

# ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ

Για να μπορέσουμε να ξεκινήσουμε στο ταξίδι μας στην κατανόηση του Σύμπαντος και των φυσικών διεργασιών που συνετλούνται είναι απαραίτητη προϋπόθεση να γνωρίζουμε να μετράμε κοσμικές αποστάσεις.

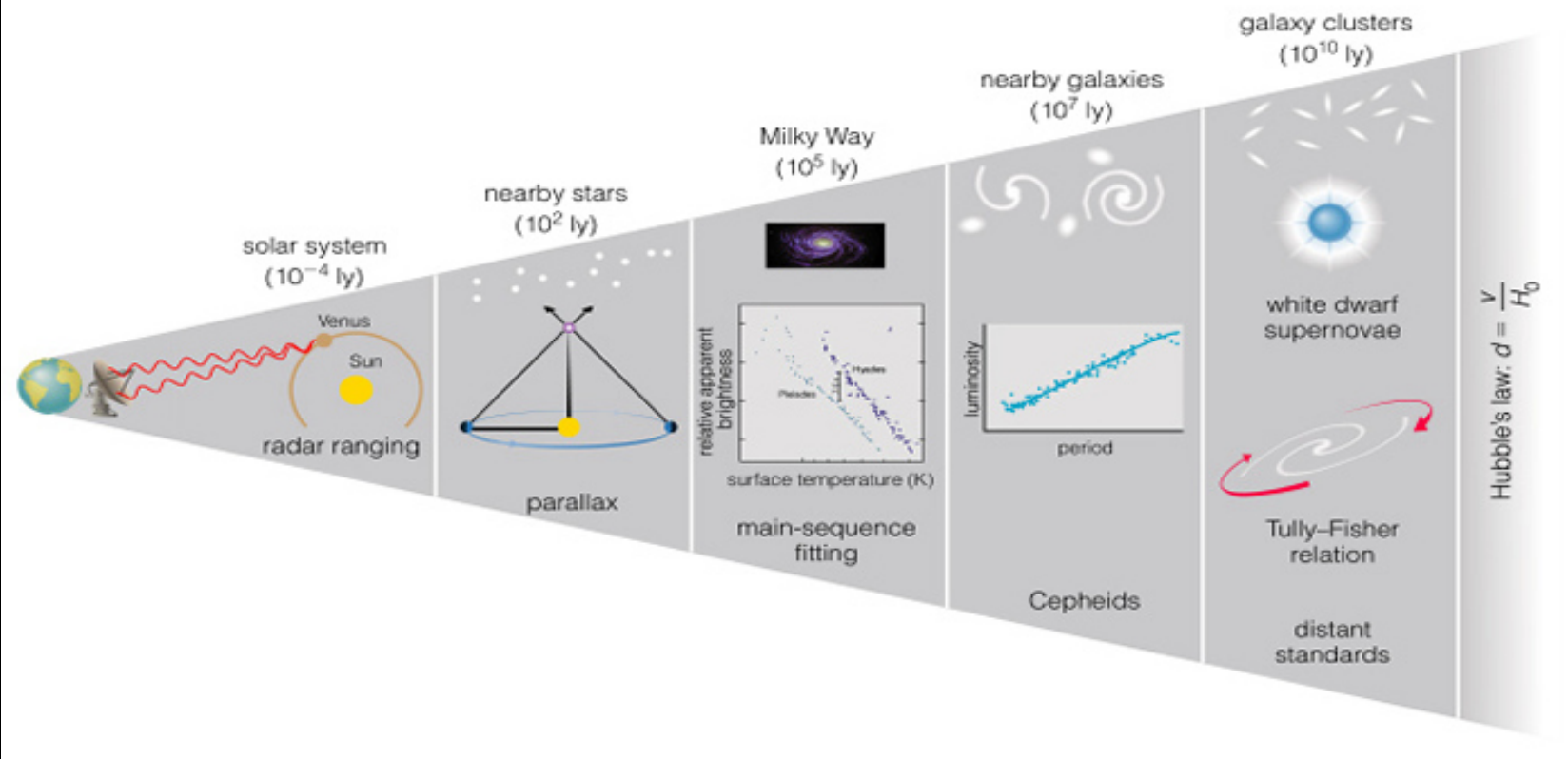
**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Λόγω του πεπερασμένου της ταχύτητας του φωτός **αναμιγνύεται πάντα η έννοια της απόστασης με τον χρόνο**, γεγονός που μας δυσκολεύει νοηματικά όταν αναφερόμαστε σε αντικείμενα που είναι μακριά (οπότε είναι και νεαρά σε ηλικία).

⇒ 1 AU = απόσταση Γης - Ηλίου = **149 598 000 Km**

⇒ Έτος φωτός = Η απόσταση που διανύει σε ένα έτος και στο κενό το φως = 63000 AU =  **$9.5 \times 10^{12}$  Km**

⇒ Parsec = 3.24 έτη φωτός (Mpc = 1,000 pc)

⇒ arc-second = (1 μοίρα/3600)



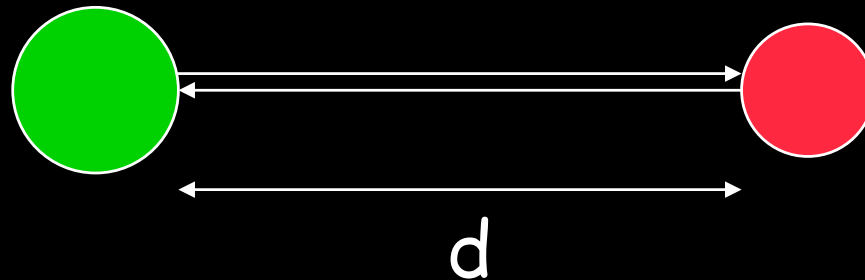
- Οι κοσμικές απόστάσεις είναι τεράστιες και δεν μπορούμε να τις μετρήσουμε απ'ευθείας (άμεσα) αλλά μόνο με έμμεσους τρόπους.
- Αυτές οι μέθοδοι είναι ουσιαστικά πολύ απλοί, και βασίζονται κατά κύριο λόγο σε μαθηματικά Γυμνασίου
- Άμεσοι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουμε πολύ κοντινές απόστάσεις (μέσα στο ηλιακό σύστημα και κοντινά αστέρια). Για να προχωρήσουμε στις κοσμικές αποστάσεις που κυριαρχούν στο Σύμπαν, πρέπει να οικοδομήσουμε μια «Σκάλα Αποστάσεων», ξεκινώντας από κοντά και άμεσα και προχωρώντας με συνδετικούς κρίκους μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων στα μακριά και έμμεσα...

# 1° Σκαλοπάτι: Η απόσταση Ηλίου-πλανητών

Σήμερα χρησιμοποιούμε μεθόδους ακριβείας, όπως υπολογίζοντας τον χρόνο ανάκλασης των ραδιοκυμάτων πάνω στην επιφάνεια των πλανητών.

Αφού τα ραδιοκύματα κινούνται με ταχύτητα φωτός,  $c$ , η απόσταση βρίσκεται εύκολα από τύπους:

$$2d = c \delta t \rightarrow$$
$$d = c \delta t / 2$$



## 2° Σκαλοπάτι: Η απόσταση των κοντινών αστέρων μέσω τριγωνομετρικής παράλλαξης

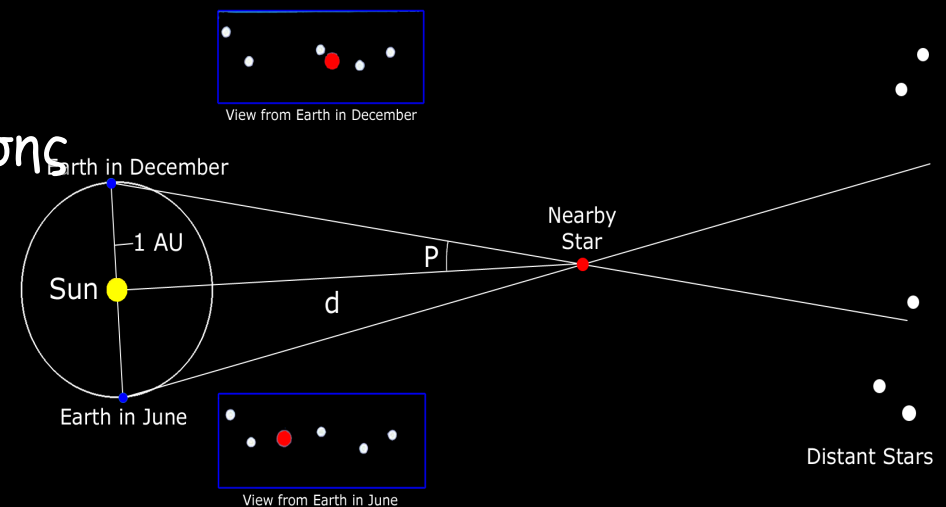
Με παρατηρήσεις της γωνιακής απόκλισης των αστέρων με διαφορά 6 μηνών παίρνουμε την απόσταση αστέρων σε πολλαπλάσια της αστρονομικής μονάδας.

Πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον γνωστό μαθηματικό **Friedrich Bessel** (1784-1846) το 1838.

Χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια παρατήρησεις και με επίγεια τηλεσκόπια μπορούμε να μετράμε αποστάσεις έως και 30 πάρσεκ (100 έτη φωτός). Ενώ με δορυφόρους όπως ο «Ίππαρχος», μέχρι 1500 έτη φωτός.



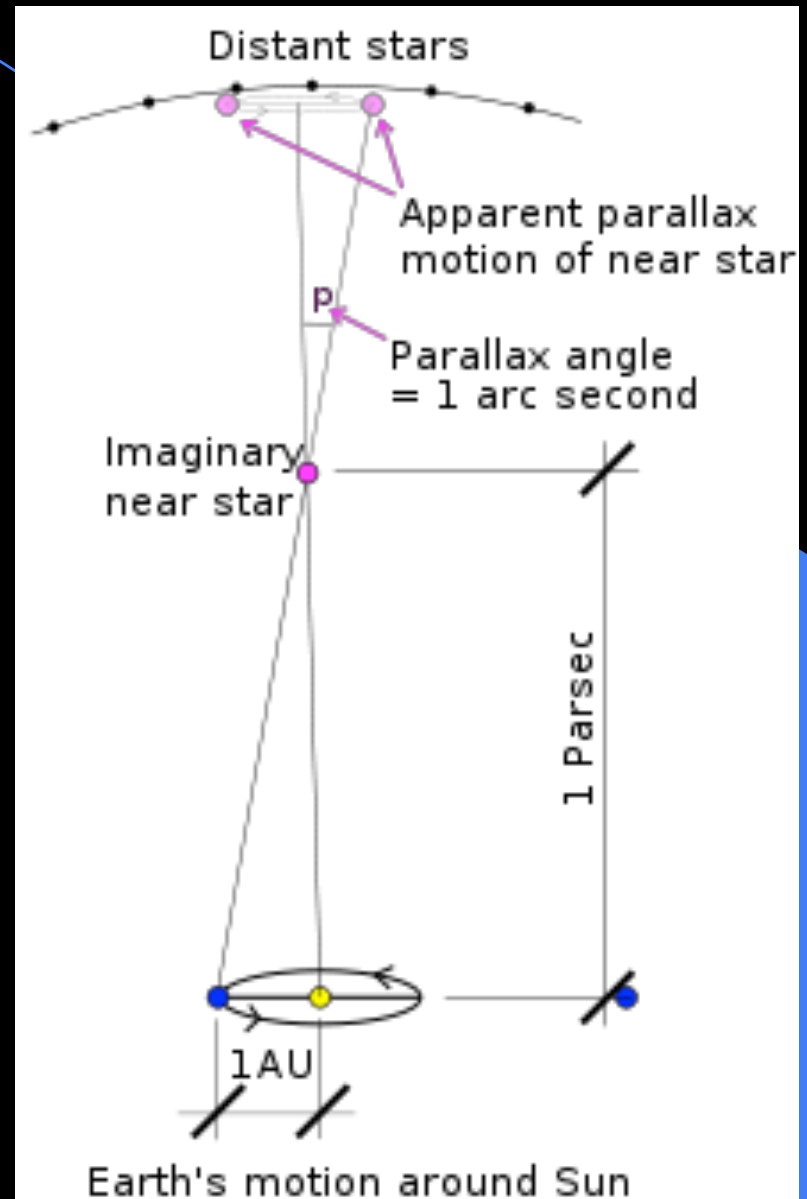
Είναι ειρωνεία ότι το κατεστημένο στην αρχαιότητα κατέκρινε το ηλιοκεντρικό μοντέλο και τον υπολογισμό της απόστασης Ηλίου-Γης του Αρίσταρχου επειδή σύμφωνα με αυτά και τις μετρούμενες παραλλάξεις, θα έπρεπε τα αστέρια να βρίσκονται παρα πολύ μακριά... Γεγονός φυσικά εντελώς αληθές!



## 2<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση των κοντινών αστέρων μέσω τριγωνομετρικής παράλλαξης

### Ορισμός Parsec:

Η απόσταση ενός νοητού αστερά που εμφανίζει παράλλαξη ενός δευτερολέπτου της μοίρας.



# ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

Βασική σχέση είναι μεταξύ φαινόμενης και απόλυτης λαμπρότητας δηλαδή μεταξύ ροής (λαμπρότητας) και φωτεινότητας:

$$f = L / 4\pi r^2$$

Παρένθεση:

Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούμαι στην Αστρονομία ως μονάδες φωτεινότητας/λαμπρότητας το φαινόμενο και απολύτο μέγεθος.

$$m = -2.5 \log f + C_a$$

$$M = -2.5 \log L + C_b$$

**Μέτρο Απόστασης (Distance Modulus):**

$$m - M = 5 \log r - 5 \text{ (σε pc)}$$

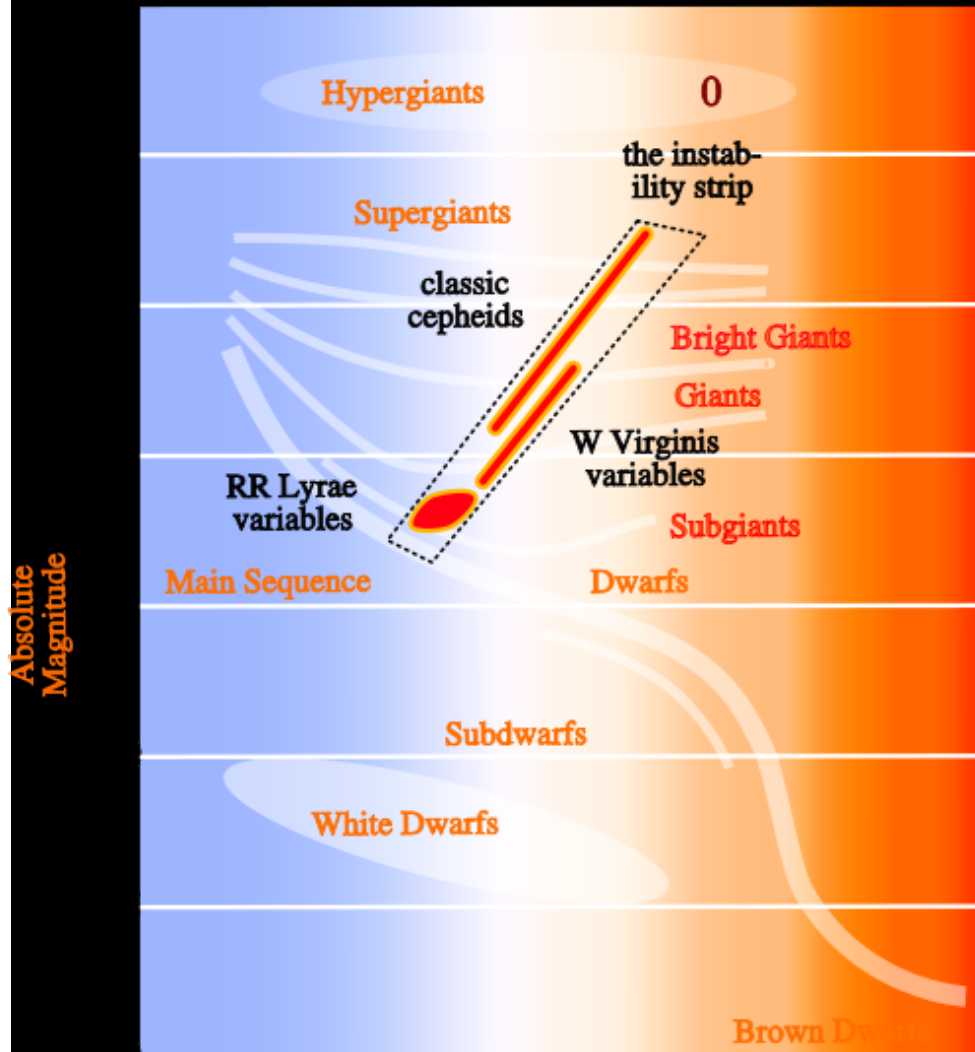
$$m - M = 5 \log r + 25 \text{ (σε Mpc)}$$

### 3<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας

Οι Κηφείδες και τα αστέρια τύπου RR-Λύρας είναι μεταβλητά αστέρια με περιοδικότητα στη φωτεινότητα τους.

Κηφείδες I	Κηφείδες II	RR-Λύρας
Πολύ Λαμπρά ( $10^6 L_{\odot}$ )		$\sim 40 L_{\odot}$
4-20 $M_{\odot}$	1/2 $M_{\odot}$	1/2 $M_{\odot}$
Pop I (F6-K2): Κίτρινοι Υπεργίγαντες. Υψηλή μεταλλικότητα	Pop II: Γηραιά άστρα, χαμηλή μεταλλικότητα	Pop II (A2-F6): Γηραιά άστρα (οριζόντιου Κλάδου), χαμηλή μεταλλικότητα
Περίοδος: ημερες - μήνες	Περίοδος: 1-50 ημερες	Περίοδος: ώρες
Σπάνια	Σπάνια	Αρκετά κοινά άστρα σε Σφαιρωτά Σμήνη

### 3<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας



Όπως αυξάνεται η θερμοκρασία παράγεται διπλά ιονισμένο He ( $\text{HeII} \rightarrow \text{HeIII}$ ) το οποίο είναι αδιαφανές. Όταν οι εξωτερικές στοιβάδες γίνουν αδιαφανείς, δεν διαφεύγει πολύ ακτινοβολία το άστρο διαστέλλεται, ψύχεται, λιγότερος ιονισμός  $\text{HeIII}$ , ξανά διαφανές, ακτινοβολία διαφεύγει, σταματά διαστολή, αρχίζει συστολή λόγω βαρύτητας, και επανάληψη.

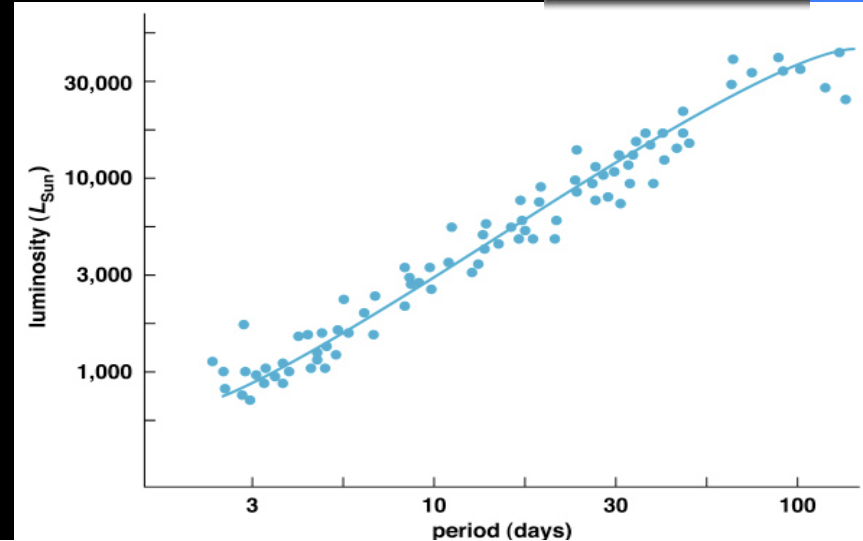
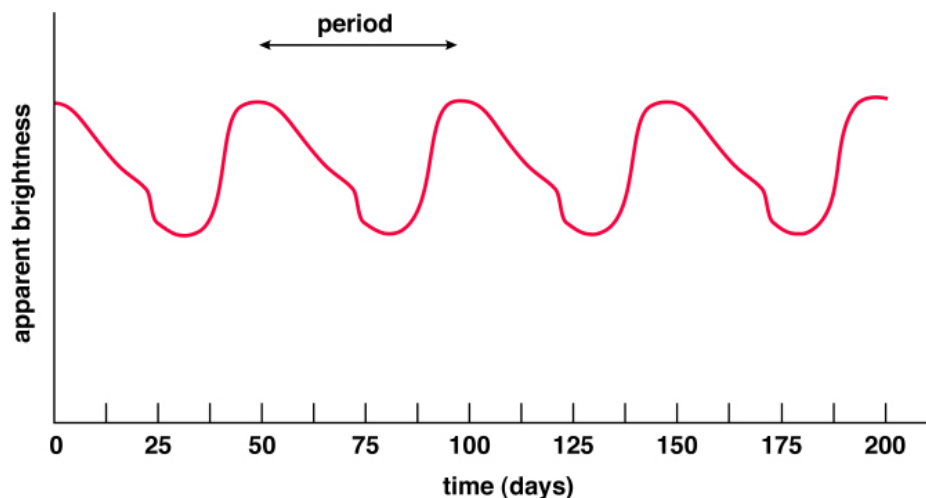
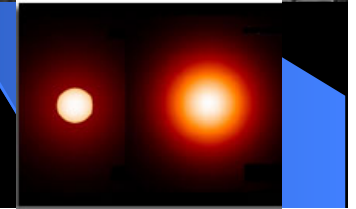


### 3<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας

Η *Henrietta Swan Leavitt* (1868-1921) παρατήρησε στους Κηφείδες ταλαντώνεται η φωτεινότητα τους περιοδικά και με συγκεκριμένη σχέση περιόδου-φωτεινότητας :

$$L = C P^{1.33} \text{ (στη μπάντα V)}$$

Η μέθοδος δουλεύει μέχρι αποστάσεις  $13 \times 10^6$  έτη φωτός, δηλαδή μέχρι τα όρια και λίγο πιο μακριά της τοπικής ομάδας γαλαξιών.

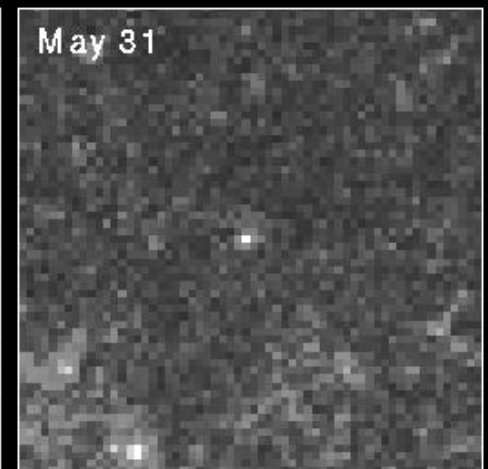
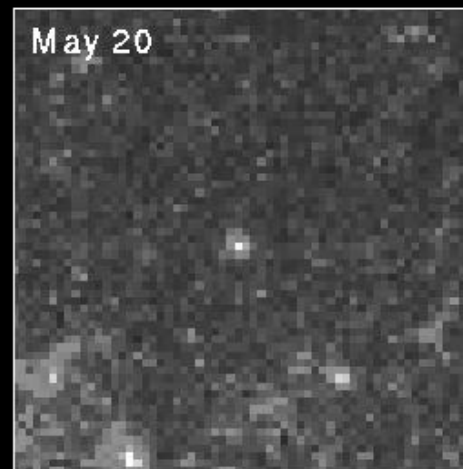
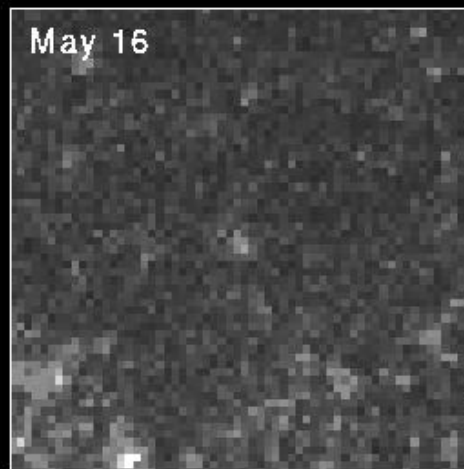
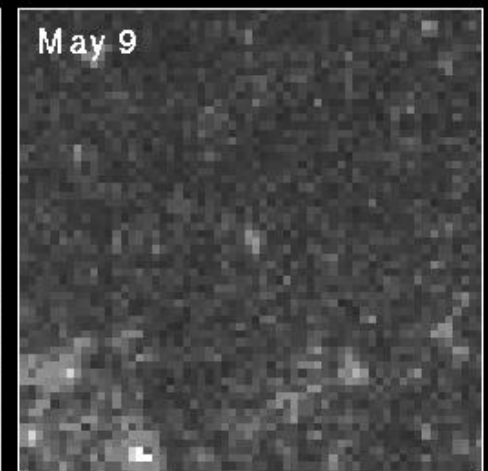
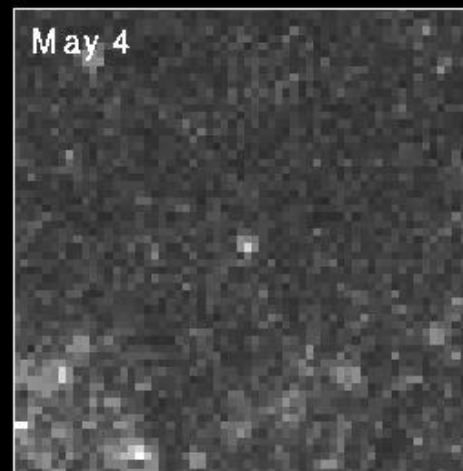
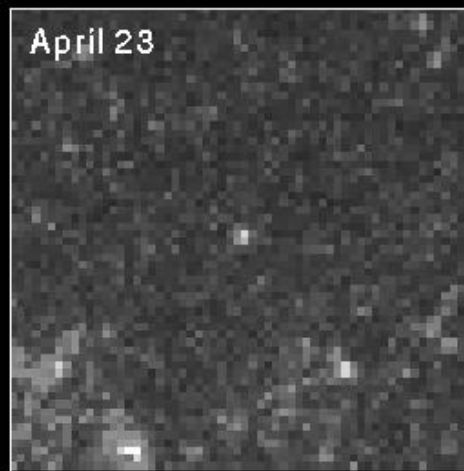


Κηφείδες φαίνονται και σε κοντινούς γαλαξίες, όπως στο M100 στο σμήνος γαλαξιών της Παρθένου

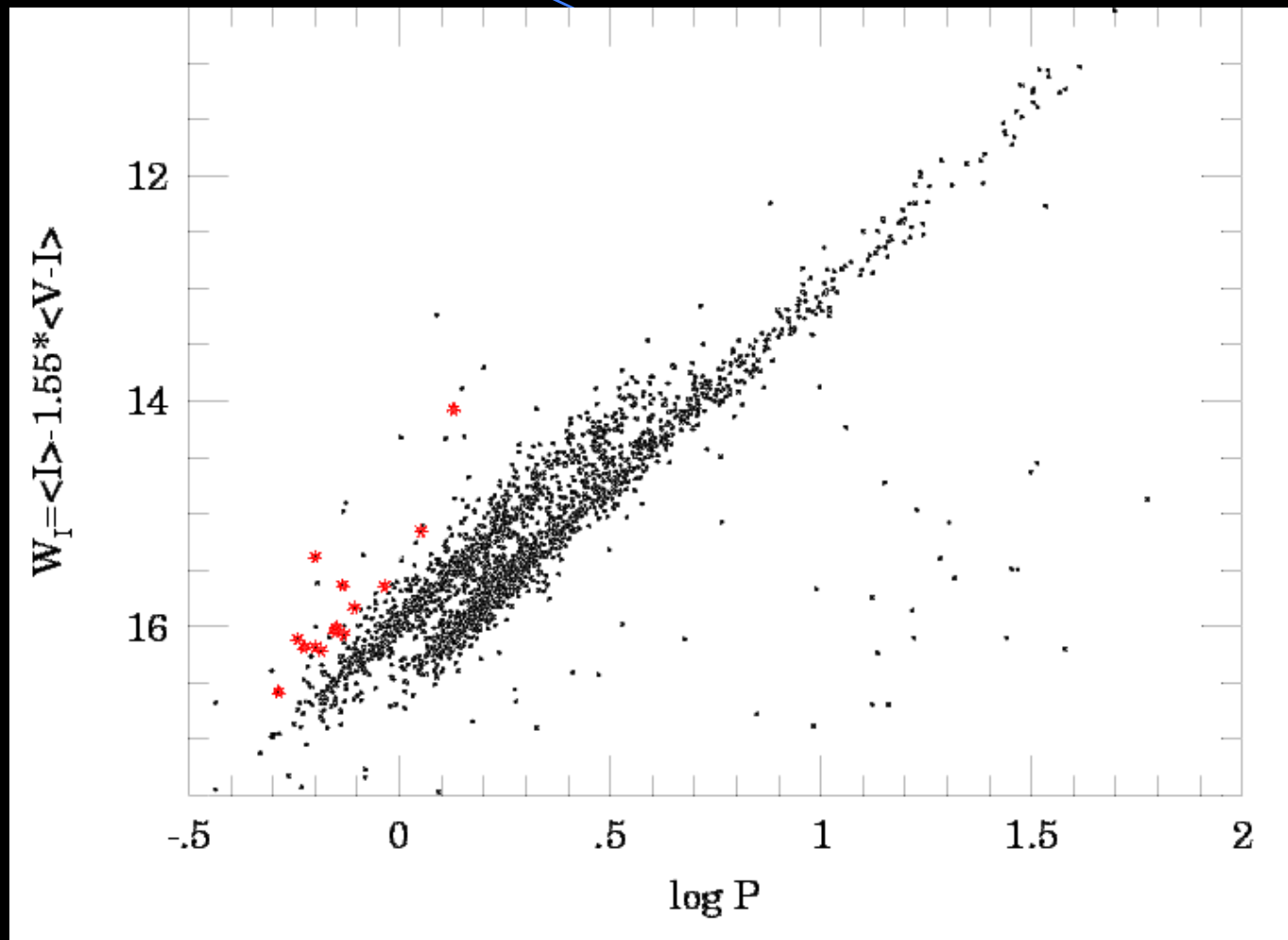


**Cepheid Variable Star in Galaxy M100**

**HST-WFPC2**



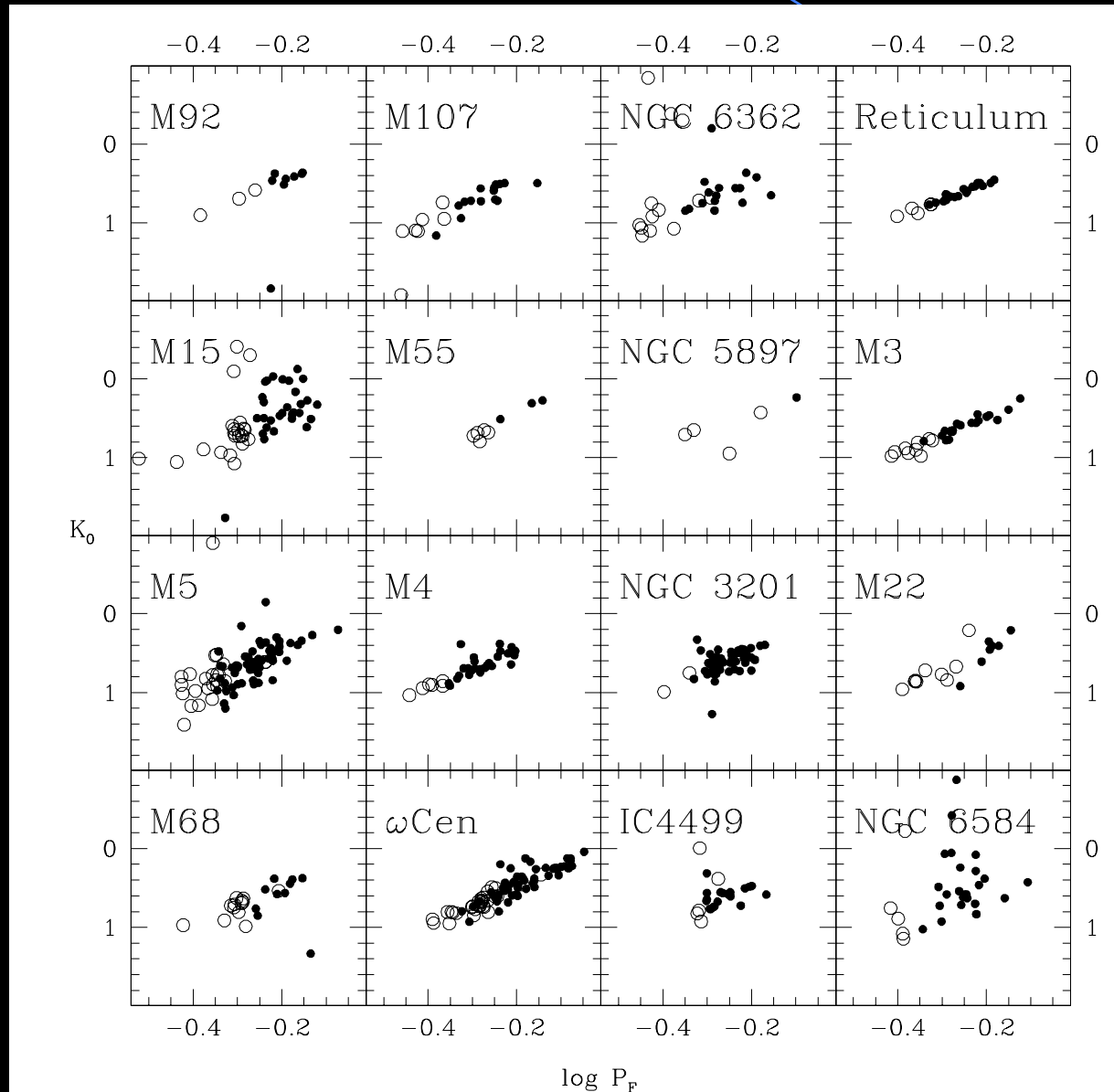
Όμως έχουν βρεθεί 2 τύποι ταλαντούμενων Κηφείδων (I, II)



Η τελική μετρική σχέση δίδεται από την:

$$M_V = - 3.37(0.08) \log P + 2.55(0.10) (V-I) - 2.48(0.08)$$

# RR-Λύρας: σχέση περιόδου Απόλυτου Μεγέθους σε διαφορετικά Σφαιρωτά Σμήνη (στο κοντινό υπέρυθρο - μπάντα-K)



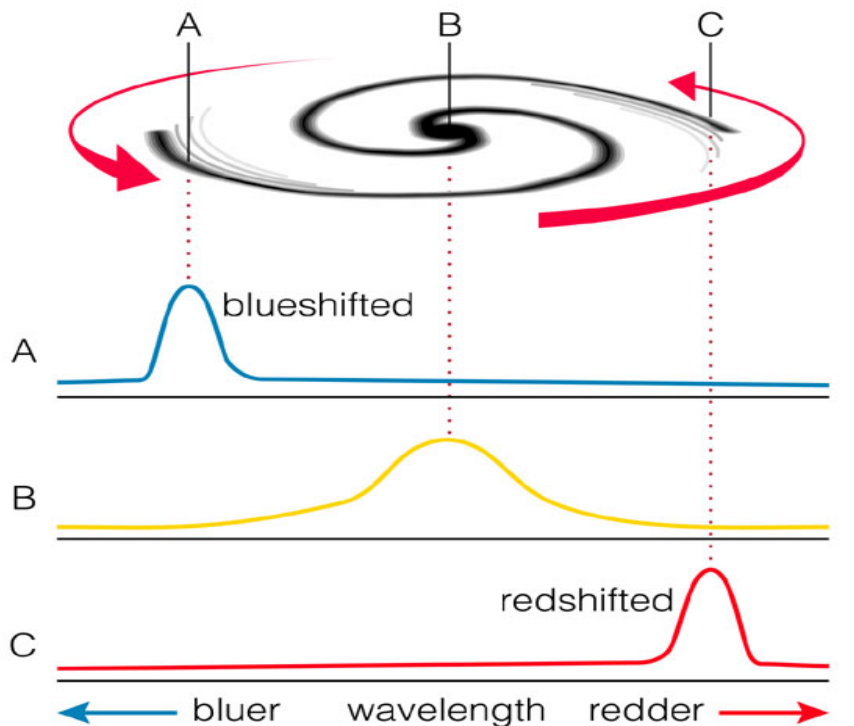
$$L = C P^{0.92}$$

# 4<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση γαλαξιών μέσω μετρικών σχέσεων (Tully-Fisher, Faber-Jackson, $D_n$ - $\sigma$ )

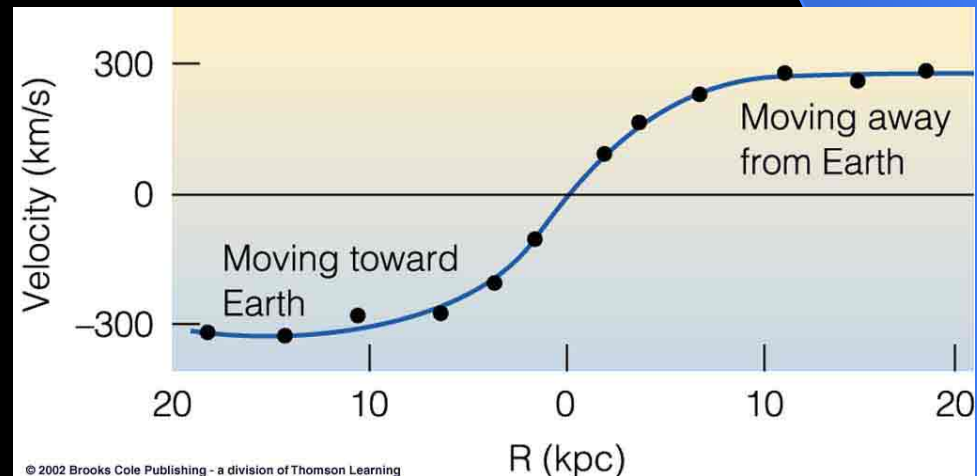
Το 1977 οι Brent Tully & Fisher βρήκαν ότι στους **σπειροειδείς** γαλαξίες ισχύει η σχέση

$$L = C_1 v^4$$

Όπου  $v$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του γαλαξία και  $L$  η λαμπρότητα του, μετρούμενη μέσω φαινομένου Doppler.

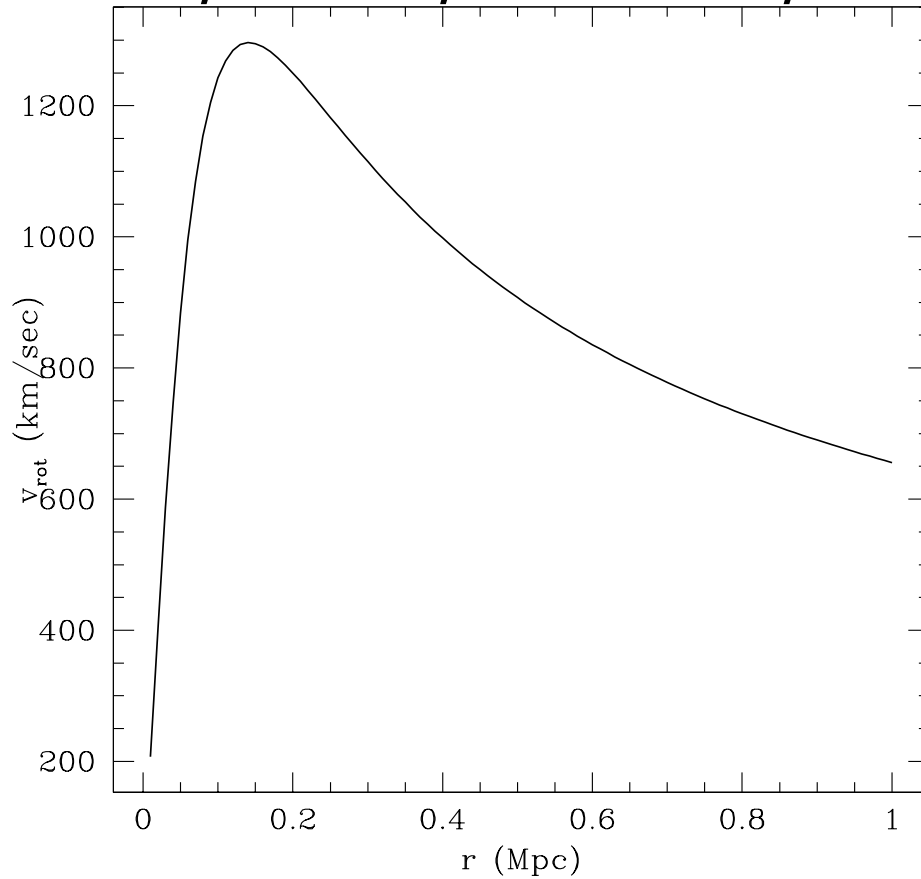


$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \approx 1+v/c$$



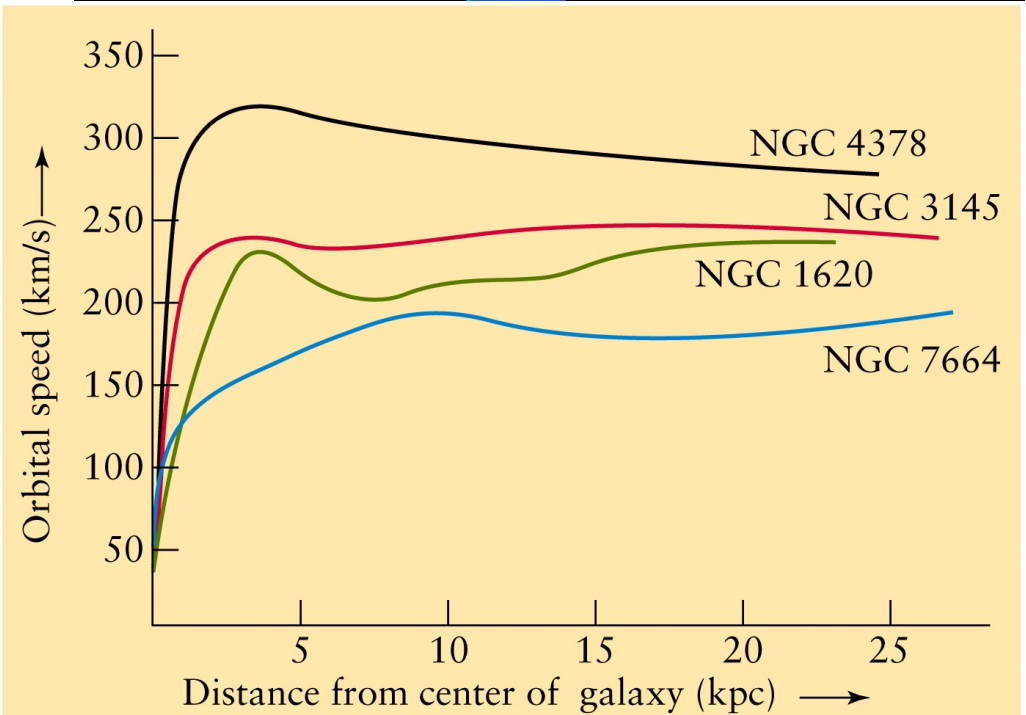
Διάγραμμα ταχύτητας Doppler

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv}{r} \Rightarrow v = \frac{GM}{r}$$



**Αναμενόμενες καμπύλες  
περιστροφής**

**Παρατηρούμενες καμπύλες  
περιστροφής → Σκοτεινή ύλη**



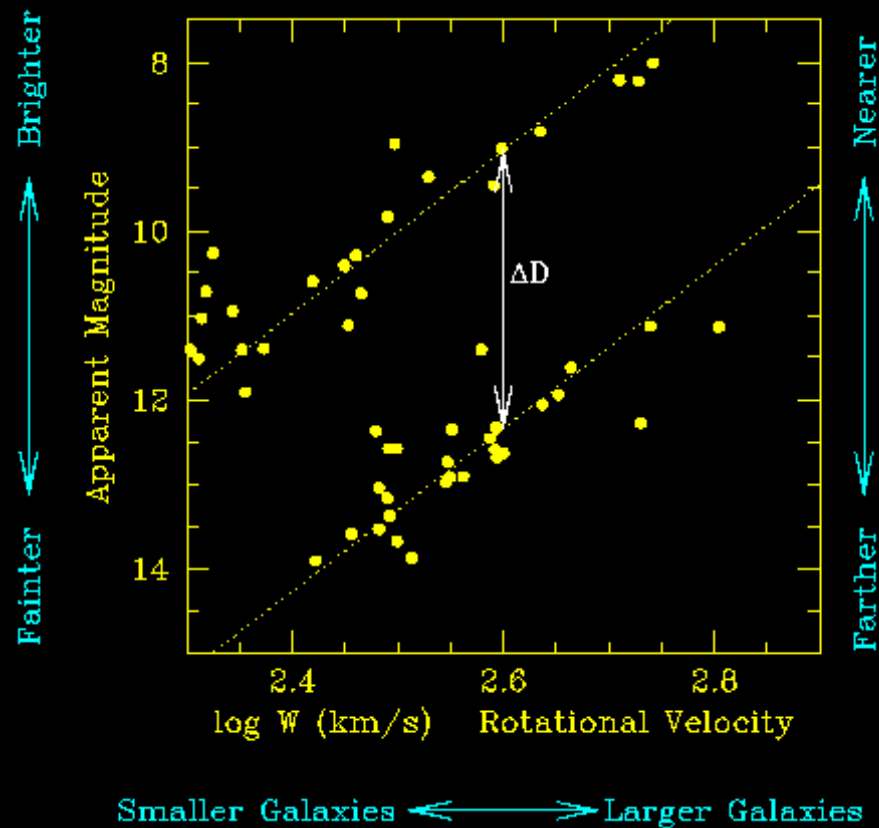
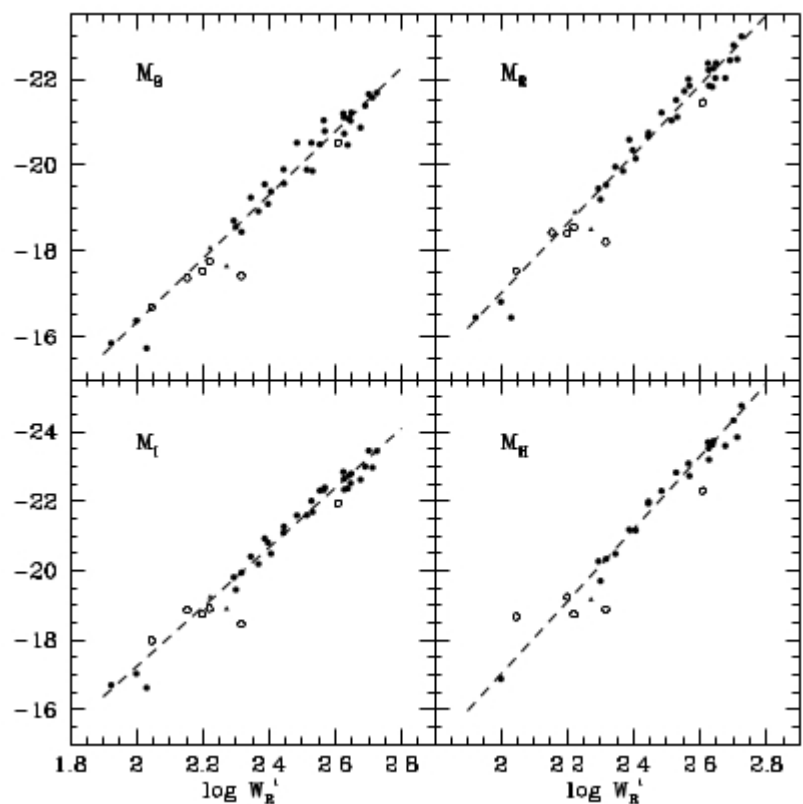
# Βαθμονομημένες σχέσεις Tully-Fisher

$$M_B = -7.41 (\log W_i - 2.5) - 20.04 (0.04)$$

$$M_R = -8.09 (\log W_i - 2.5) - 21.05 (0.04)$$

$$M_I = -8.55 (\log W_i - 2.5) - 21.51 (0.04)$$

$$W = 2 v_{\max}$$



Η παρατηρούμενη ταχύτητα περιστροφής δεν είναι η πραγματική, αλλά μικρότερη η ίση της πραγματικής λόγω κλίσης του επιπέδου του σπειροειδούς γαλαξία με την διεύθυνση οράσεως. Η πραγματική ταχύτητα δίδεται από την:

$$v_{real} = \frac{v_{obs}}{\sin i}$$

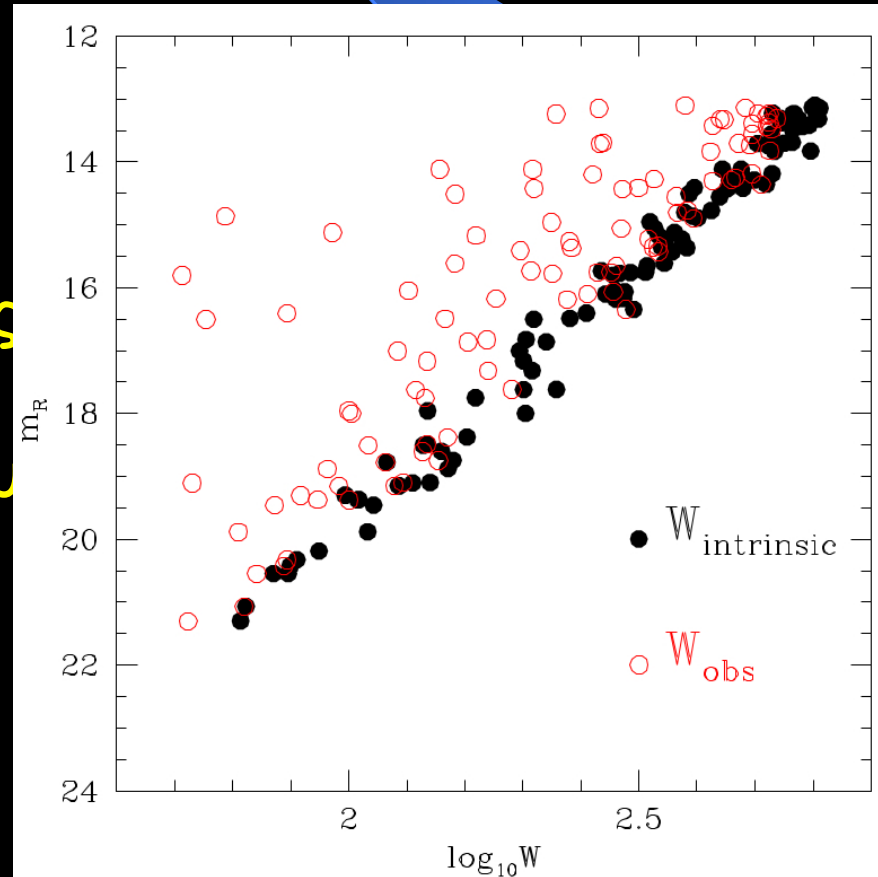
Όπου  $i$  είναι η γωνία μεταξύ επιπέδου γαλαξία και της ουρανίου σφαίρας

Εάν θεωρήσουμε ένα τέλειο δίσκο, τότε η γωνία  $i$  δίδεται από την

$$\sin i = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

Αλλά επειδή οι σπειροειδείς γαλαξίες έχουν πάντα ένα ίδιον πάχος,  $r_0$ , η ορθή σχέση δίδεται από τον τύπο του Holmberg:

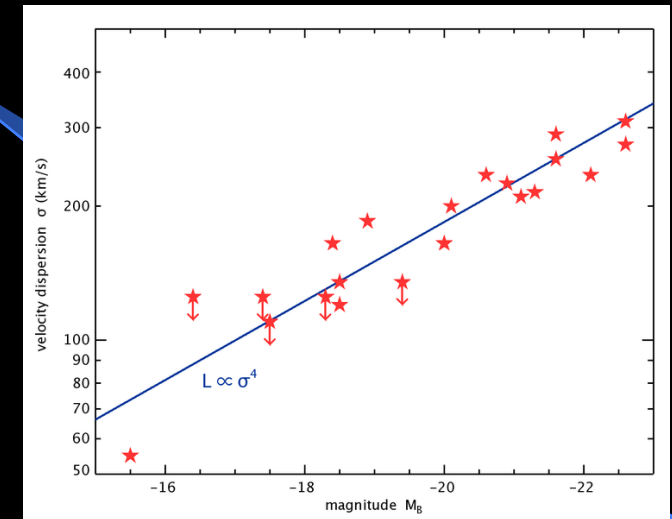
$$\cos i = \sqrt{\frac{(b/a)^2 - r_0^2}{1 - r_0^2}}$$





## 4<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Η απόσταση γαλαξιών μέσω μετρικών σχέσεων (Tully-Fisher, Faber-Jackson, $D_n$ - $\sigma$ )

Αντίστοιχη σχέση ισχύει και στους **ελλειπτικούς** γαλαξίες  $L = C_2 \sigma^\gamma$   
Με  $\gamma=3.1$  για λιγότερο μαζικούς γαλαξίες και  $\gamma=15$  για πολύ μαζικούς.  $\sigma$  είναι η αστρική διασπορά ταχυτήτων.



Επίσης για **ελλειπτικούς** γαλαξίες σχέση μεταξύ γωνιακής διαμέτρου και αστρική διασπορά ταχυτήτων

$$D_n = C_3 \sigma^{1.33}$$

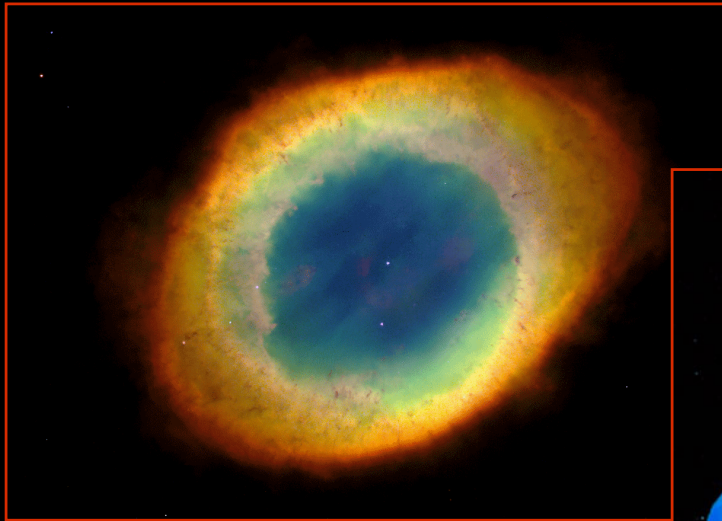
Όπου  $D_n$  είναι η διάμετρος όπου ο γαλαξίας έχει επιφανειακή λαμπρότητα  $20.75 B\text{-mag arcsec}^{-2}$ .

Επομένως βαθμονομώντας τις σχέσεις αυτές μπορείς να υπολογίσεις αποστάσεις μακρινών γαλαξιών.

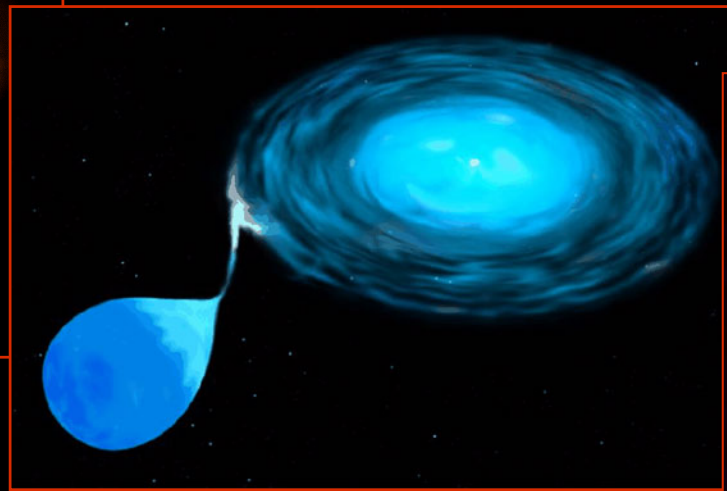
Αβεβαιότητα όμως είναι  $\sim 10\text{-}15\%$ , όμως στα σμήνη η αβεβαιότητα πέφτει με  $N^{-1/2}$

# 5<sup>ο</sup> Σκαλοπάτι: Υπερκαινοφανείς τύπου Ia («σταθεροί Λαμπτήρες») έως $z=1.3-1.4$

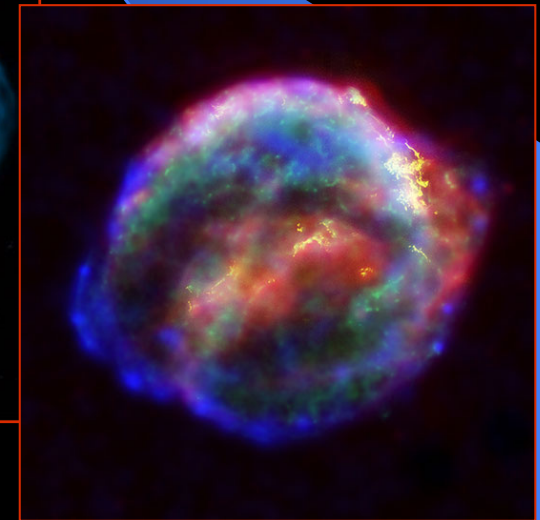
## ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΑ SUPERNOVA Ia ;



Ο θάνατος αστέρων οδηγεί  
στην δημιουργία Λευκού  
Νάνου.



Ο λευκός νάνος (σε διπλά  
συστήματα αστέρων) απορροφά  
ύλη από συνοδό και καθίσταται  
ασταθής..



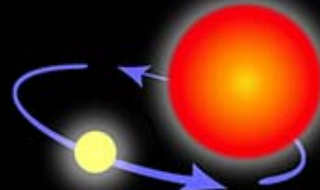
.... και εν τέλει  
εκρήγνυται

# Type Ia supernovae (alone) make good 'standard candles'...

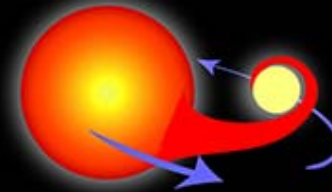
## The progenitor of a Type Ia supernova



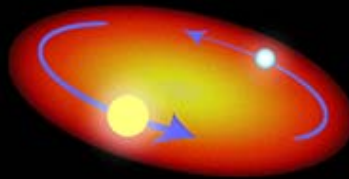
Two normal stars are in a binary pair.



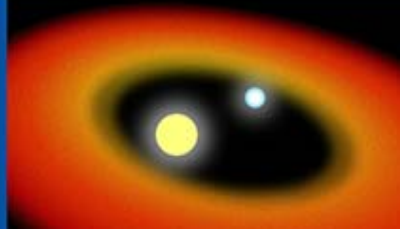
The more massive star becomes a giant...



...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



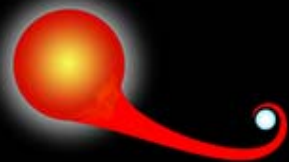
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



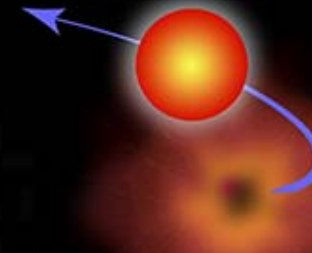
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...

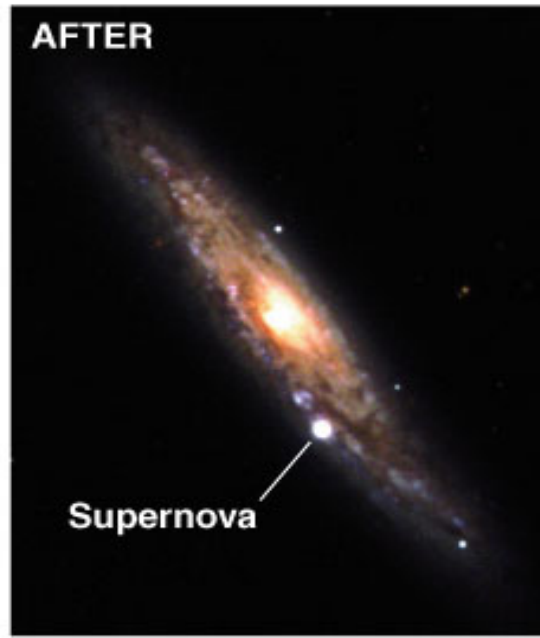


...causing the companion star to be ejected away.

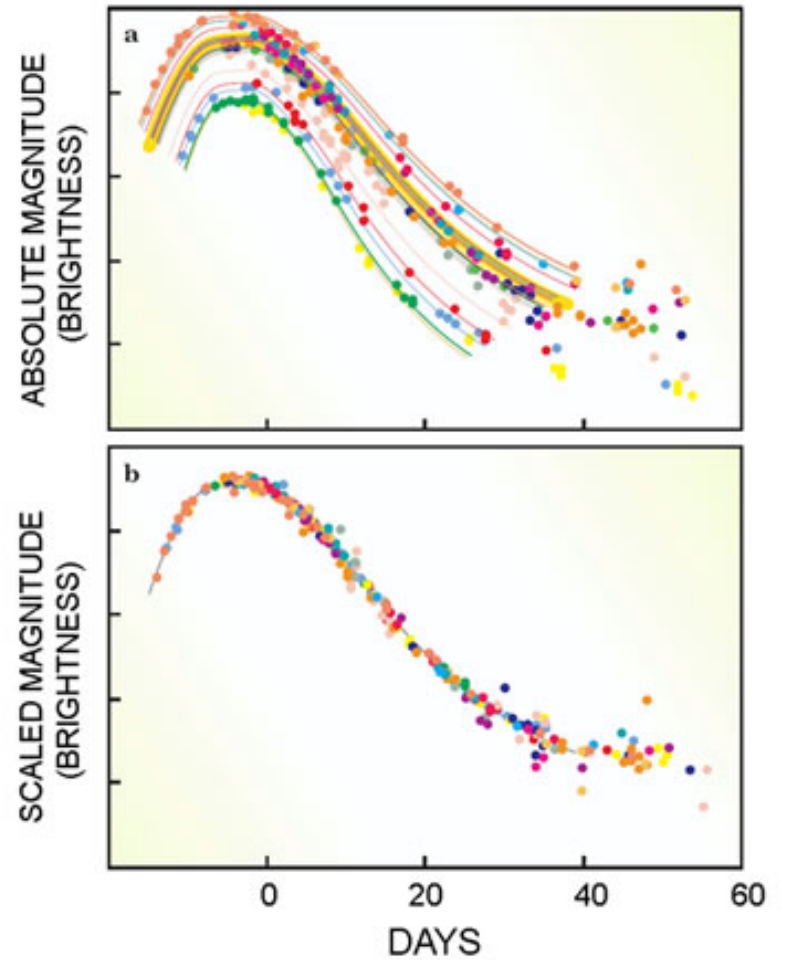
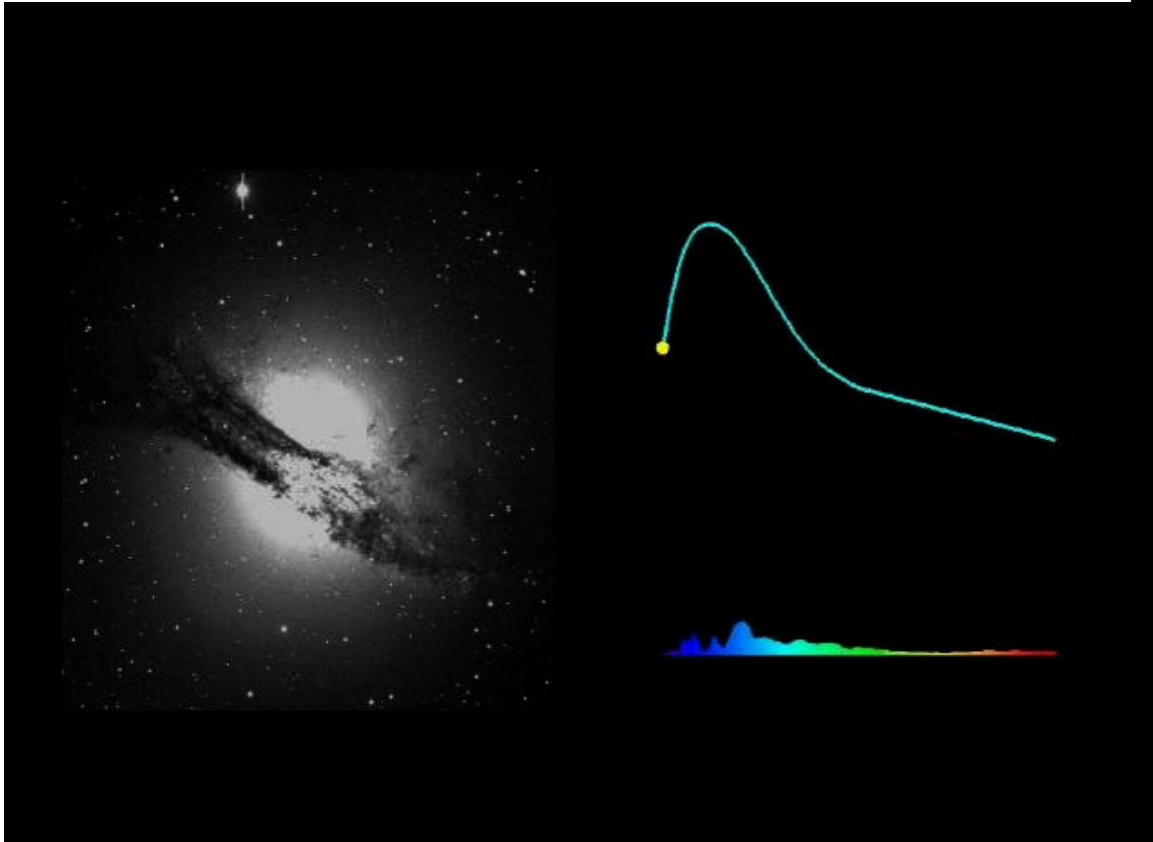
BEFORE



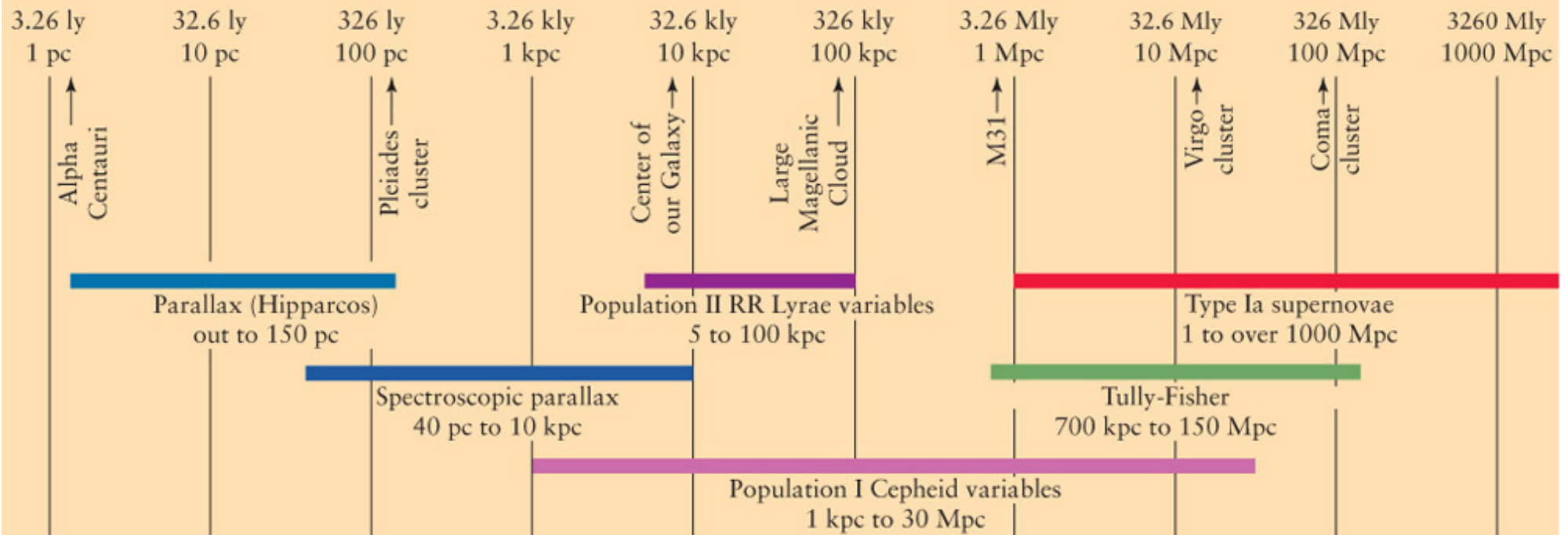
AFTER



Σταθερή η λαμπρότητα  
του μέγιστου καμπύλης  
φωτός

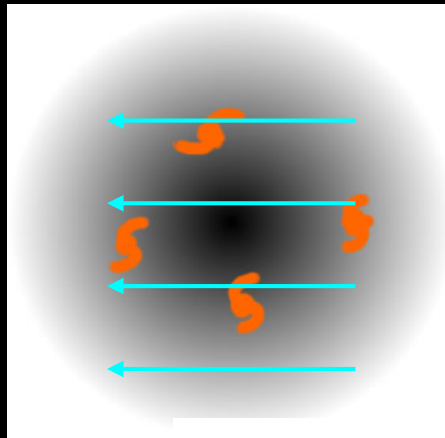
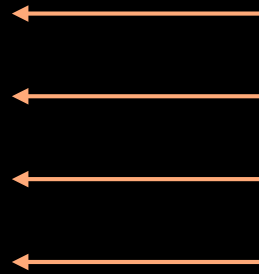


# Η αλληλοσύνδεση των μεθόδων υπολογισμού κοσμικών αποστάσεων



# Θερμικό Sunyaev-Zeldovich (SZ) Effect

Διαταραχή του φάσματος του κοσμικού υπόβαθρου μικροκυμάτων (CMB) λόγω υπέρθερμων ηλεκτρονίων στο μεσογαλαξιακό αέριο των Σμηνών (Inverse Compton scattering)



CMB photons

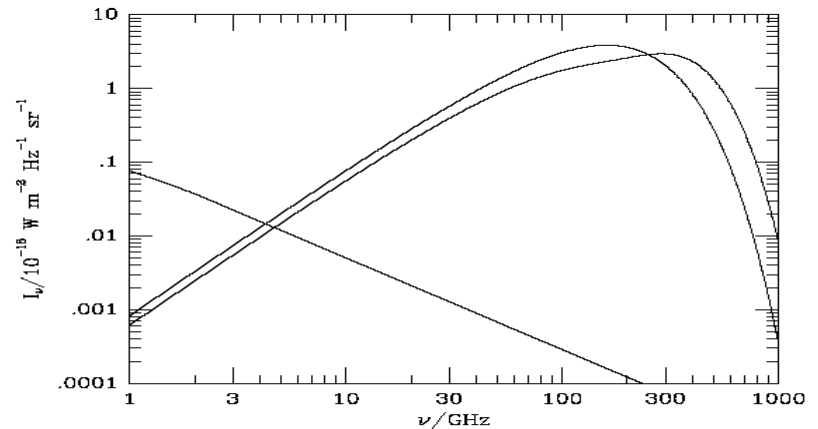
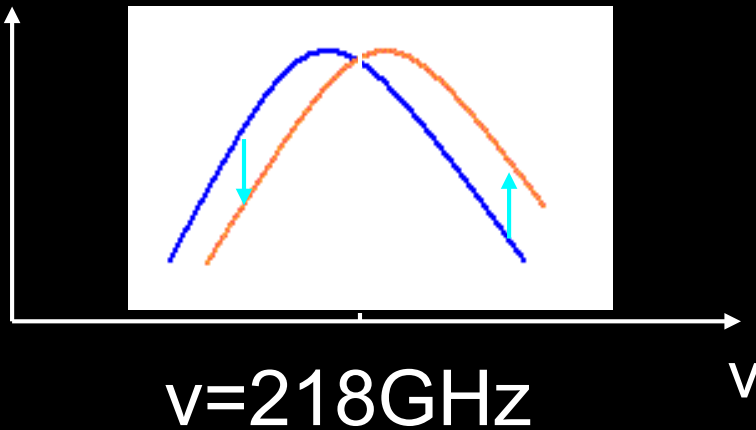
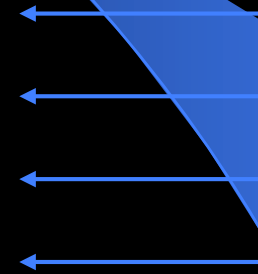


Fig. 1.— The spectrum of the microwave background radiation, and the microwave background radiation after passage through an (exaggerated) scattering atmosphere with  $y = 0.1$  and  $\tau\beta = 0.05$  (as defined in Sections 3 and 6), compared with the integrated

Θερμικό SZ effect ορίζει  $\Delta T_{CMB}$

Στα μικρά  $z$  region έχουμε  
πτώση θερμοκρασίας

Στα ψηλά  $z$  region έχουμε  
αύξηση θερμοκρασίας

Υπολογισμός Απόστασης Σμήνους

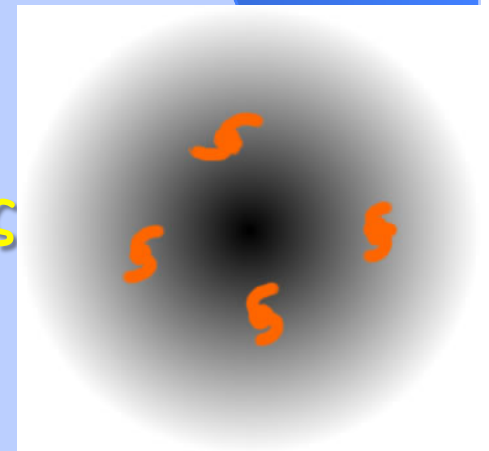
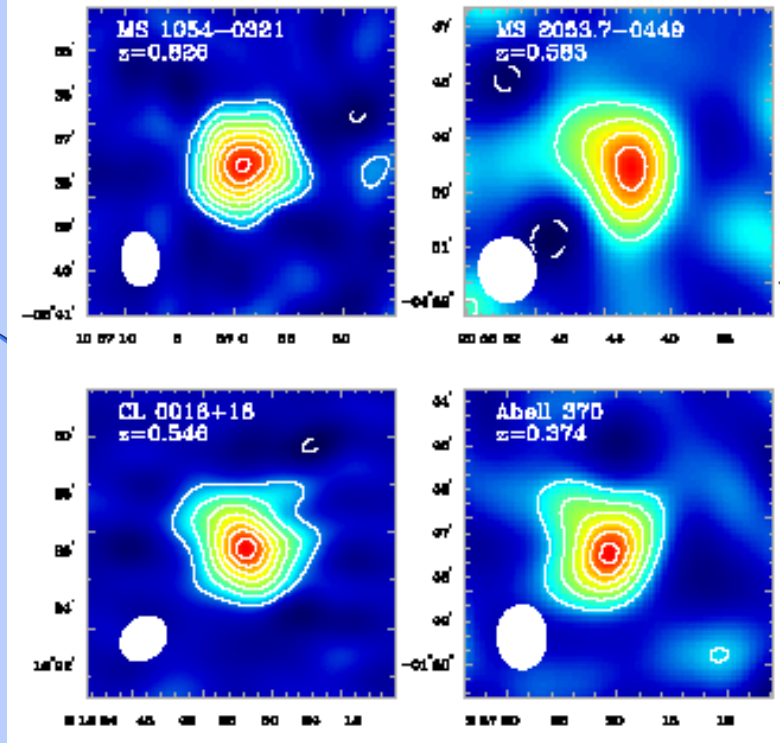
$$\begin{cases} \Delta T_{CMB} \propto N_e l T_e \\ S_{X-ray} \propto N_e^2 l T_e^{1/2} \end{cases}$$

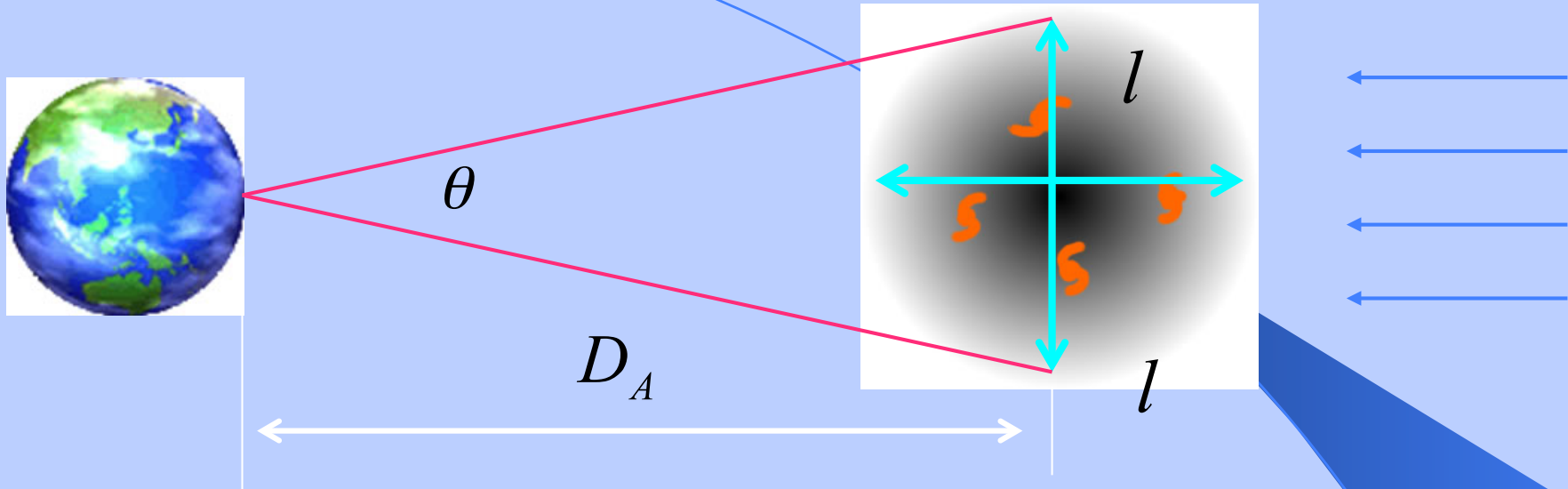
Από το θερμικό SZ effect

X-ray intensity of CG

$$\therefore l \propto (\Delta T_{CMB})^2 S_{X-ray} T_e^{-3/2}$$

$l$ : διάμετρος του Σμήνους στη διεύθυνση οράσεως





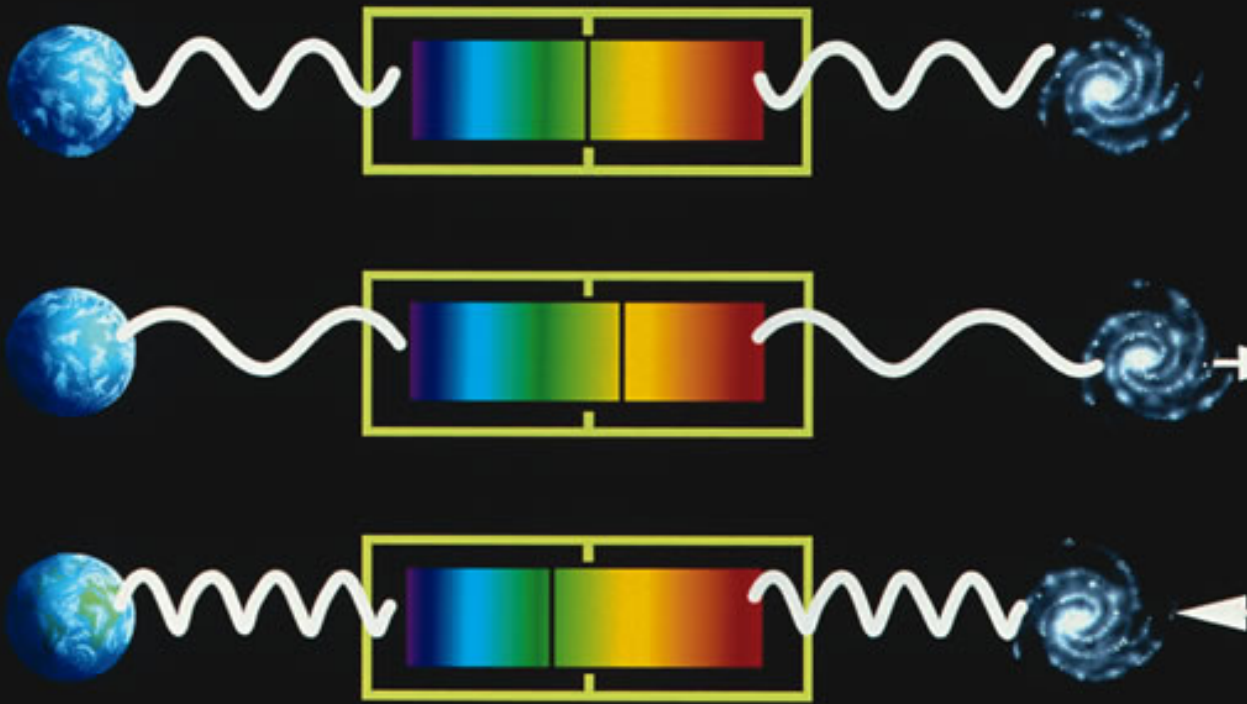
$$D_A = \frac{l}{\theta} \text{ (angular diameter distance)}$$

Υπόθεση είναι η σφαιρικότητα του Σμήνου



## 6° Σκαλοπάτι: Η ερυθρομετάθεση μακρινών γαλαξιών

Το 1929 ο Hubble ανακάλυψε ότι τα φάσματα γαλαξιών είναι μετατοπισμένα στο ερυθρό →  
**Φαινόμενο Doppler**



## The Hubble Law as a Distance Indicator

Suppose that you aim a telescope at an extremely distant galaxy. You take a spectrum of the galaxy and find that the spectral lines are shifted toward the red end of the spectrum. For instance, you find a spectral line whose normal wavelength is  $\lambda_0$  at a longer wavelength  $\lambda$ . The spectral line has thus been shifted by an amount  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ .

The redshift of the galaxy (usually denoted by  $z$ ) is given by

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

According to the Doppler effect (review Figure 5-19), this wavelength shift corresponds to a speed  $v$ , where

$$z = \frac{v}{c}$$

and  $c$  is the speed of light. (This equation is valid only if the speed  $v$  is much less than the speed of light.)

According to the Hubble law, the recessional velocity  $v$  of a galaxy is related to its distance  $r$  from Earth by

$$v = H_0 r$$

where  $H_0$  is the Hubble constant.

Combining the equation for the Doppler shift with the equation for the Hubble law, we see that the distance to a galaxy is related to its redshift by

$$r = \frac{zc}{H_0}$$

**EXAMPLE:** Suppose that you observe the giant elliptical galaxy NGC 4889. The so-called K line of singly ionized calcium normally has a wavelength of 393.3 nm. In the spectrum of NGC 4889, you find this spectral line at 401.8 nm. Thus, the redshift of the galaxy is

$$z = \frac{401.8 - 393.3}{393.3} = 0.0216$$

The galaxy is therefore moving away from us with a speed of

$$v = zc = (0.0216)(3 \times 10^5 \text{ km/s}) = 6500 \text{ km/s}$$

With  $H_0 = 50 \text{ km/s/Mpc}$ , the Hubble law gives the distance to the galaxy:

$$r = \frac{zc}{H_0} = \frac{6500}{50} = 130 \text{ Mpc} = 420 \text{ Mly}$$

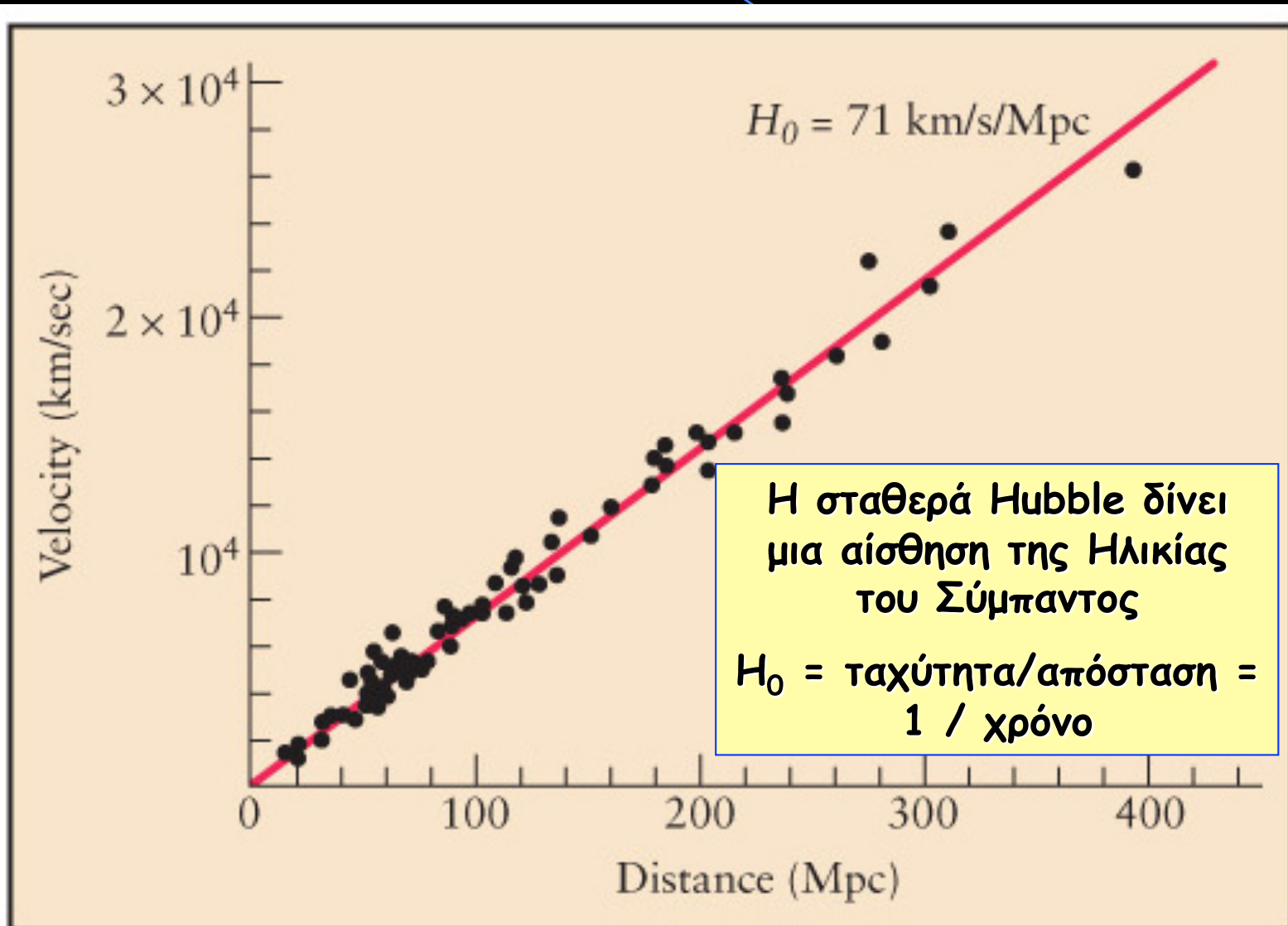
Note that if you had used  $H_0 = 100 \text{ km/s/Mpc}$ , you would have concluded that the distance is

$$r = \frac{zc}{H_0} = \frac{6500}{100} = 65 \text{ Mpc} = 210 \text{ Mly}$$

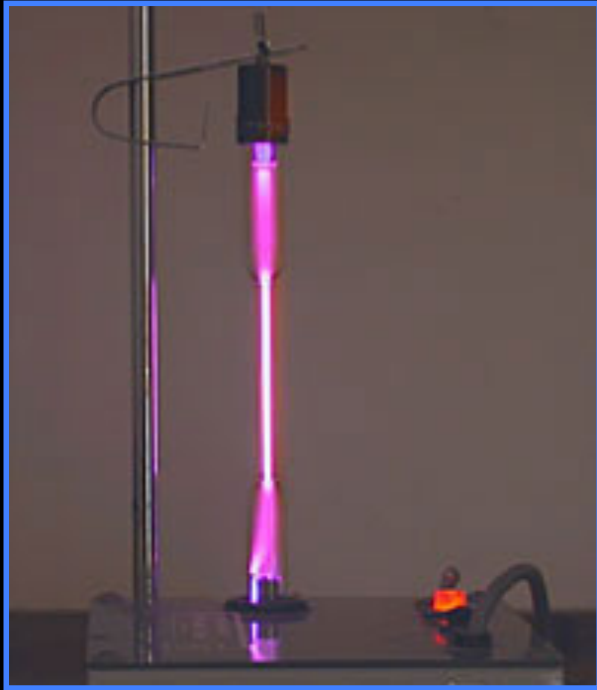
Unfortunately, astronomers must deal with this kind of uncertainty. Lacking an accurate value for the Hubble constant, most astronomers use a number between 50 and 90 km/s/Mpc. Thus, the distance to NGC 4889 is probably somewhere between 200 and 400 million light-years. A compromise distance of about 300 million light-years has been adopted for this text.

## Νόμος Hubble:

$$V = H_0 \times \text{απόσταση} = c z$$

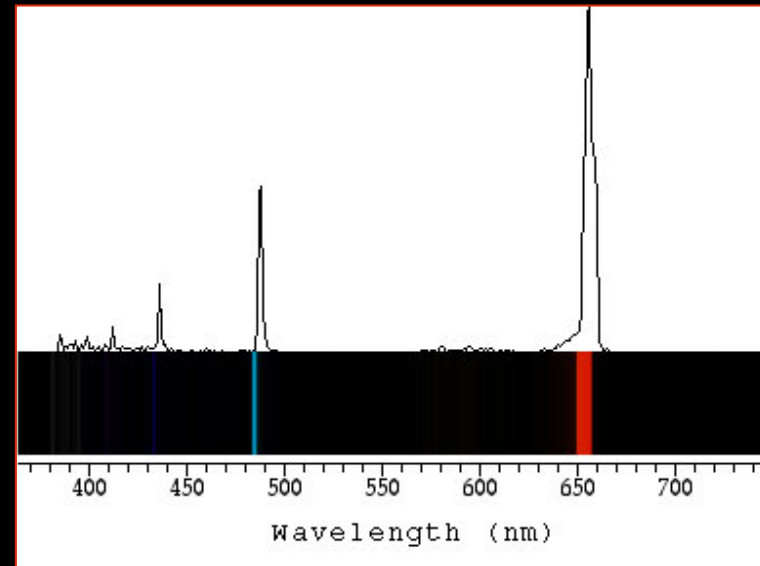


# Πως μετράμε την διαστολή του Σύμπαντος;



Λάμπα Υδρογόνου

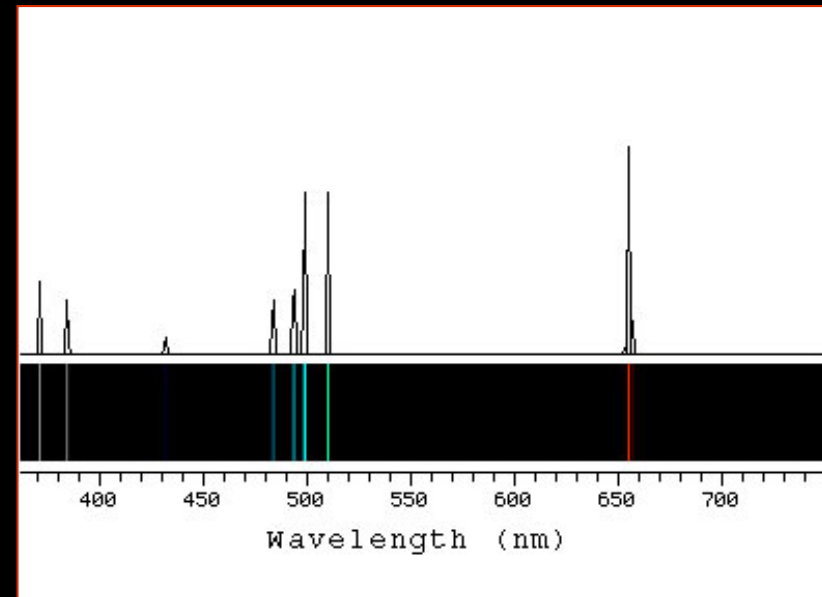
Πχ. Το υδρογόνο παράγει μια χαρακτηριστική γραμμή εκπομπής





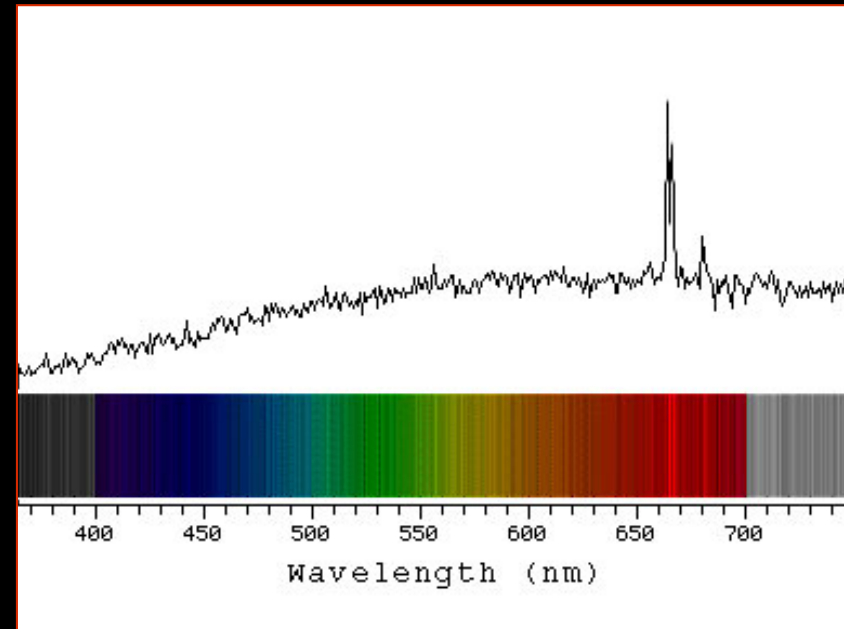
Orion Nebula

Όταν παρατηρούμε τις ίδιες γραμμές στο φάσμα ενός γαλαξία, αναγνωρίζουμε την γραμμή του Υδρογόνου.



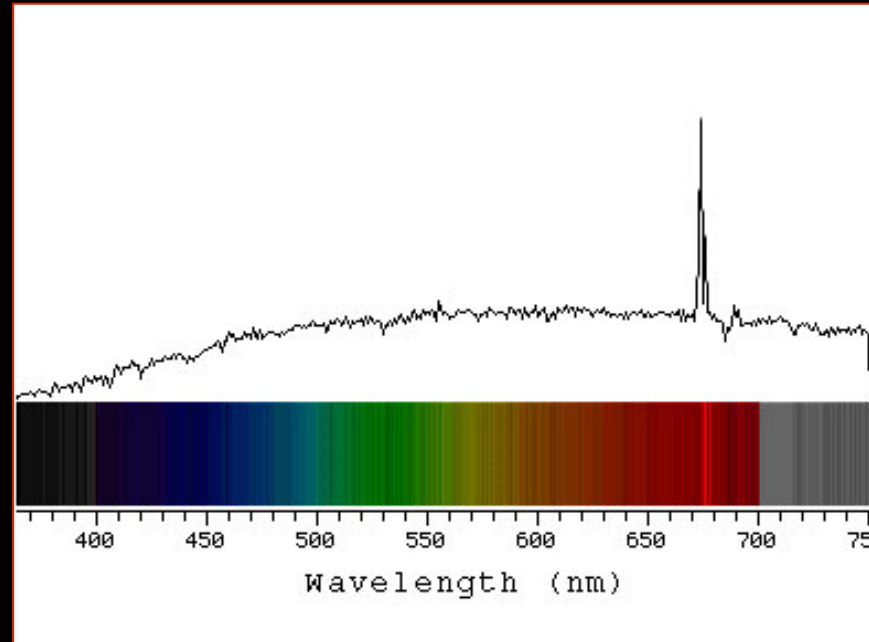


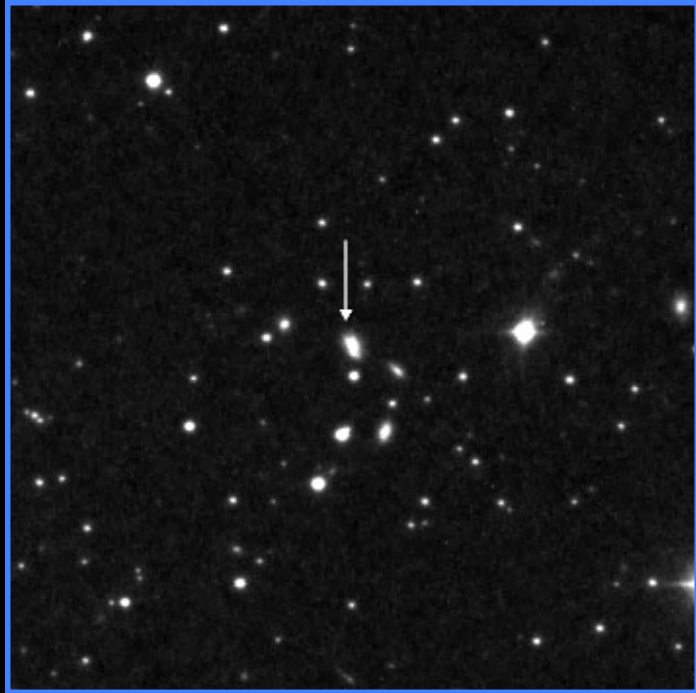
Γαλαξίας UGC 12915



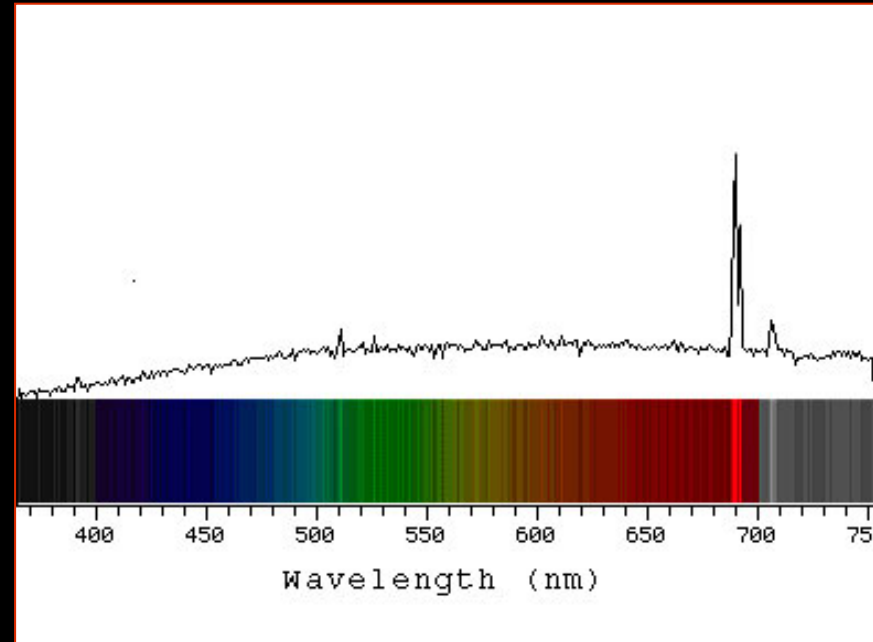


Γαλαξίας UGC 12508

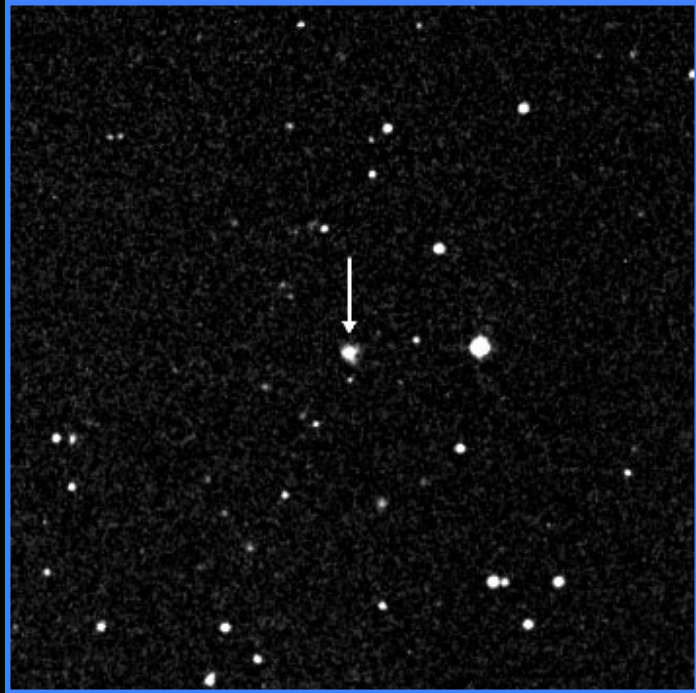




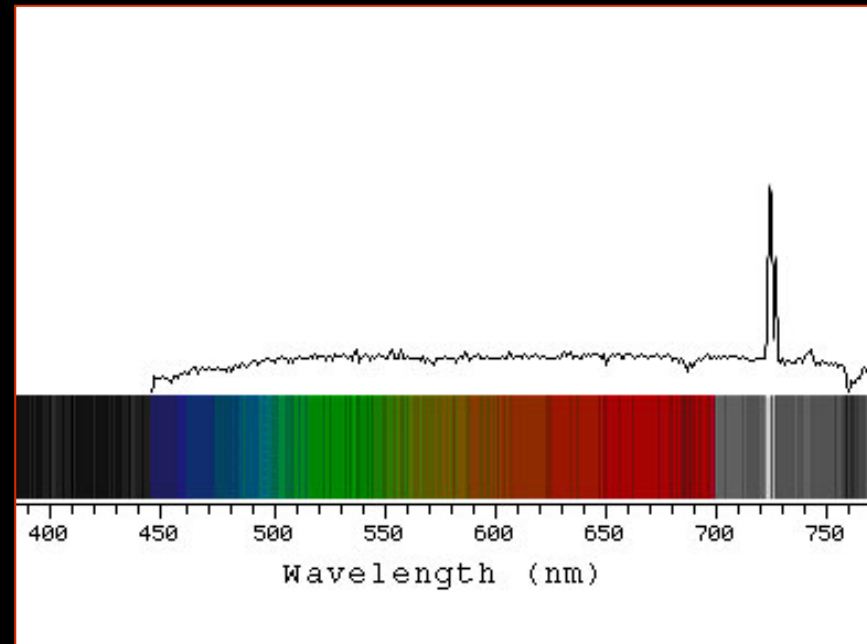
Γαλαξίας KUG 1750

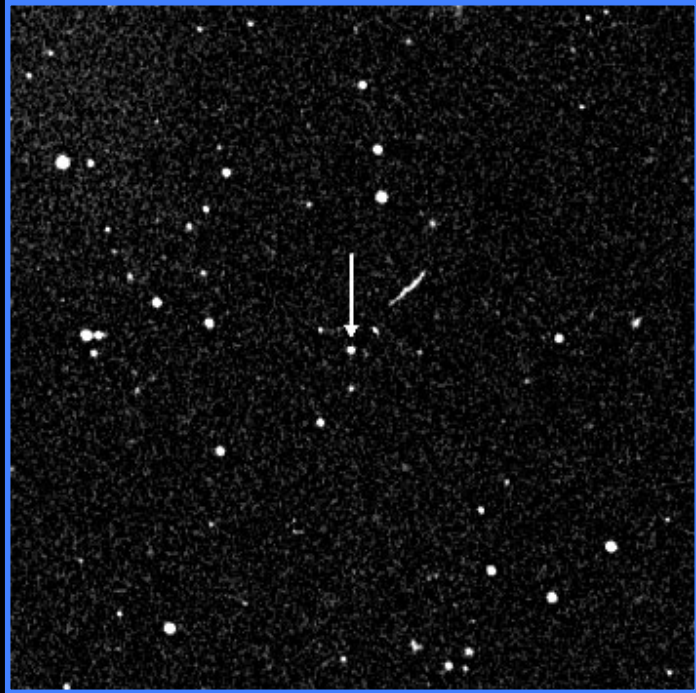




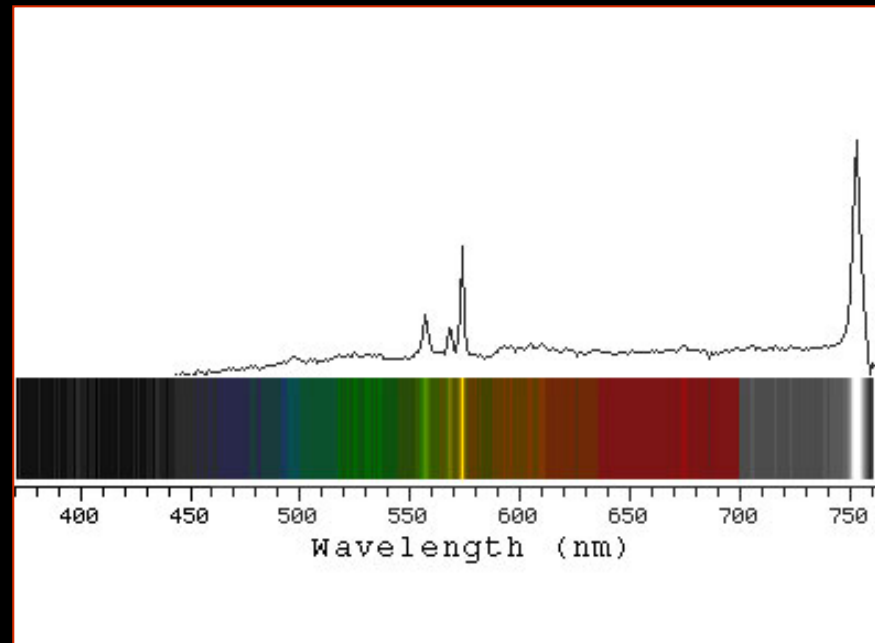


Γαλαξίας KUG 1217





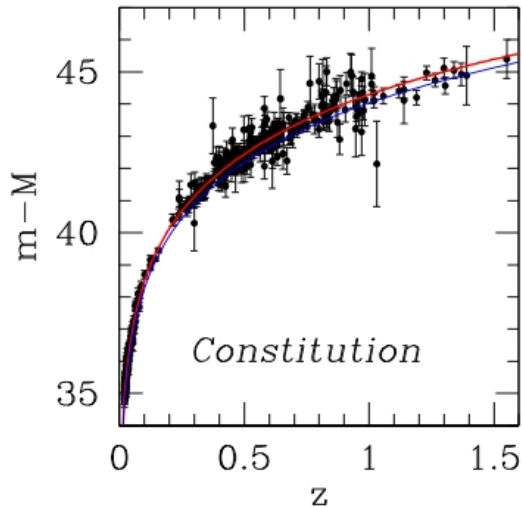
Γαλαξίας IRAS F09159



# Κοσμολογία μέσω Αποστάσεων Λαμπρότητας

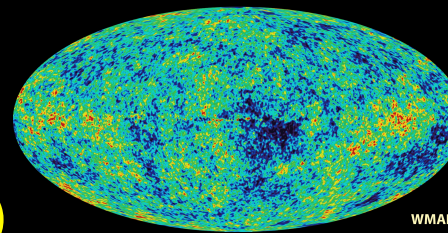
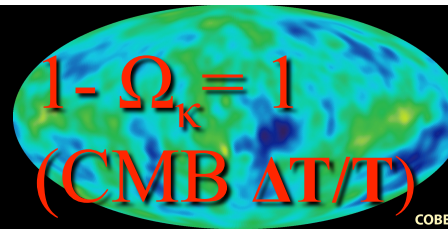
## $\Omega_m + \Omega_\Lambda$ από SNIa Hubble function

Supernova Ia's εμφανίζονται πιο αμυδροί από ότι αναμένει κανείς σε ένα επιβραδυνόμενο Σύμπαν, επομένως είναι πιο μακριά, το οποίο συνεπάγεται ένα επιταχυνόμενο Σύμπαν  $\rightarrow \Omega_\Lambda > 0$  και πιο συγκεκριμένα ότι  $\Omega_\Lambda > 1/3$ .



$$m - M = 5 \log_{10} D_L + 25 \quad D_L = (1 + z) \int_0^z \frac{c}{H(z)} dz$$

$$H^2(z) = H_0^2 \left[ \Omega_m (1 + z)^3 + \Omega_w \exp \left( 3 \int_0^z \frac{1 + w(x)}{1 + x} dx \right) \right]$$

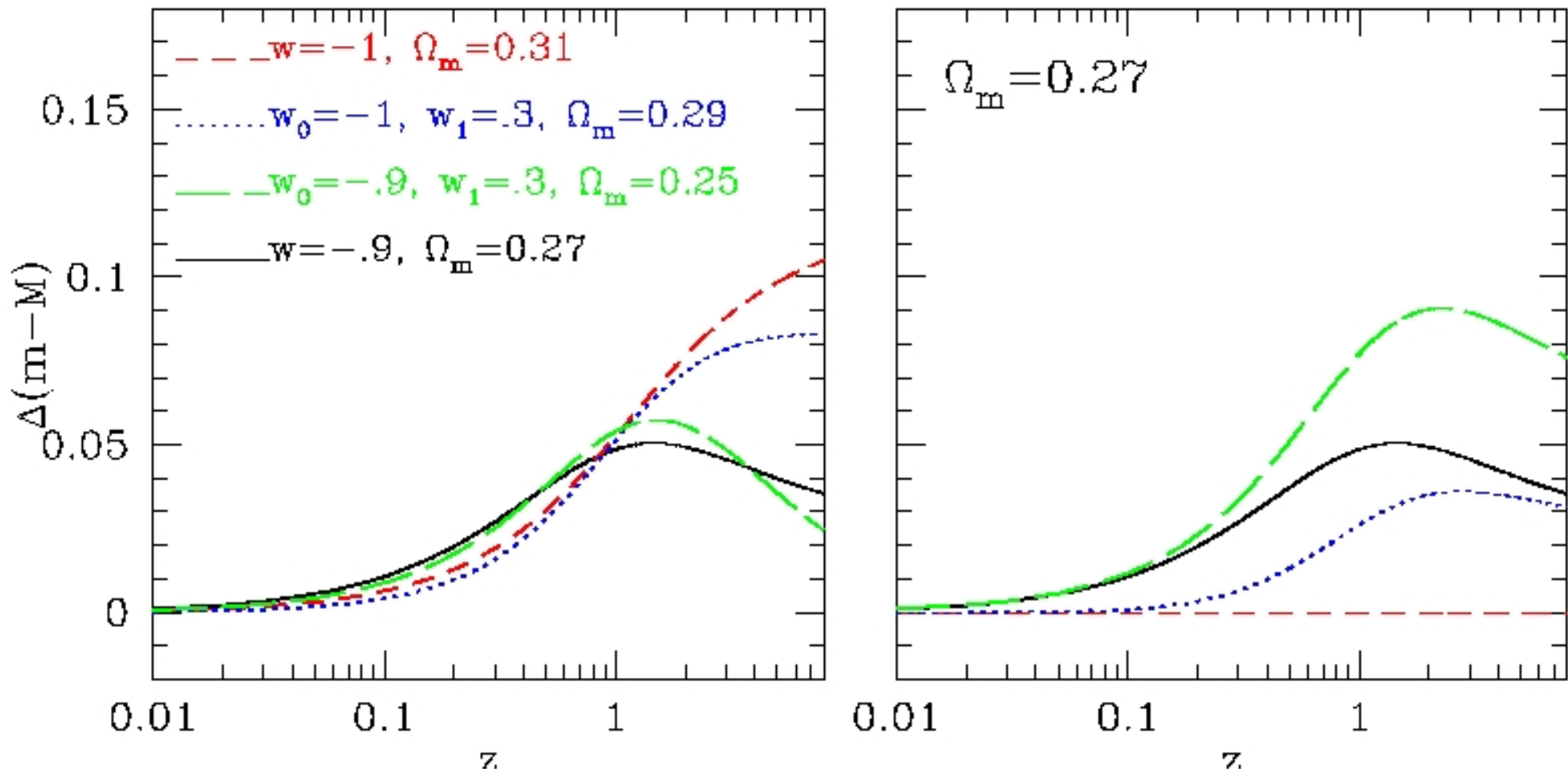


$$0.8 \Omega_m - 0.6 \Omega_\Lambda \approx 0.2 \quad (\text{SNIa})$$

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k \quad (\text{από θεωρία})$$

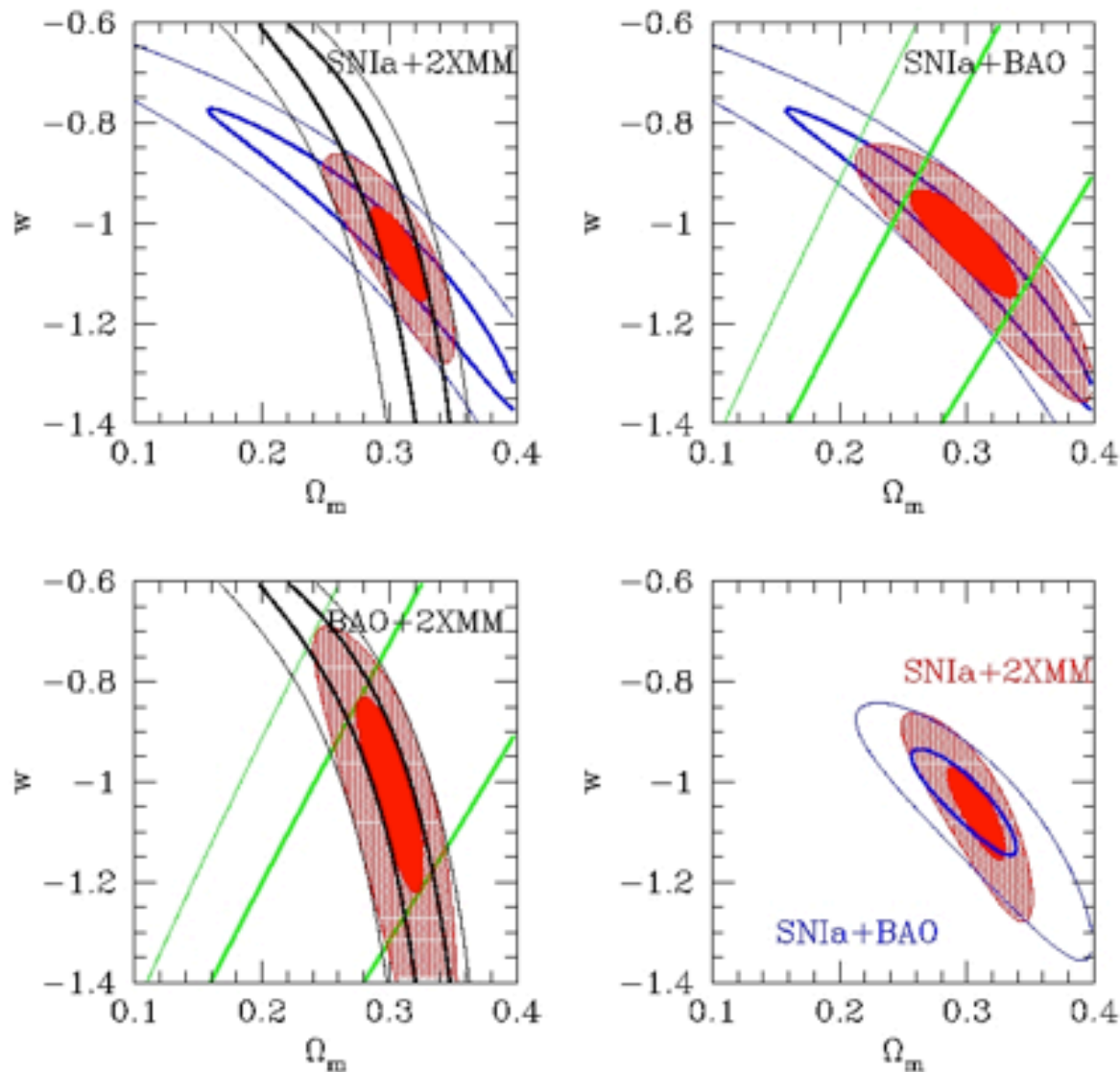
$$\Omega_m \sim 0.27, \quad \Omega_\Lambda \sim 0.73$$

# Κοσμολογία μέσω Αποστάσεων Λαμπρότητας



# Precision Cosmology using Hubble expansion + X-ray AGN Clustering Probes

(Basilakos & Plionis 2009; Plionis et al. 2011)



**Example of our methodology:**  
The joint likelihood analysis, of the 2XMM clustering and the SNIa Hubble relation, and under the priors of a flat universe,  $h=0.704$  and  $\sigma_8=0.81$  provide significantly more stringent QDE constraints, as indicated by the fact that the *Figure of Merit* increases by a factor  $\sim 2$ , with respect to that of the joint SNIa-BAO analysis.

$$\Omega_m = 0.31 \pm 0.01, \quad w = -1.06 \pm 0.05$$