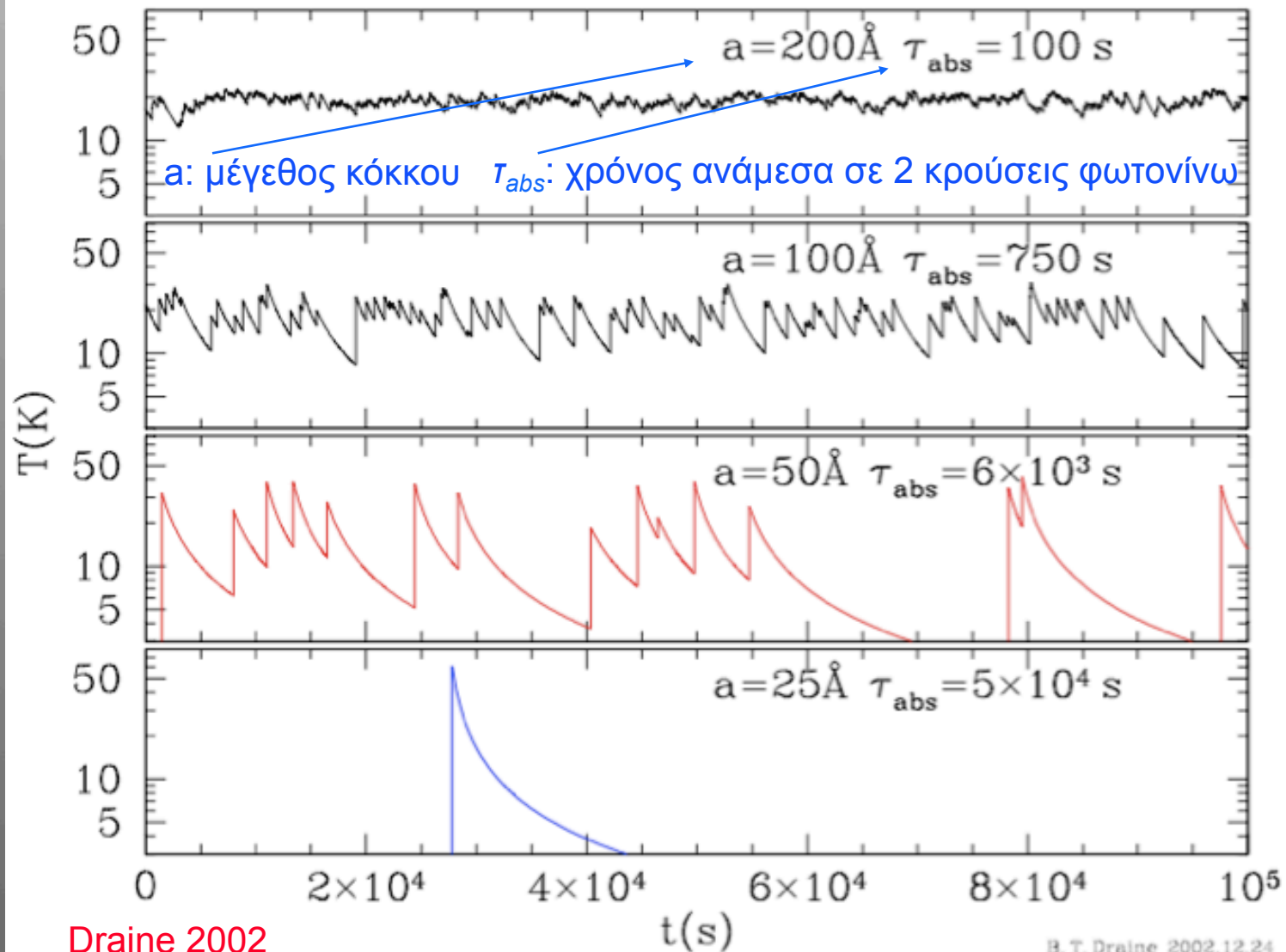
$$h\nu = \int_0^{T_p} C_v(T) dT$$

όπου

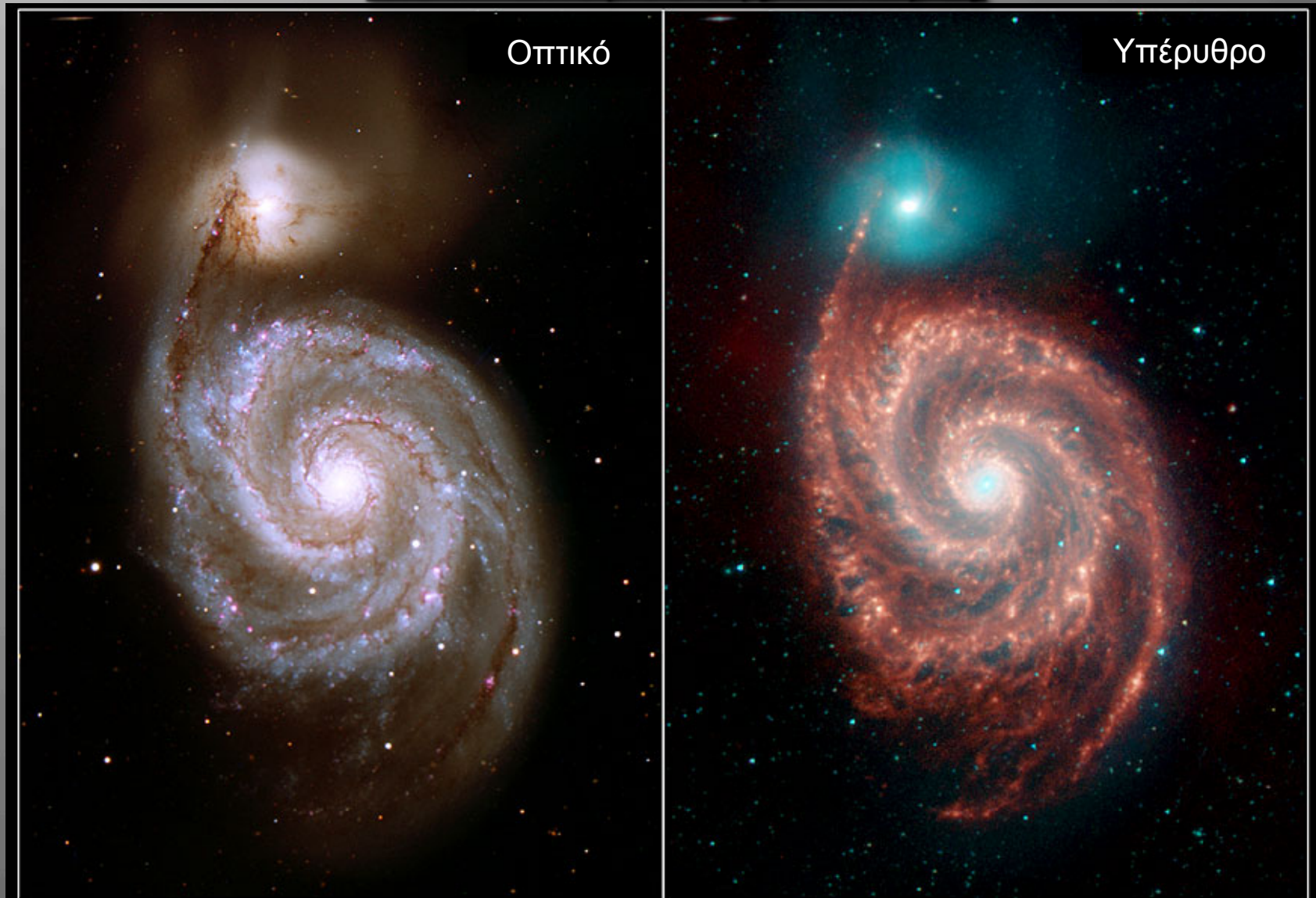
$$C_v \propto T^3 \quad \text{για } T < \Theta_D$$

$$C_v = 3Nk \quad \text{για } T > \Theta_D$$

Μια μέρα στη ζωή ενός κόκκου σκόνης



M51 - Σπειροειδής Γαλαξίας



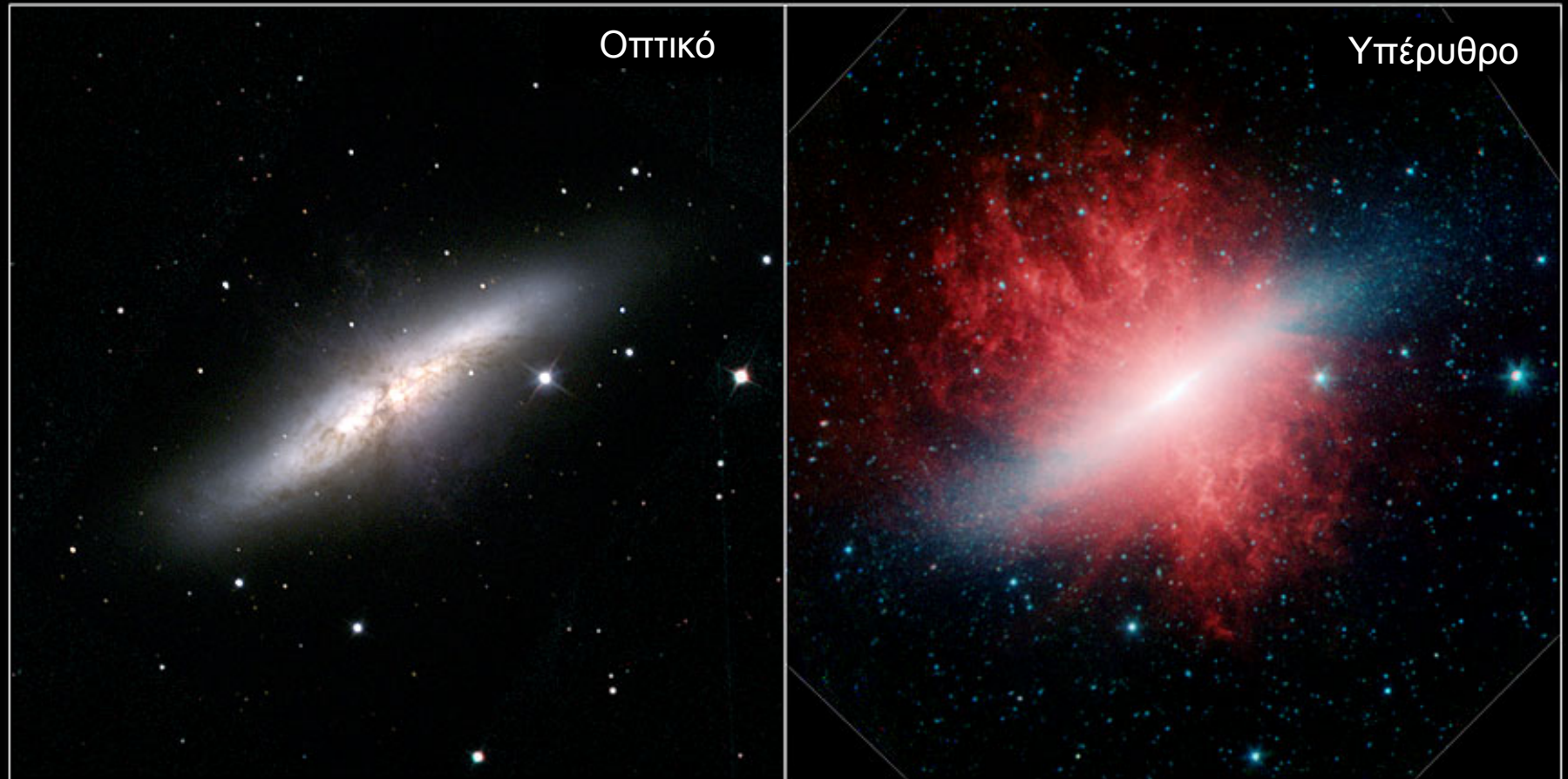
Spiral Galaxy M51 ("Whirlpool Galaxy")

NASA / JPL-Caltech / R. Kennicutt (Univ. of Arizona)

Spitzer Space Telescope • IRAC

ssc2004-19a

M82 - Ακανόνιστος Γαλαξίας



“Cigar” Galaxy M82

NASA / JPL-Caltech / C. Engelbracht (Steward Observatory) and the SINGS team

Spitzer Space Telescope • IRAC

ssc2006-09a

M104 - ο Γαλαξίας «Σομπρέρο»

Visible + Infrared



ΟΠΤΙΚΟ



ΥΠΕΡΥΘΡΟ



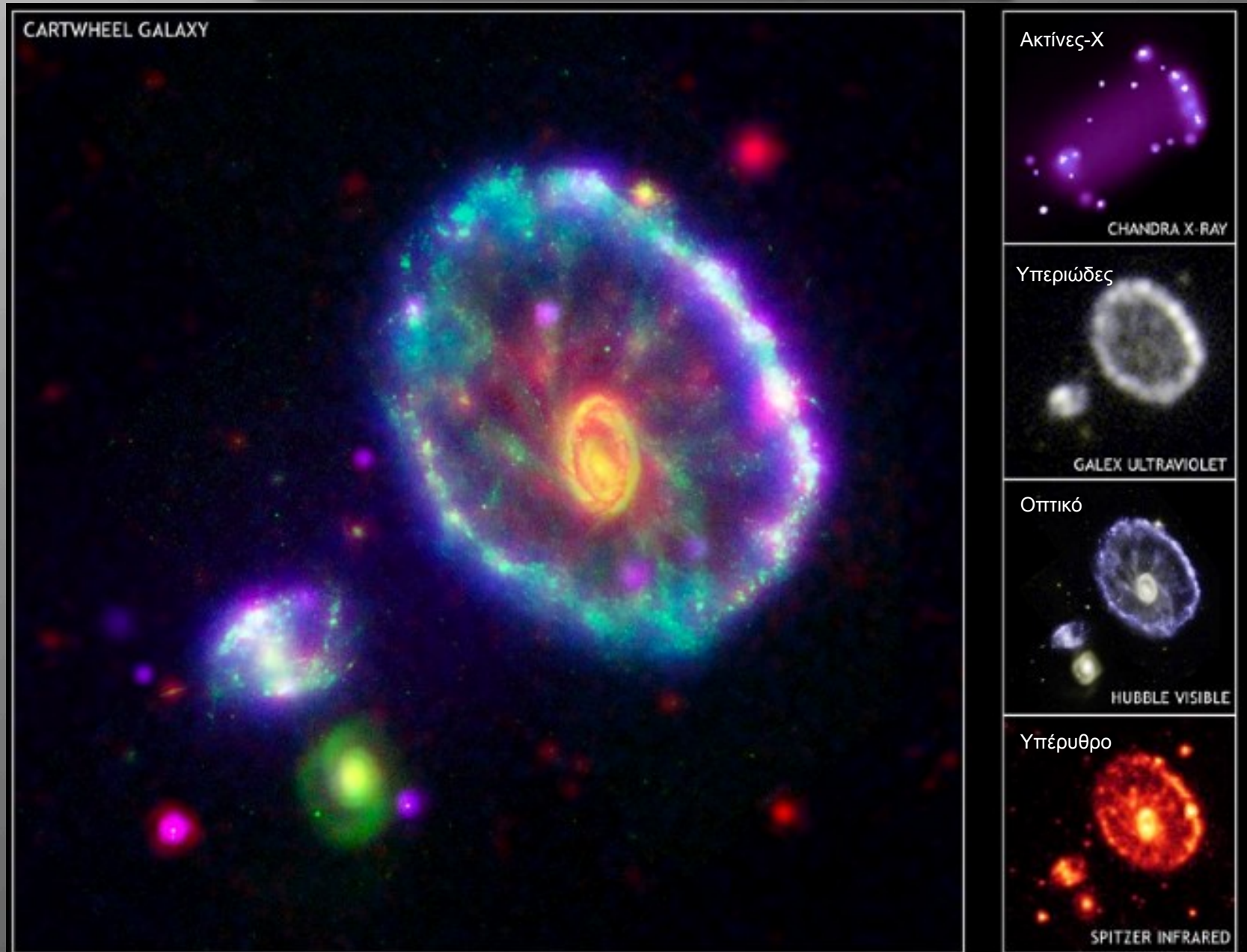
Sombrero Galaxy/Messier 104

Spitzer Space Telescope • IRAC

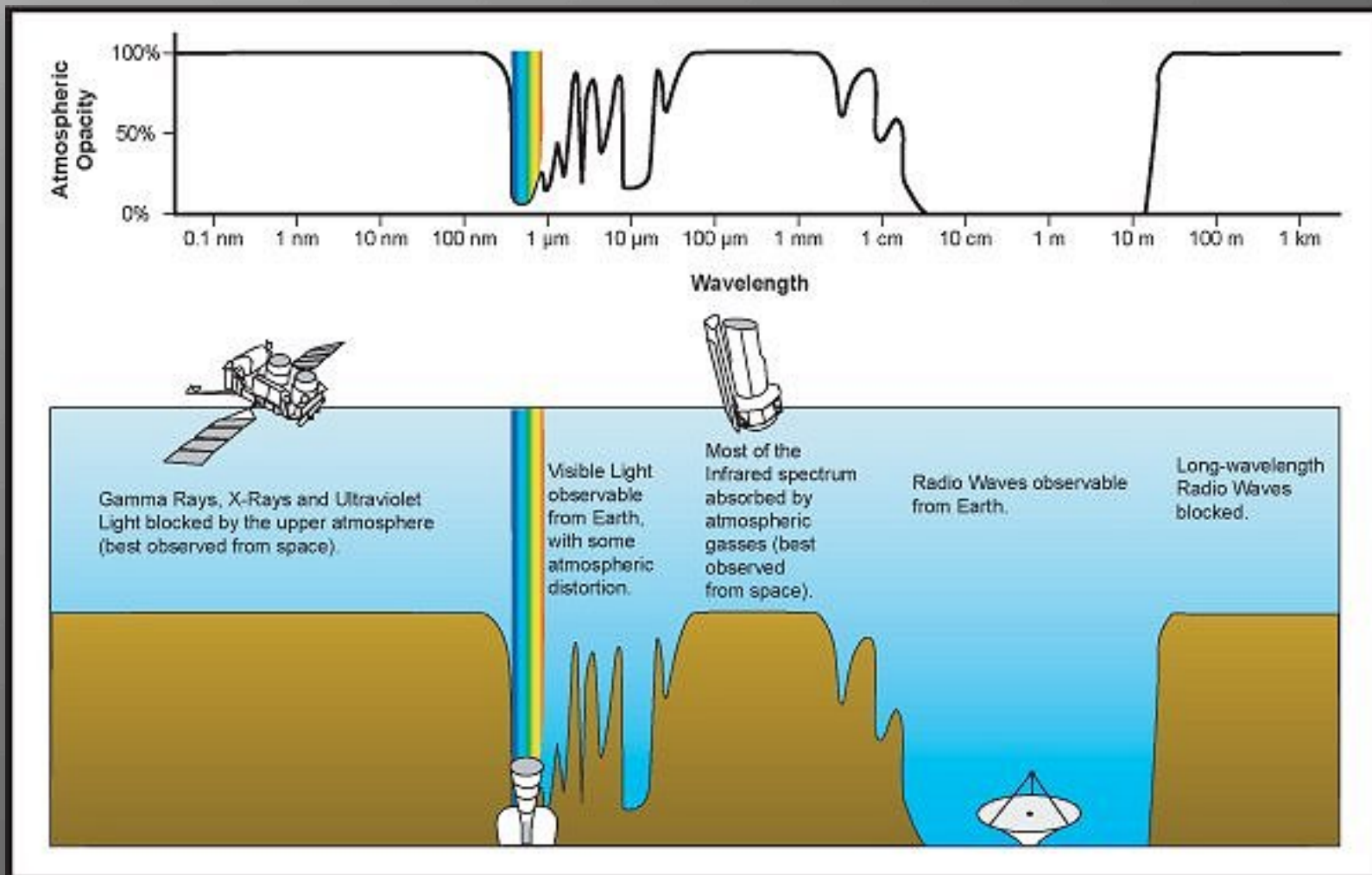
NASA / JPL-Caltech / R. Kennicutt (University of Arizona), and the SINGS Team

Visible: Hubble Space Telescope/Hubble Heritage Team
ssc2005-11a

Cartwheel - Δακτυλιοειδής Γαλαξίας



Η ατμόσφαιρα απορροφά/σκεδάζει μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας



Μετρώντας την Η/Μ ακτινοβολία

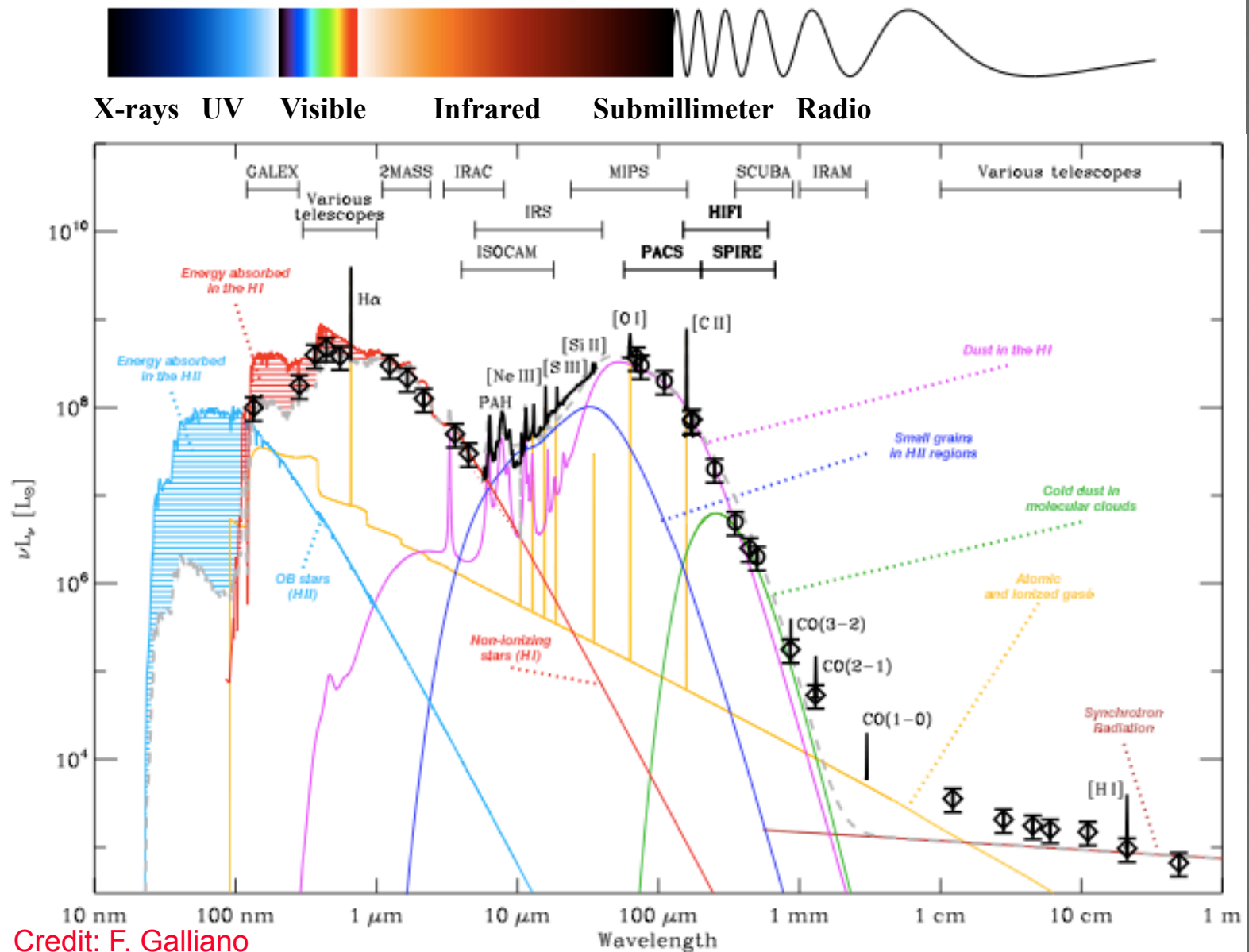
Η βασική παρατηρήσιμη ποσότητα είναι η ροή=flux (f):

- ❑ Flux is the energy incident per unit time within a defined EM band per unit surface area (cross section of our detector)
- ❑ Συνήθως αναφερόμαστε σε “Bolometric” flux, θεωρώντας ότι γίνονται παρατηρήσεις σε όλα τα μήκη κύματος (ή συχνότητα) => **ΠΡΟΦΑΝΩΣ ΑΔΥΝΑΤΟΝ ΝΑ ΜΕΤΡΗΘΕΙ**
- ❑ Practically we measure incident flux within finite bands, engulfing typically 1-20% of the total flux. (ie Flux in the U,B,V,K, filters or “IR” and “soft/hard X-ray” fluxes)
- ❑ Επίσης αναφερόμαστε συχνά σε “Monochromatic” fluxes : within infinitesimal intervals
 f_ν : flux within the frequency interval ν and $\nu+d\nu$
 f_λ : flux within the wavelength interval λ and $\lambda+d\lambda$
- ❑ Αφού $f_\nu d\nu = f_\lambda d\lambda$ και $\nu = c/\lambda$, τότε $\nu f_\nu = \lambda f_\lambda$
- ❑ Τυπικές μονάδες
 $[f_\nu] = \text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$; $[f_\lambda] = \text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Angstrom}^{-1}$
 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

Γνωρίζοντας της απόσταση (d) προς την πηγή μπορούμε να μετρήσουμε την λαμπρότητα (Luminosity) $L = 4\pi d^2 * f$ (Ισχύς)

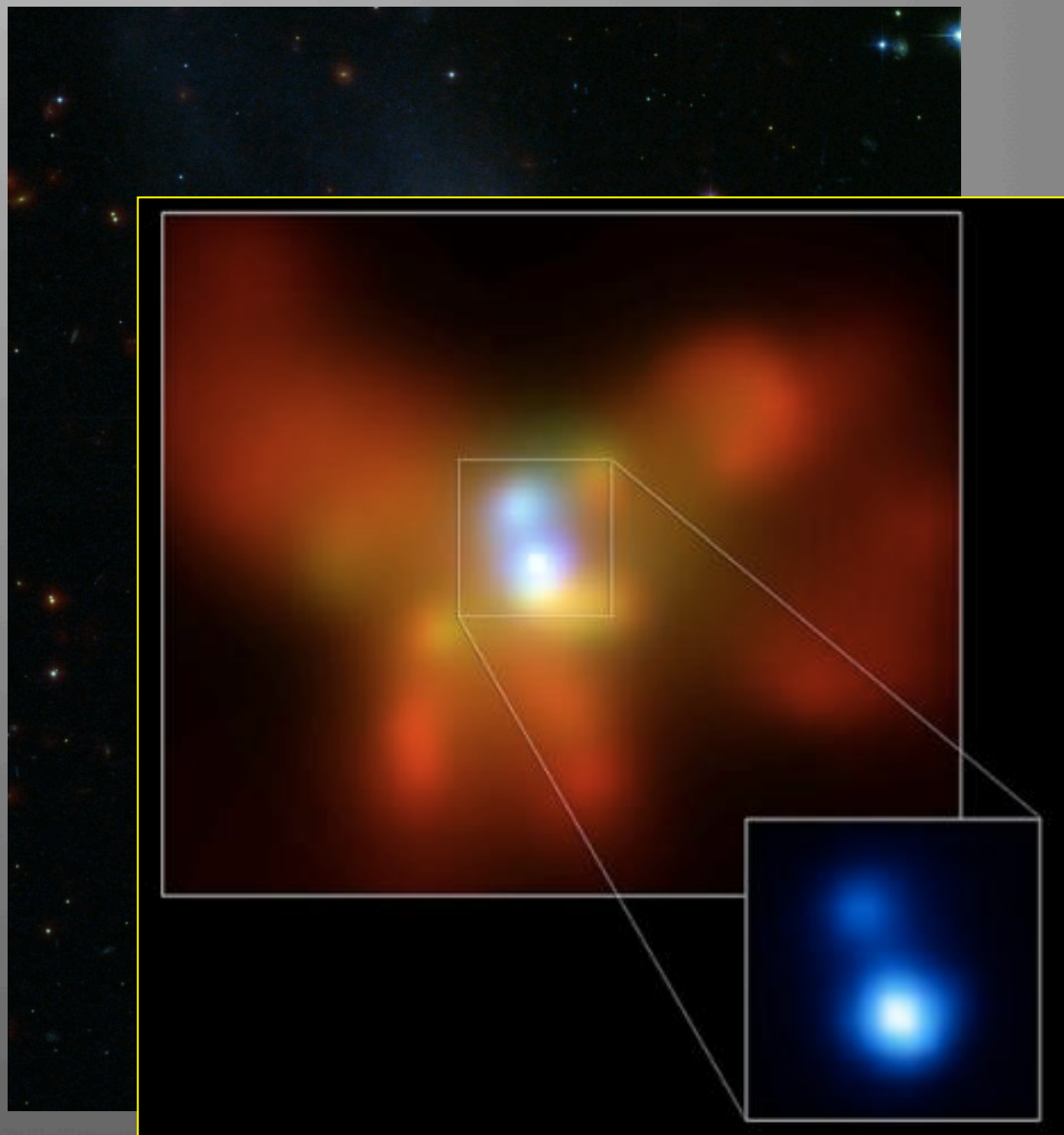
Μονάδες: W or erg s^{-1} or Solar Bolometric luminosities $L_\odot = 3.9 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$

SED Decomposition of a Galaxy



Credit: F. Galliano

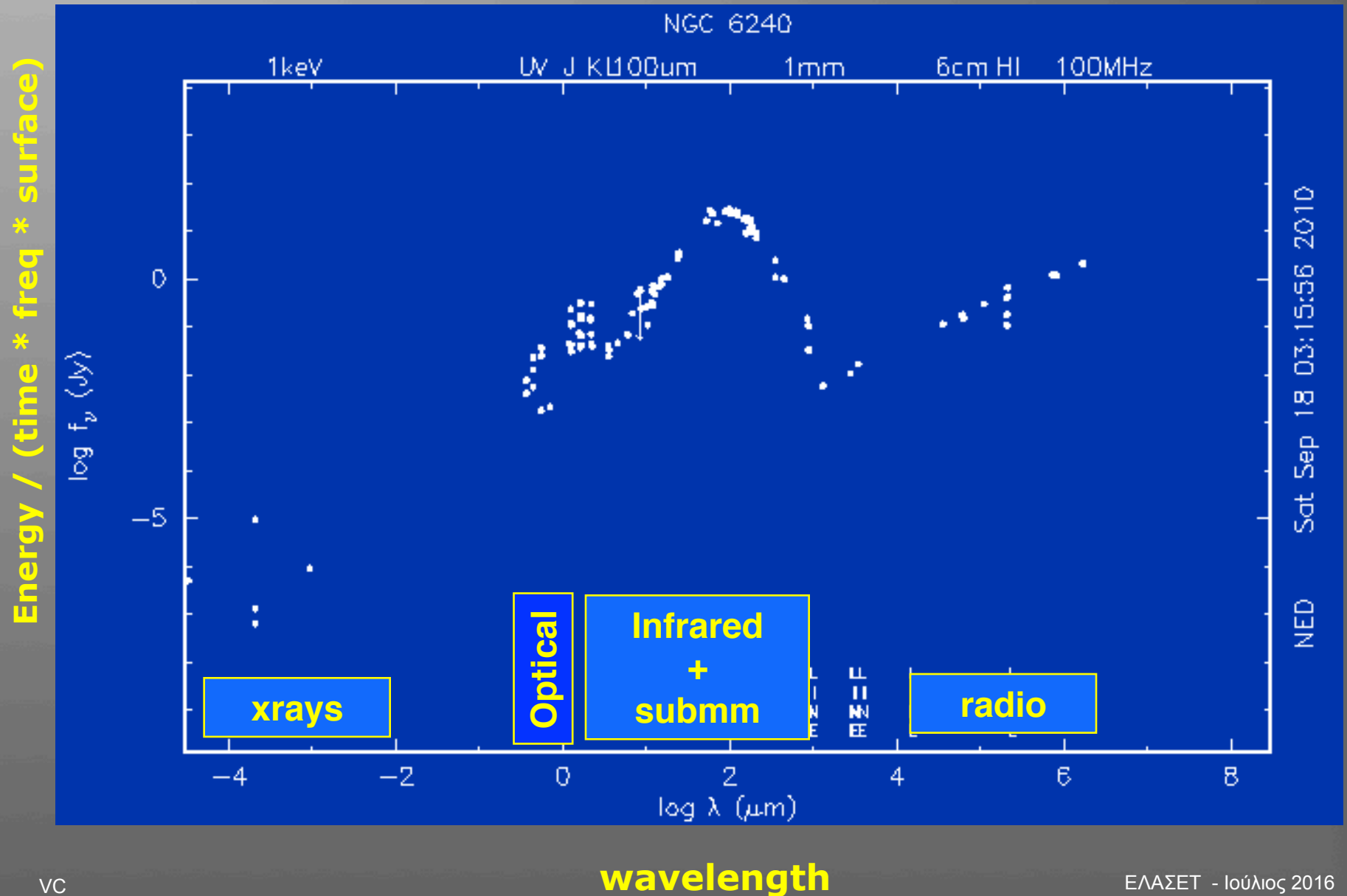
NGC6240 – IR luminous interacting system



$$L(\text{IR}) \sim 6 \times 10^{11} L_{\odot}$$

Δύο πυρήνες με μία
υπερμαζική μελανή οπή
στον καθένα

The SED of NGC6240



The SED of NGC6240

