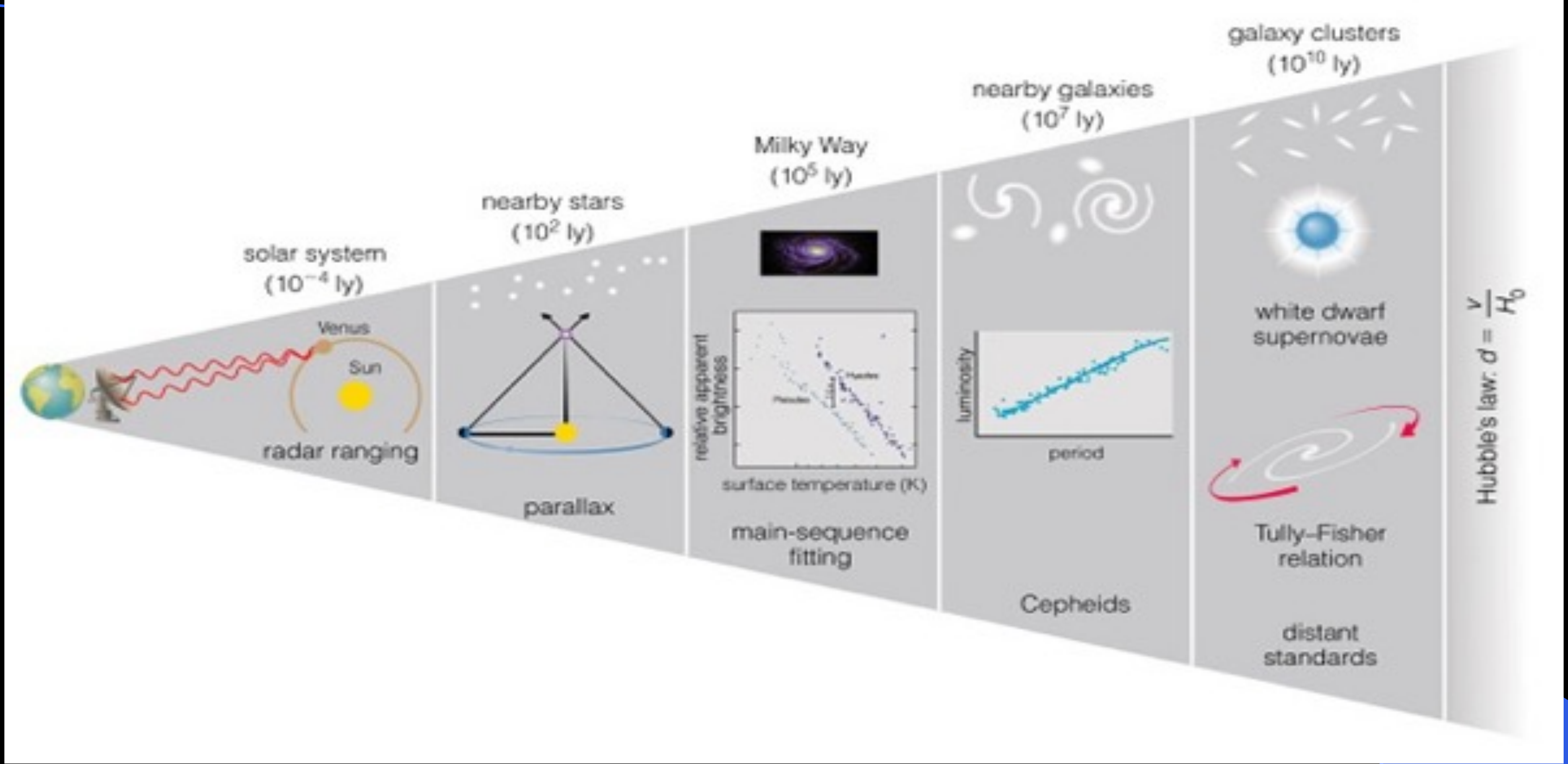
ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ

Για να μπορέσουμε να ξεκινήσουμε στο ταξίδι μας στην κατανόηση του Σύμπαντος και των φυσικών διεργασιών που συντελούνται 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).

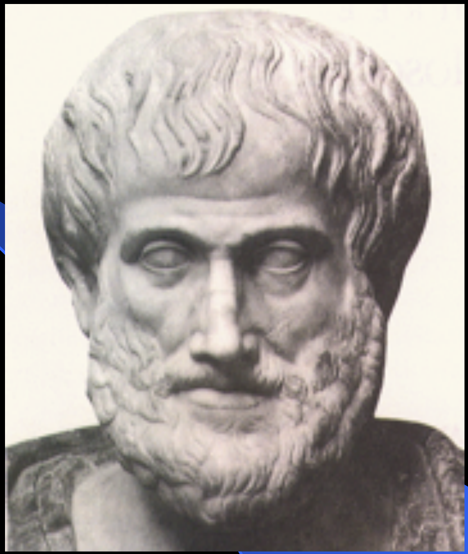
- 1 AU = απόσταση Γης – Ηλίου = 149 598 000 Κμ
- Έτος φωτός = Η απόσταση που διανύει σε ένα έτος και στο κενό το φως = 63000 AU = 9.5×10^{12} Κμ
- Parsec = 3.24 έτη φωτός (Mpc = 1,000 pc)
- arc-second = (1 μοίρα/3600)



- Οι κοσμικές απόστάσεις είναι τεράστιες και δεν μπορούμε να τις μετρήσουμε απ'ευθείας (άμεσα) αλλά μόνο με έμμεσους τρόπυς.
- 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...

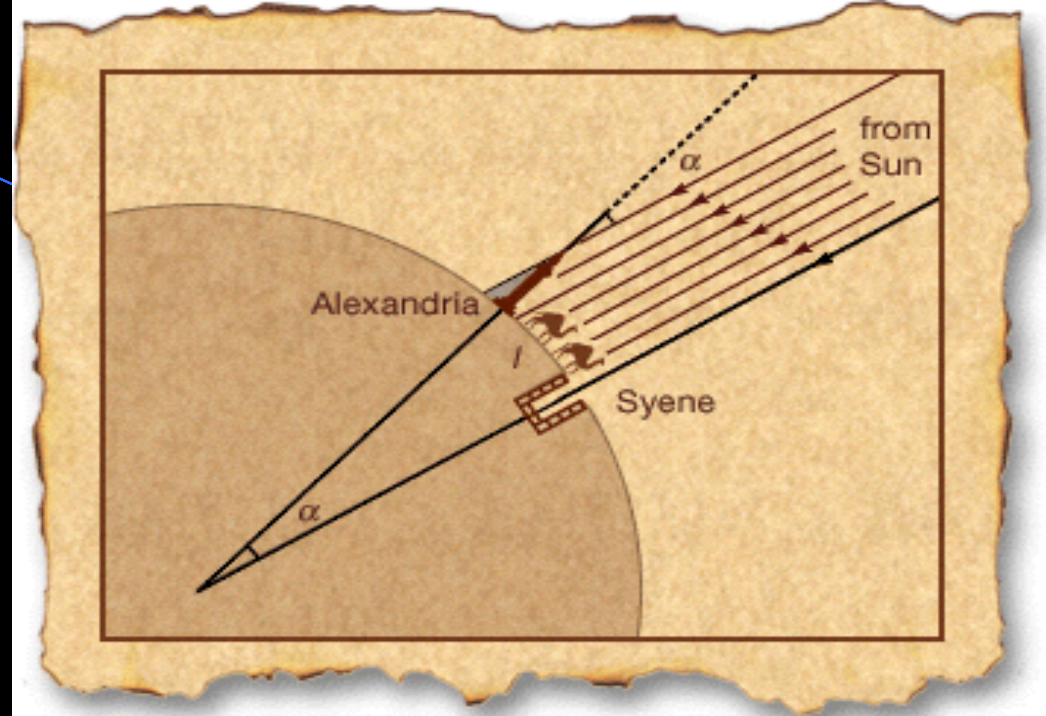
1ο Σκαλοπάτι: Η ακτίνα της Γης

Σχετικά εύκολα μπορεί κάποιος να μετρήσει την ακτίνα της Γης, εάν γνωρίζει **Γεωμετρία**!



Ο Αριστοτέλης (384-322 πΧ) απέδειξε με απλά επιχειρήματα ότι η Γη είναι σφαιρική (λόγω της κυκλικής σκιάς της Γης κατά την έκλειψη σελήνης), που το υποστήριζε ήδη ο Παρμενίδης (515-450 πΧ).

Ο Ερατοσθένης (276-194 πΧ) υπολόγισε την ακτίνα της Γης στα 40,000 στάδια (~6800 χλμ), όταν η πραγματική ακτίνα της Γης είναι ~6376 χλμ (8% σφάλμα !!)



- Ο Ερατοσθένης είχε πληροφορηθεί ότι στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) ο Ήλιος έλαμπε στο βάθος ενός βαθιού πηγαδιού στη Συένη. Έκανε παρόμοια παρατήρηση σε πηγάδι στην πόλη του την Αλεξάνδρια πάλι στις 21 Ιουνίου και μέτρησε απόκλιση των ηλιακών ακτίνων από την κάθετο (με γνώμονα) 7 μοιρών.
- Ξέροντας την απόσταση μεταξύ Αλεξάνδριας και Συένης (5000 στάδια = 740 Κμ) και υποθέτωντας ότι ο Ήλιος είναι πολύ μακριά σε σχέση με το μέγεθος της ακτίνας της Γης, μπόρεσε ο Ερατοσθένης με απλή τριγωνομετρία να υπολογίσει την ακτίνα της Γης. Δηλαδή $2 \pi R/360 = 5000/7$ στάδια => R=40000 στάδια

2ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση & ακτίνα της Σελήνης

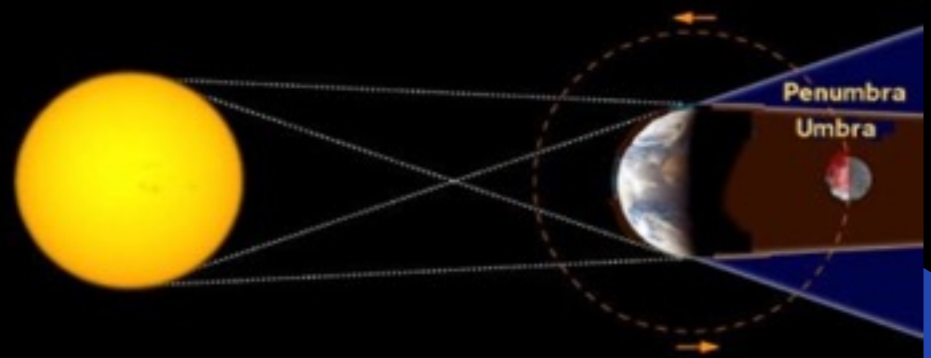
Και αυτές τις ερωτήσεις τις απάντησαν πρώτοι οι αρχαίοι 'Ελληνες με την χρήση της Γεωμετρίας!

Ο Αριστοτέλης θέωρησε ότι η Σελήνη είναι σφαιρική και όχι πχ. δίσκος ακριβώς επειδή το όριο του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια του ήταν τόξο κύκλου.

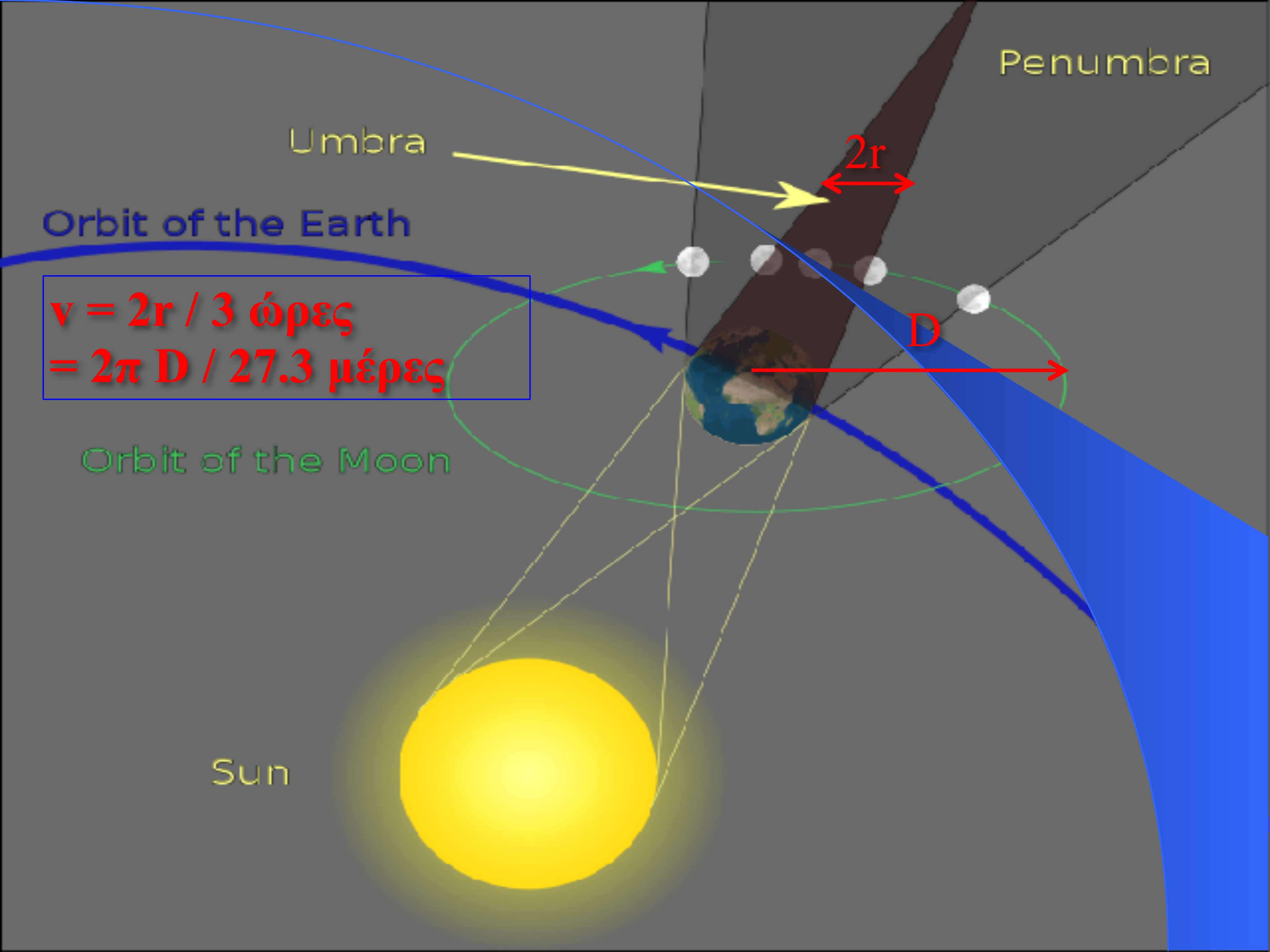
Ο Αρίσταρχος (310-230 μΧ) υπολόγισε την απόσταση Γης-Σελήνης σε περίπου 60 Γήινες ακτίνες (η οποία πράγματι μεταβάλεται μεταξύ 57 και 63 ακτίνες).

Ο Αρίσταρχος επίσης υπολόγισε την ακτίνα της Σελήνης στο 1/3 της ακτίνας της Γης (η πραγματική τιμή της είναι 0.273 της ακτίνας της Γης).

Πως τα κατάφερε ο Αρίσταρχος να υπολογίσει την απόσταση Γης - Σελήνης;



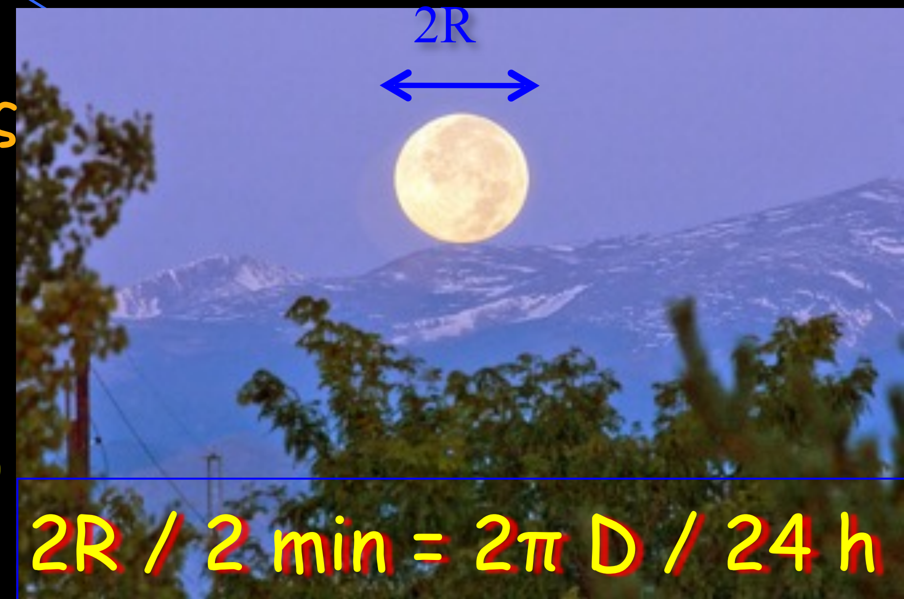
1. Ο Αρίσταρχος ήξερε ότι οι Σεληνιακές εκλείψεις οφείλονταν στην σκιά της Γης, που επομένως θα είχε διάμετρο 2 Γήινες ακτίνες (υποθέτοντας ότι ο Ήλιος είναι πολύ μακρύτερα από τα δύο σώματα).
2. Από πολλές καταγεγραμένες παρατηρήσεις (Ασσύριων, Βαβυλώνιων κλπ) ήταν γνωστό ότι η σεληνιακή έκλειψη διαρκεί το πολύ 3 ώρες.
3. Επίσης ήταν γνωστό ότι η Σελήνη χρειάζεται 27.3 μέρες για να περιστραφεί γύρω από την Γη.
4. Επομένως με λίγους αλγεβρικούς υπολογισμούς: $2\pi D/27.3$ μέρες $= 2r_e/3h$ ο Αρίσταρχος κατέληξε ότι η απόσταση της Σελήνης είναι ~60 Γήινες ακτίνες ($r_e = 6378$ κμ)



Penumbra
Umbra
2r
Orbit of the Earth
v = 2r / 3 ώρες
= 2π D / 27.3 μέρες
D
Orbit of the Moon
Sun

Πως τα κατάφερε ο Αρίσταρχος να υπολογίσει το μέγεθος (γωνιακό και μετρικό) Σελήνης;

Η Σελήνη κάνει 2 λεπτά (1/720 της ημέρας) για να δύσει, ενώ κάνει 24 ώρες για (φαινόμενη) πλήρη περιστροφή →γωνιακό μέγεθος Σελήνης $\theta = \frac{1}{2}^{o}$ (360^{o}/24ώρες=$\theta/2'$)



Ο Αρίσταρχος είχε υπολογίσει απόσταση Γης-Σελήνης σε 60 Γήινες ακτίνες, που σημαίνει ότι η ακτίνα Σελήνης είναι 1/3 της ακτίνας της Γης και επομένως η απόσταση Γης-Σελήνης είναι ίση με **180 ακτίνες Σελήνης**. Σημειωτέον ότι ο Αρίσταρχος δεν ήξερε ακριβή τιμή του π (υπολογίστηκε από Αρχιμήδη (287-212πΧ) μερικές δεκαετίες αργότερα).

3ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση και μέγεθος Ήλιου

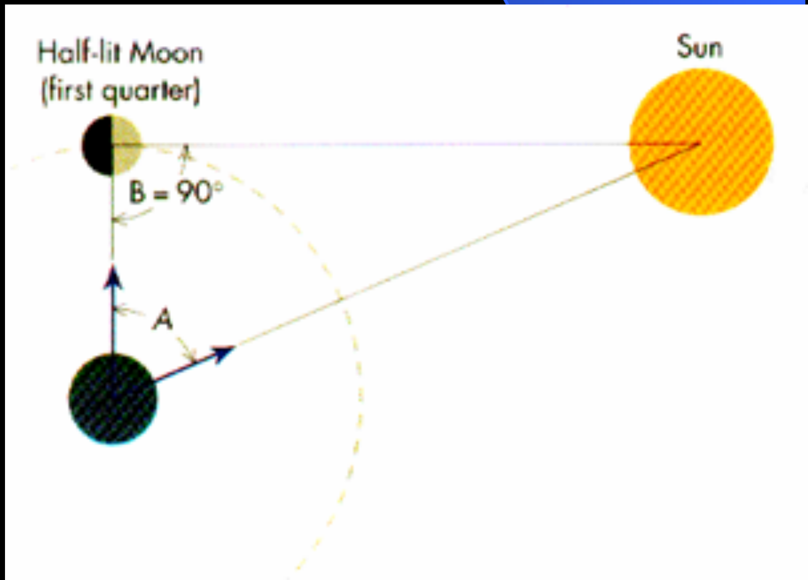
Πάλι οι αρχαίοι είχαν απαντήσεις

- Ο Αρίσταρχος ήξερε ήδη ότι η ακτίνα της Σελήνης είναι 1/180 της απόστασης Γης-Σελήνης. Επειδή δε ο Ήλιος και η Σελήνη έχουν το ίδιο γωνιακό μέγεθος (όπως αποδεικνύεται κατα τις Ηλιακές εκλείψεις), χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες ομοίων τριγώνων υπέθεσε ορθώς ότι η ακτίνα του Ηλίου είναι περίπου 1/180 της απόστασης του (στην πραγματικότητα είναι 1/215).

3ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση και μέγεθος Ήλιου

- Επίσης υπολόγισε (εσφαλμένα) ότι ο Ήλιος είναι 20 φορές πιο μακριά από τη Σελήνη (στην πραγματικότητα είναι 390 φορές).

- Από αυτούς τους υπολογισμούς κατέληξε στο πολύ σημαντικό συμπέρασμα ότι ο Ήλιος είναι πολύ μεγαλύτερος από την Γη, γεγονός που τον βοήθησε να προτείνει το Ηλιοκεντρικό σύστημα 1700 χρόνια πριν τον Κοπέρνικο.



4ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση Ηλίου-πλανητών

Οι αρχαίοι γνώριζαν ότι ο Ήλιος και οι πλανήτες βρίσκονταν στο ζωδιακό κύκλο, δηλαδή στο ίδιο επίπεδο, αυτό της εκλειπτικής. Δώσαν λάθος απαντήσεις όμως σχετικά και με την απόσταση του Άρη και φυσικά το σχετικά με το Πτολεμαϊκό γεωκεντρικό μοντέλο.

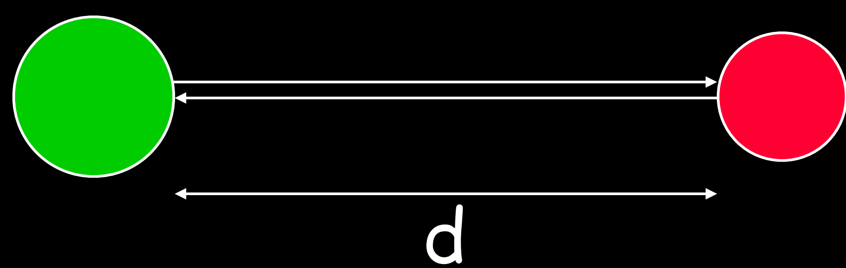
Οι σωστές απαντήσεις έπρεπε να περιμενουν τον Κοπέρνικο (1473-1543), που βρήκε την ορθή περίοδο του Άρη, τον Κέπλερ (1571-1630) που βρήκε τις ελλειπτικές τροχιές των πλανητών βασιζμένοι στις παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε (1546-1601).

4ο 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:

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



Χρησιμοποιούμε ραδιοκύματα γιατί η ατμόσφαιρα της Γης είναι διαπερατή σε αυτά. Πρόβλημα της μεθόδου είναι η μείωση της έντασης του ανακλόμενου σήματος συναρτήσει της απόστασης.

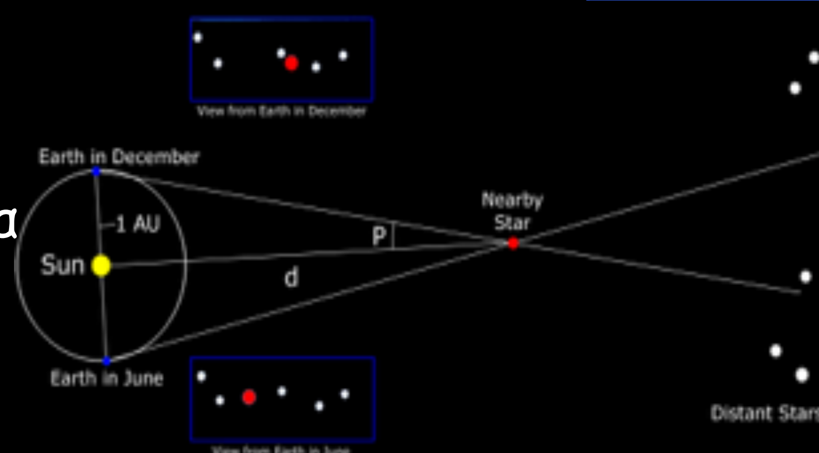
5ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση των κοντινών αστέρων μέσω τριγωνομετρικής παράλλαξης

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.

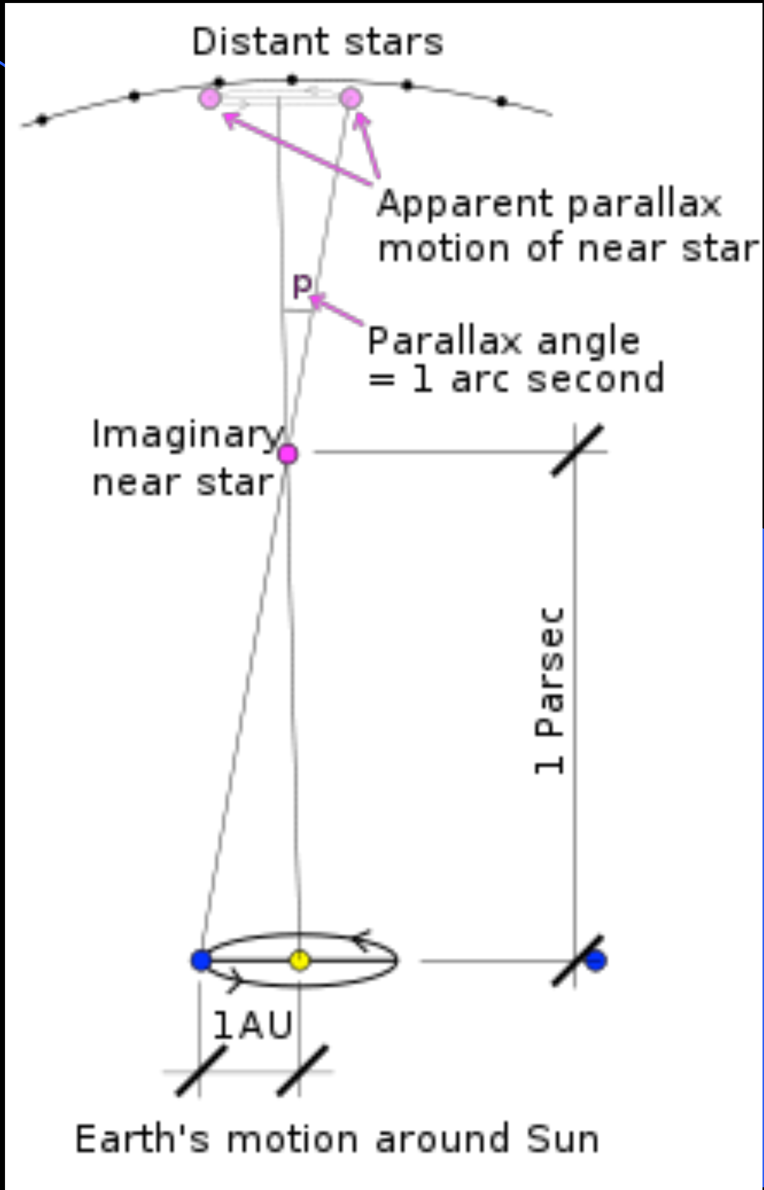
Χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια παρατηρήσεις και με επίγεια τηλεσκόπια μπορούμε να μετράμε αποστασεις έως και 30 πάρσεκ (100 έτη φωτός). Ενώ με δορυφόρους όπως ο «Ίππαρχος», μέχρι 1500 έτη φωτός.

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!



5ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση των κοντινών αστέρων μέσω τριγωνομετρικής παράλλαξης

Ορισμός Parsec:
Η απόσταση ενός νοητού αστέρα που εμφανίζει παράλλαξη ενός δευτερολέπτου της μοίρας.



6ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση των μεσαίας απόστασης αστέρων μέσω του διαγράμματος HR (φασματοσκοπική παράλλαξη)

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):

$$m-M=5\log r - 5 \text{ (σε pc)}$$

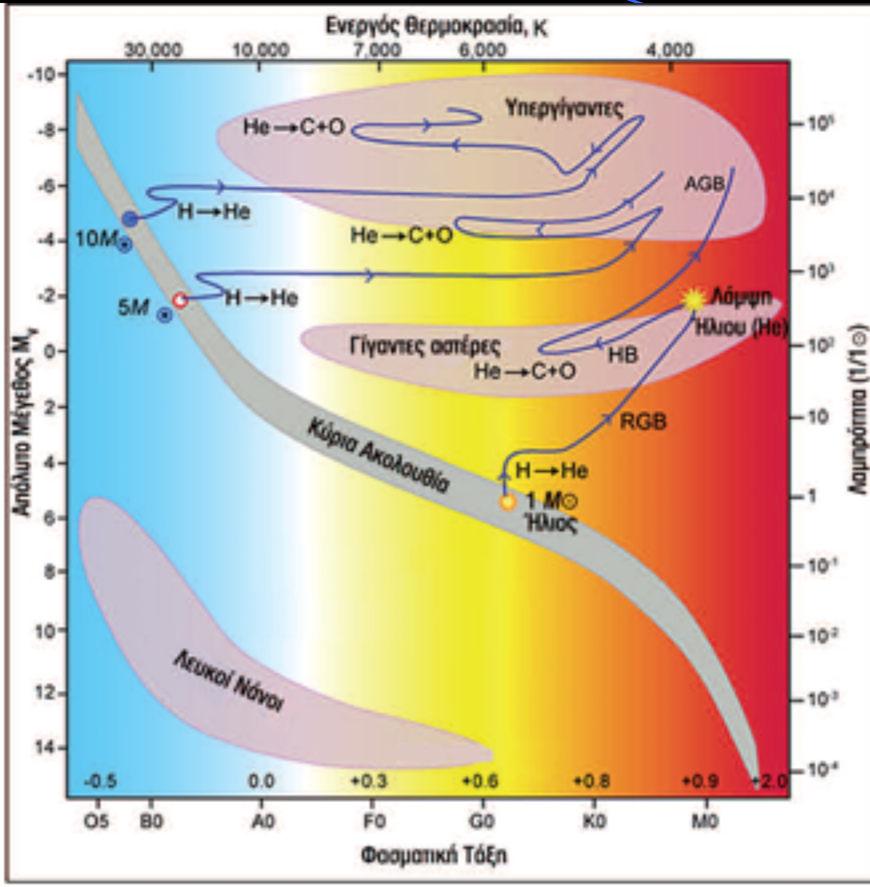
$$m-M=5\log r + 25 \text{ (σε Mpc)}$$

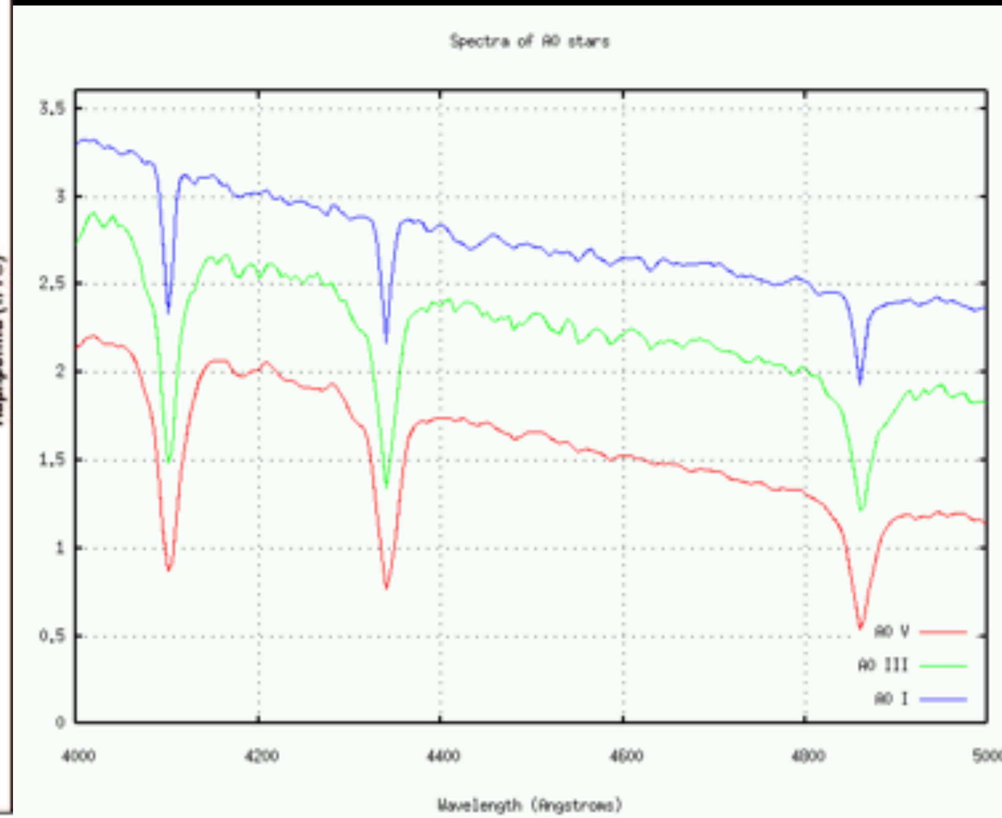
6º Σκαλοπάτι: Η απόσταση των μεσαίας απόστασης αστέρων μέσω του διαγράμματος HR (φασματοσκοπική παράλλαξη)

- Ο Ejnar Hertzsprung (1873-1967) και ο Henry Russell (1877-1957) βρήκαν μεταξύ του 1905-1915 ότι υπάρχει συγκεκριμένη συσχέτιση μεταξύ λαμπρότητας και χρώματος (το διάσημο διάγραμμα Hertzsprung-Russell).

  Οπότε από την οπτική φωτομετρία μακρινών αστέρων μπορεί κάποιος να εξάγει την λαμπρότητα τους και μέσω της παραπάνω σχέσης την απόσταση τους.

- Αυτή η μέθοδος λειτουργεί μέχρι αποστάσεις 300,000 ετών φωτός.

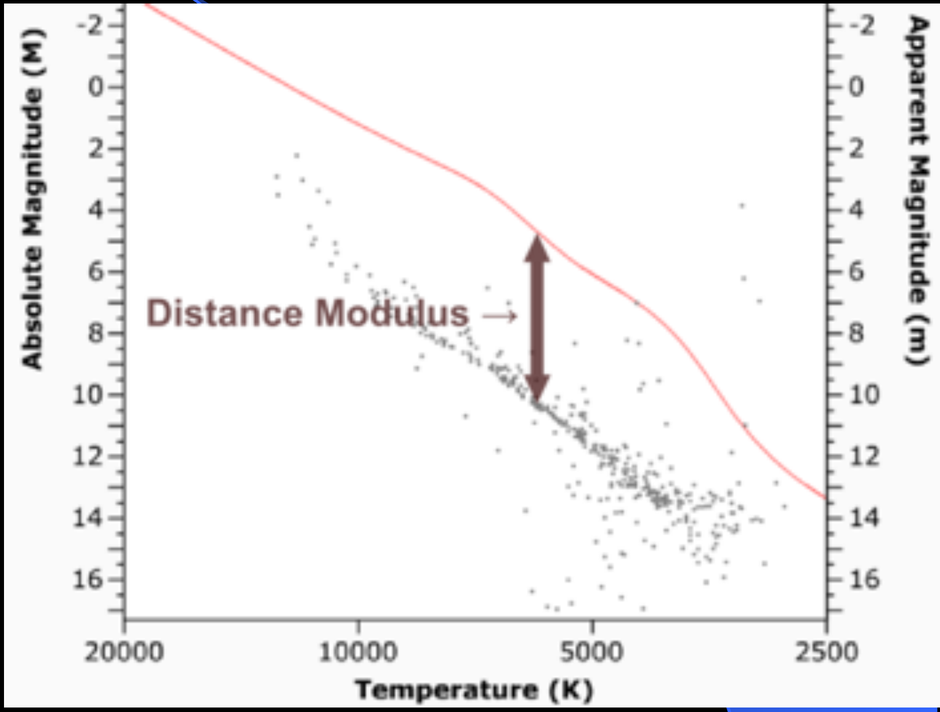




Από το φάσμα του αστέρα, υπολογίζουμε το Φασματικό του τύπο και τον τοποθετούμε στον άξονα x, την δε θέση του στις διάφορες οικογένειες (MS, RGB, HB etc) από το πλάτος των γραμμών απορρόφησης. Κατόπιν διαβάζουμε το απόλυτο μέγεθος αριστερά.

6ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση των μεσαίας απόστασης αστέρων μέσω προσαρμογής Κύριας Ακολουθίας διαγράμματος HR Αστρικών Σμηνών

Στηρίζεται στο γεγονός ότι όλα τα αστέρια ενός σμήνους έχουν την ίδια απόσταση από το παρατηρητή. Η μεταβλητή είναι το φαινόμενο μέγεθος (άξονας y) που συγκρίνεται καθ'ύψος με το βαθμονωμημένο διάγραμμα HR. Η βαθμονόμηση έχει επιτευχθεί με μέθοδο τριγ.παραλλάξεων κοντινών αστέρων.



Δυσκολίες: (1) Όσο πιο γηραιό είναι το σμήνος τόσο περισσότερα αστέρια έχουν φύγει από την κύρια ακολουθία, τόσο μικρότερη Κ.Α. για να χρησιμοποιήσει κανείς στην προσαρμογή της καμπύλης,

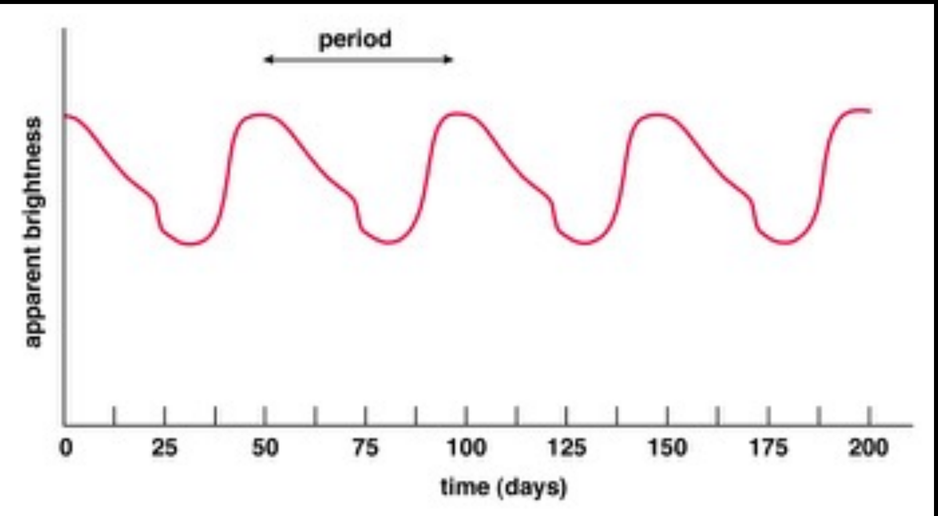
(2) Προβολή στην ίδια διεύθυνση κοντινότερων αστέρων (θα εμφανίζονται πάνω από την Κ.Α. του σμήνους) ή μακρυνότερων (κάτω από την ΚΑ).

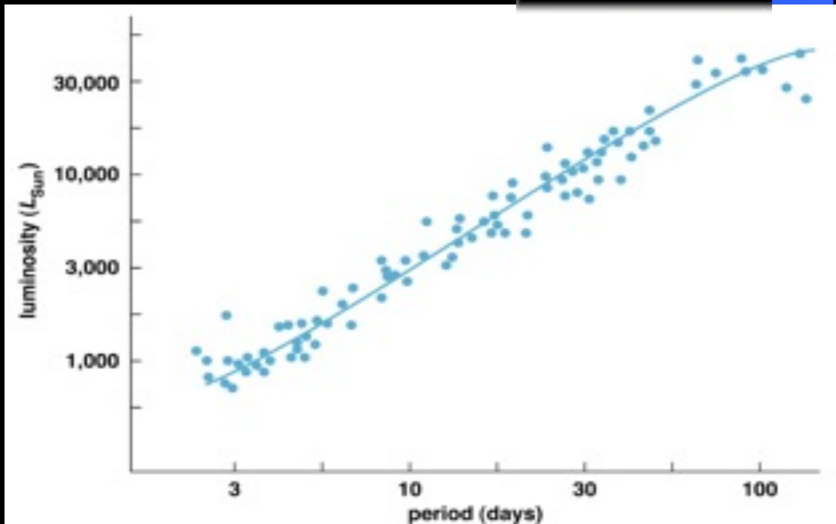
7ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας

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

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

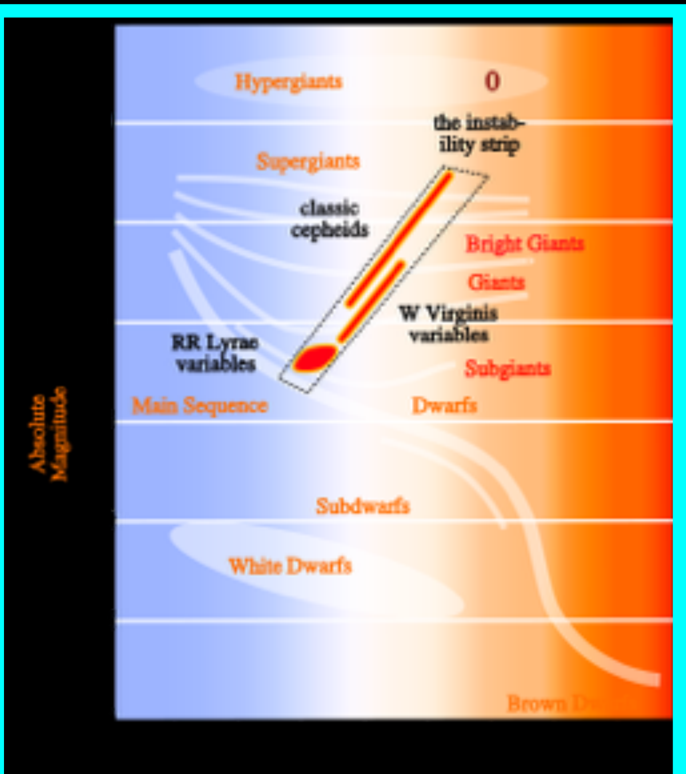
Η μέθοδος δουλεύει μέχρι αποστάσεις 13 x 10^6 έτη φωτός, δηλαδή μέχρι τα όρια και λίγο πιο μακριά της τοπικής ομάδας γαλαξιών.





7^o Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας

Η βασική αιτία που μεταβάλλεται η λαμπρότητα τους περιοδικά, είναι η μεταβολή του ρυθμού "απόδρασης" της ακτινοβολίας από τον αστέρα και όχι μεταβολή στο ρυθμό της πυρηνικής σύντηξης στον αστρικό πυρήνα που παραμένει σταθερός.



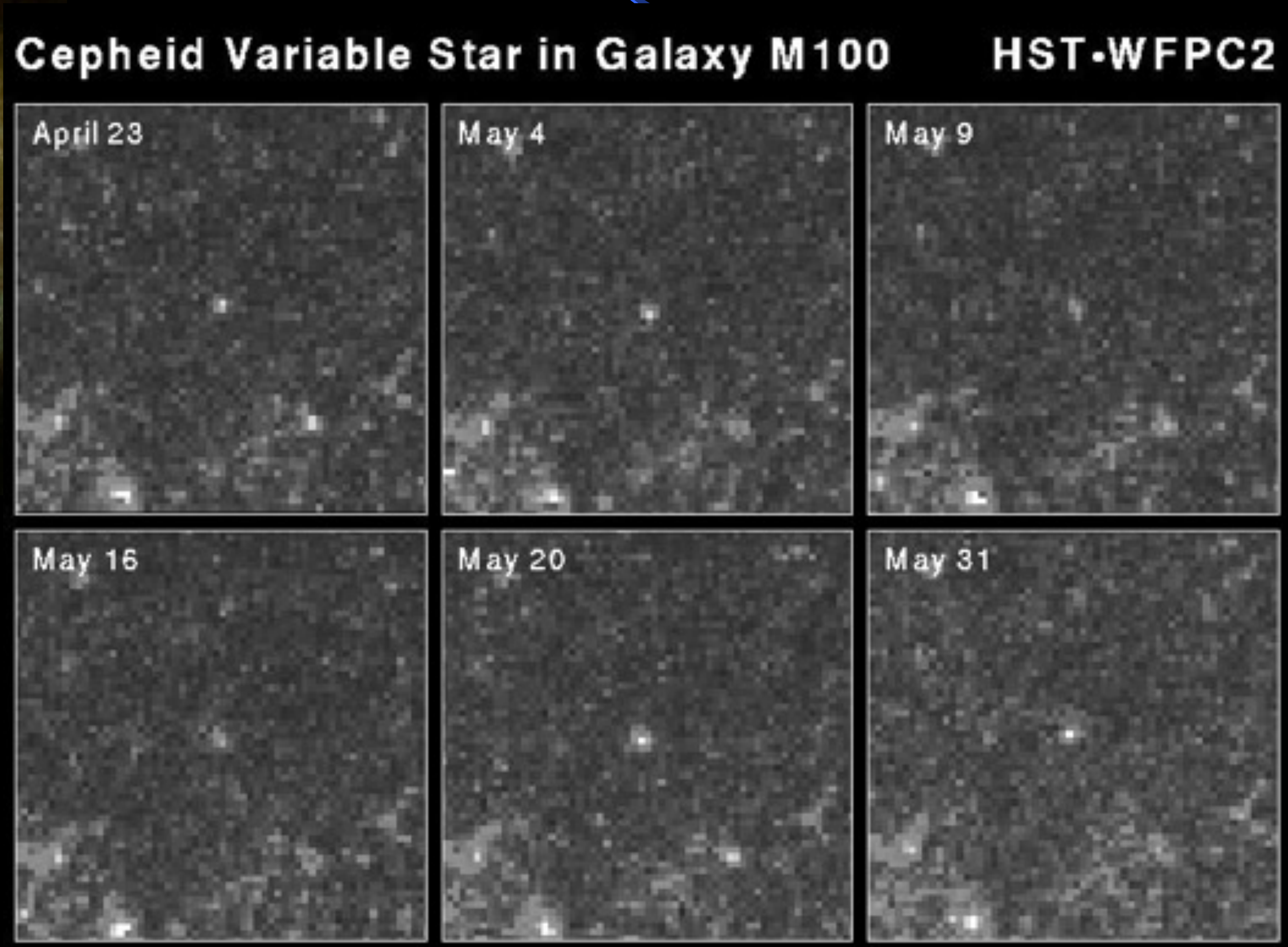
Όπως αυξάνεται η θερμοκρασία το $He^+ \rightarrow He^{++}$ (αδιαφανές), όταν οι εξωτερικές στοιβάδες γίνουν αδιαφανή, δεν διαφεύγει πολύ ακτινοβολία το άστρο διαστέλλεται, ψύχεται, λιγότερος ιονισμός: $He^{++} \rightarrow He^+$, ξανά διαφανές, ακτινοβολία διαφεύγει, σταματά διαστολή, αρχίζει συστολή λόγω βαρύτητας, και επανάληψη.

7° Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες ή RR-Λύρας

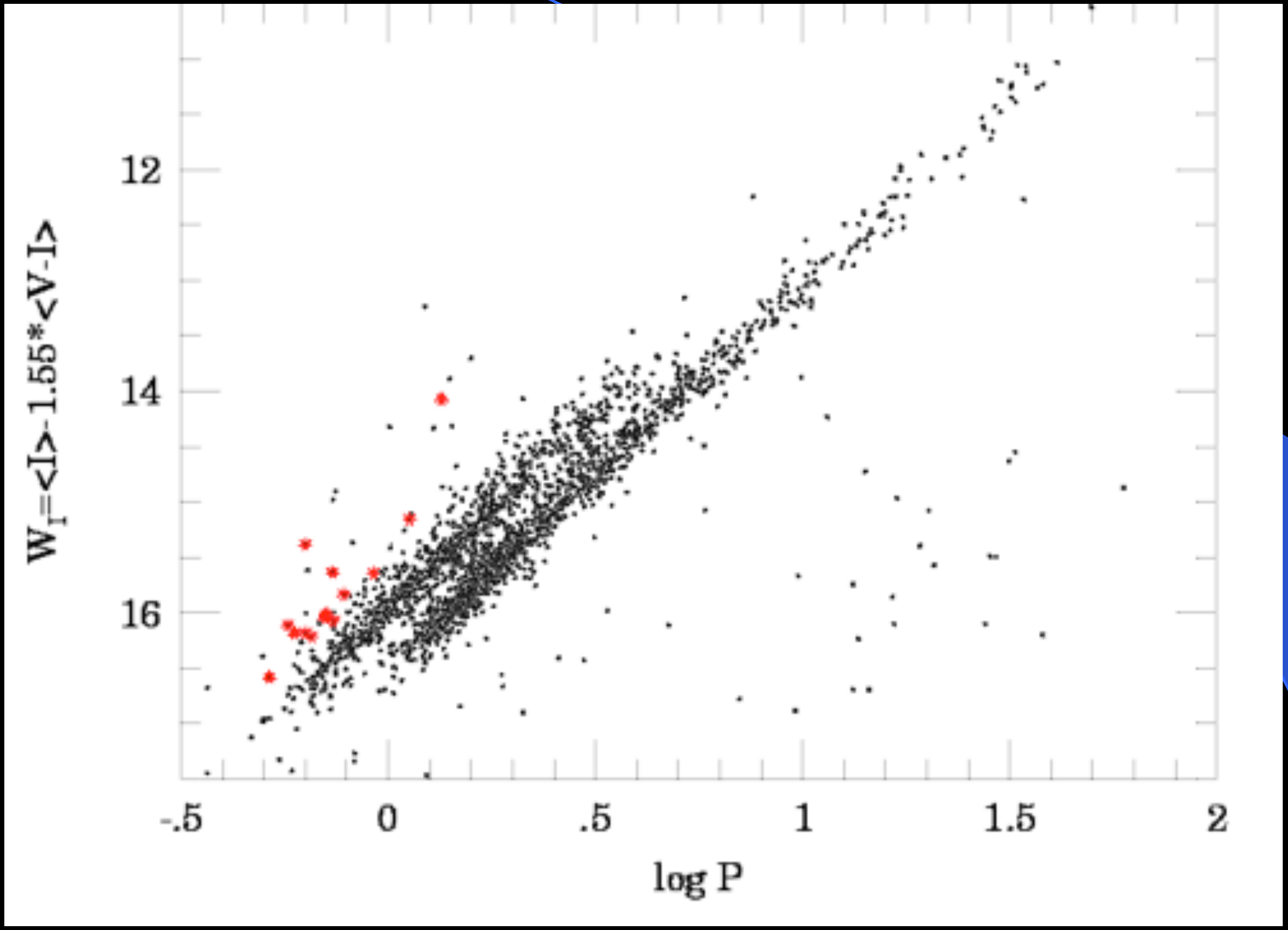
Οι Κηφείδες και τα αστέρια τύπου RR-Λύρας είναι μεταβλητά αστέρια με περιοδικότητα στη φωτεινότητα τους.

Κηφείδες I	Κηφείδες II	RR-Λύρας
Πολύ Λαμπρά (10^6 $L_\odot$) *0.5-2m εύρος μεγέθους.*	*(~10^5 $L_\odot$)* *0.3-1.5m εύρος μεγέθους.*	*~40* $L_\odot$ *0.3-2m εύρος μεγέθους.*
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: 5-10 ημέρες	Περίοδος: 12-30 ημερες	Περίοδος: ώρες
Σπάνια	Σπάνια	Αρκετά κοινά άστρα σε Σφαιρωτά Σμήνη

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



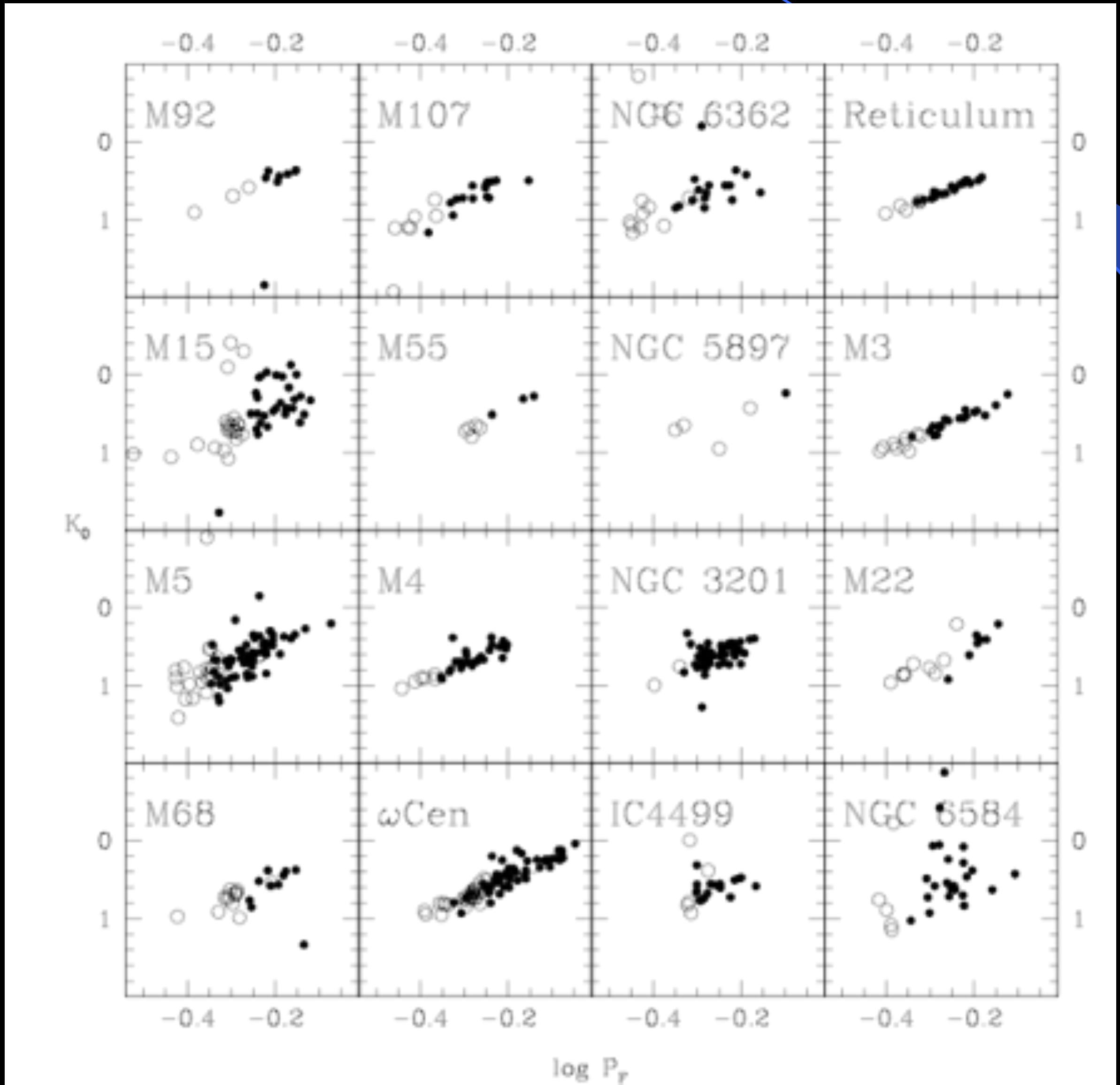
Όμως έχουν βρεθεί 2 τύποι ταλαντούμενων Κηφείδων (Ι, ΙΙ)



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-Κ)

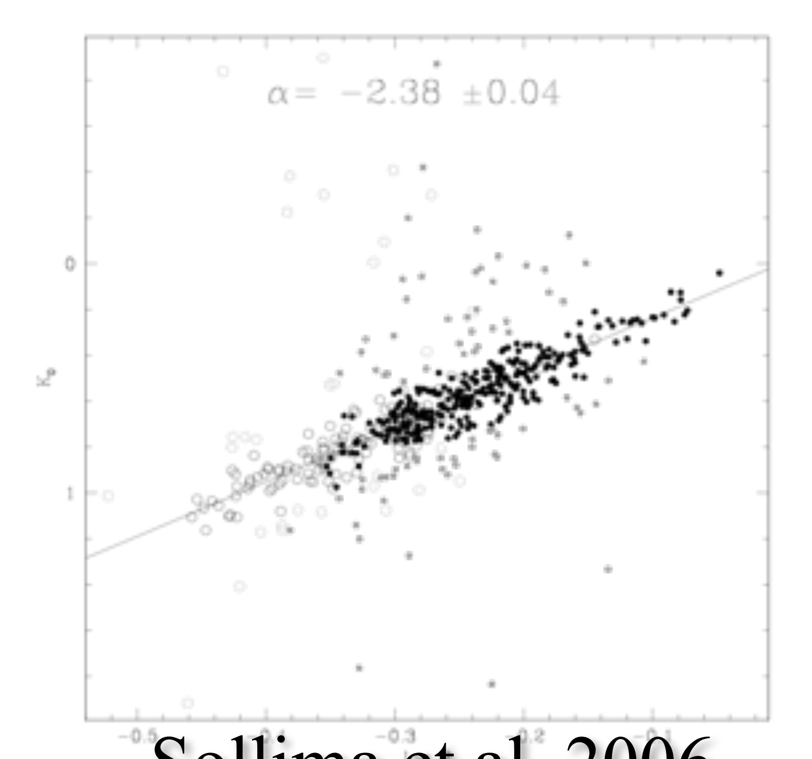


$$L = C\,P^{0.92}$$

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

Η βαθμονόμηση της σχέσης επετεύχθη με παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου Hubble και υπολογισμό της τριγωνομετρικής παράλλαξης του αρχέτυπου RR-Lyrae

Στο οπτικό έχουμε $L \sim T^4$ ενώ στο IR έχουμε $L \sim T^{1.6}$ και επομένως λιγότερο θόρυβο

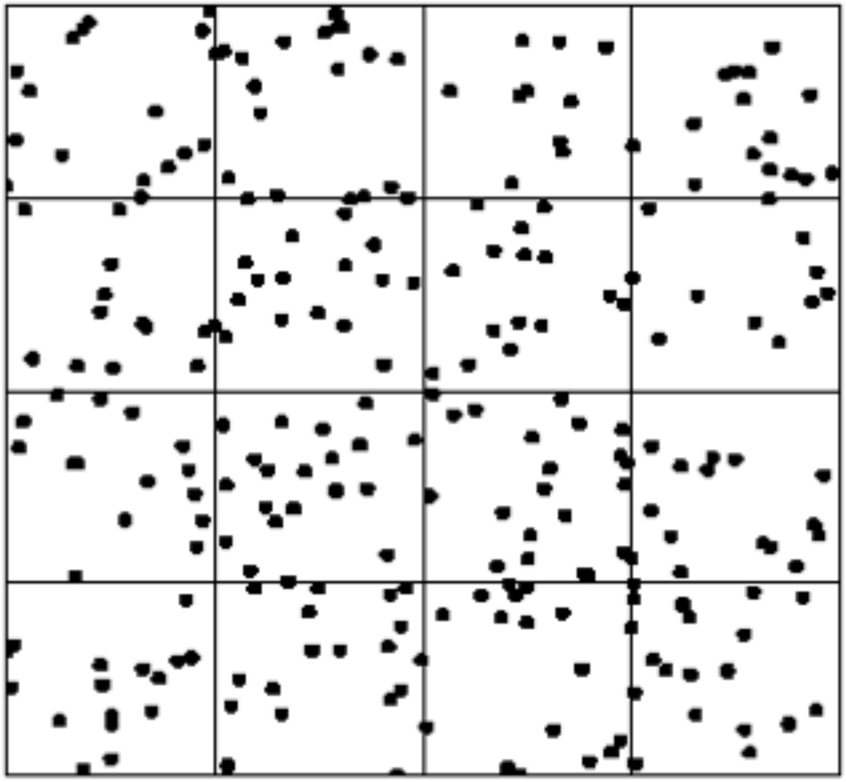


Sollima et al. 2006

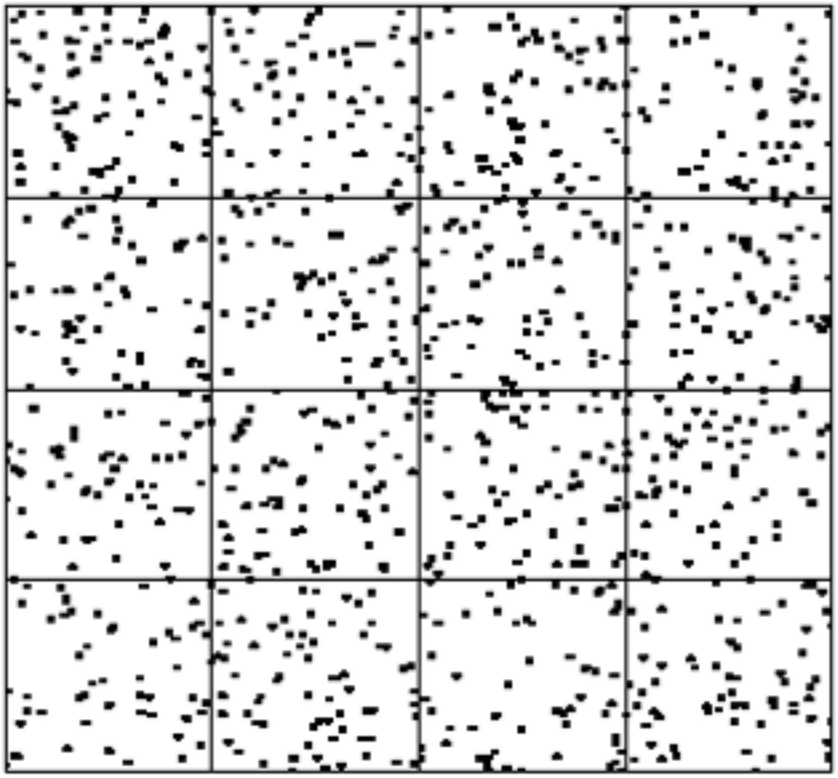
$$M_K = -2.38(0.04)\log P + 0.08(0.11)\,[Fe/H] - 1.05(0.13)$$

7ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση χρησιμοποιώντας διαταραχές επιφανειακής λαμπρότητας

Με CCD-photometry

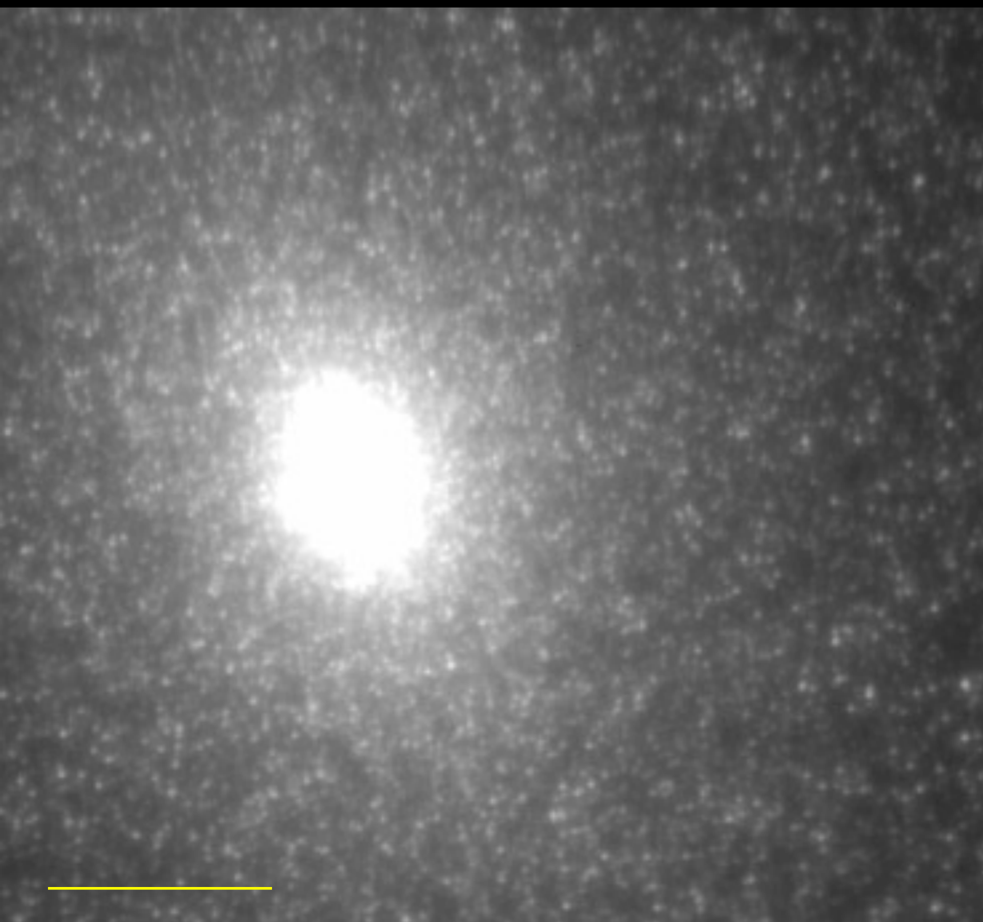


Nearby galaxy



Distant galaxy

Οι μακρινοί γαλαξίες εμφανίζονται πιο ομογενείς σε σχέση με κοντινούς. Η μέθοδος χρησιμοποιείται έως ~100 Mpc



M 32 (0.77 Mpc)

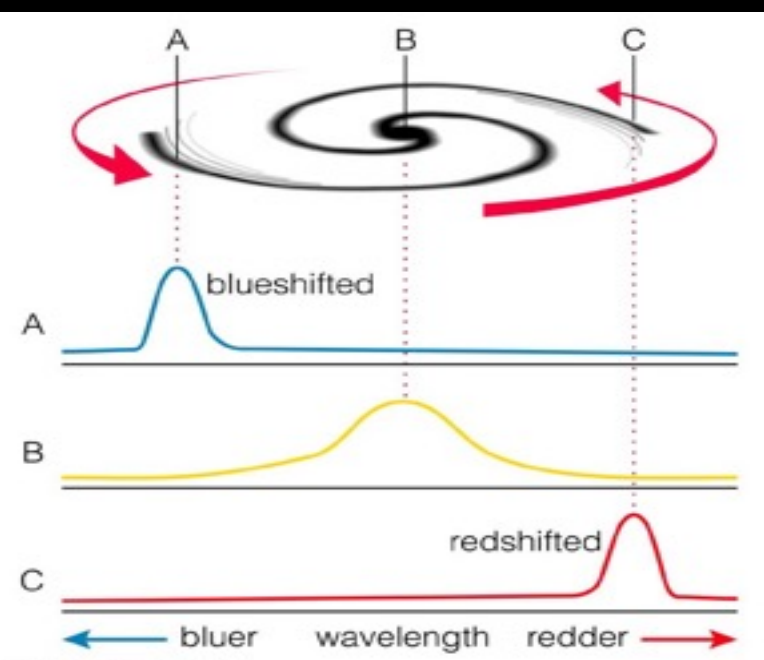
NGC 7768 (100 Mpc)

8ο Σκαλοπάτι: Η απόσταση γαλαξιών μέσω μετρικών σχέσων (Tully-Fisher, Faber-Jackson, D_n-σ)

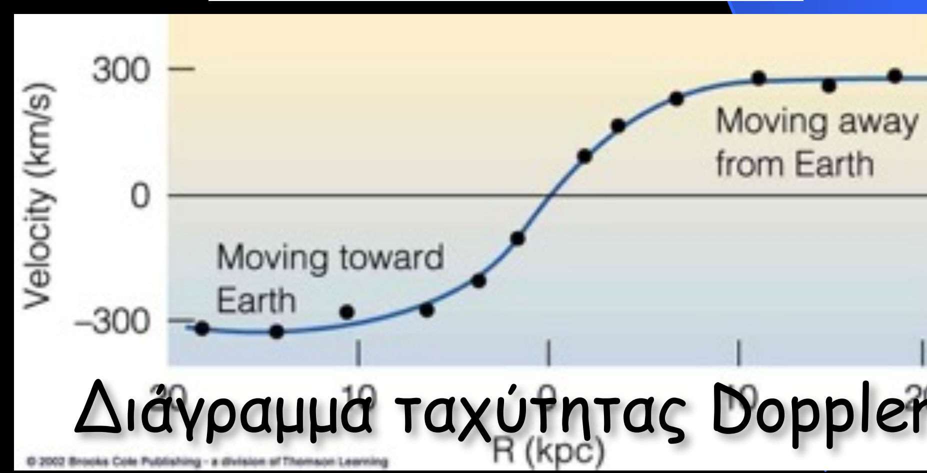
Το 1977 οι Brent Tully & Fisher βρήκαν ότι στους σπειροειδείς γαλαξίες ισχύει η σχέση

$$L = C_1 \, v^4$$

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

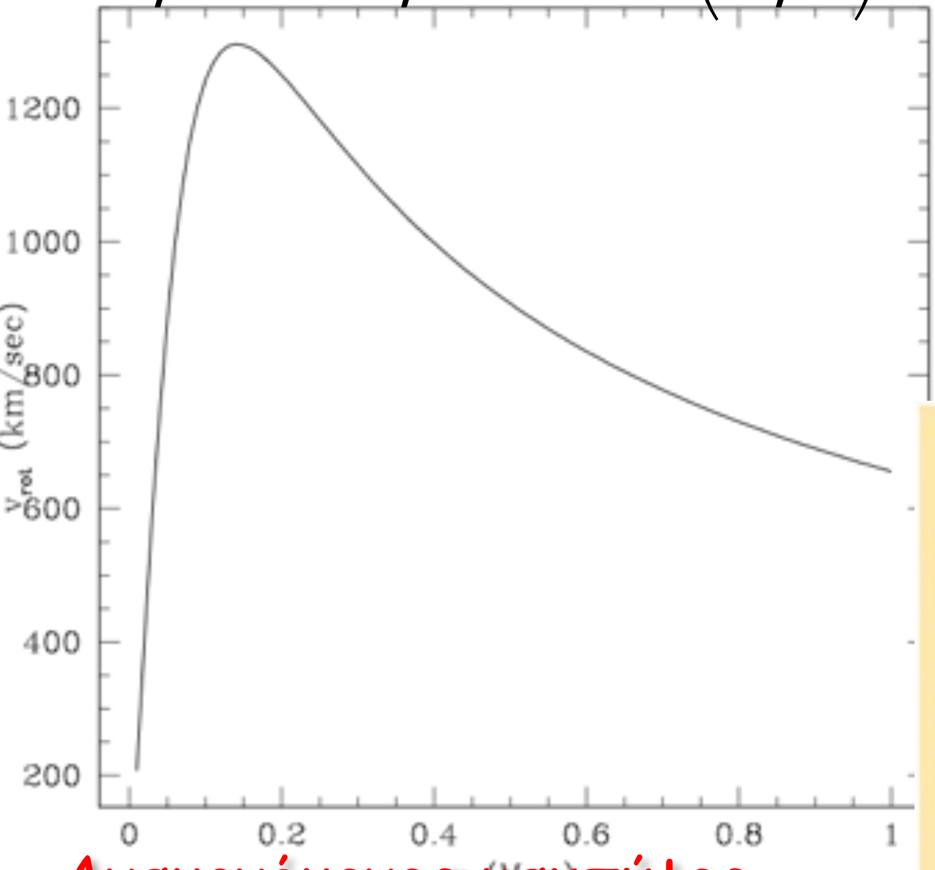


$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \approx 1 + v/c$$



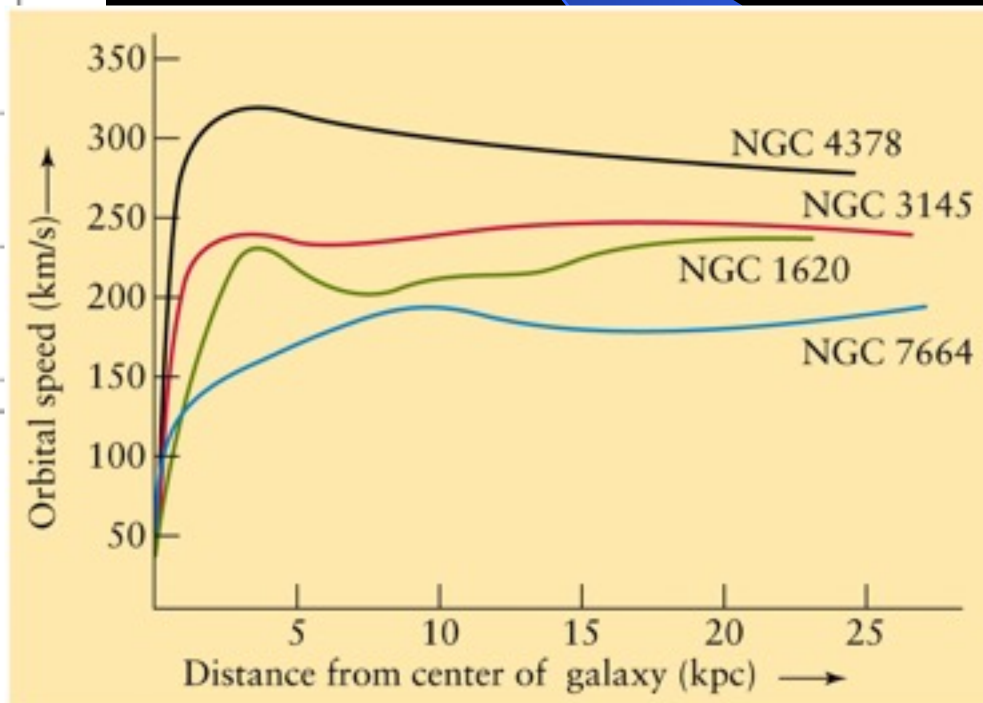
Διάγραμμα ταχύτητας Doppler

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \left(\frac{GM}{r}\right)^{1/2}$$



Αναμενόμενες καμπύλες περιστροφής

Παρατηρούμενες καμπύλες περιστροφής→ Σκοτεινή ύλη



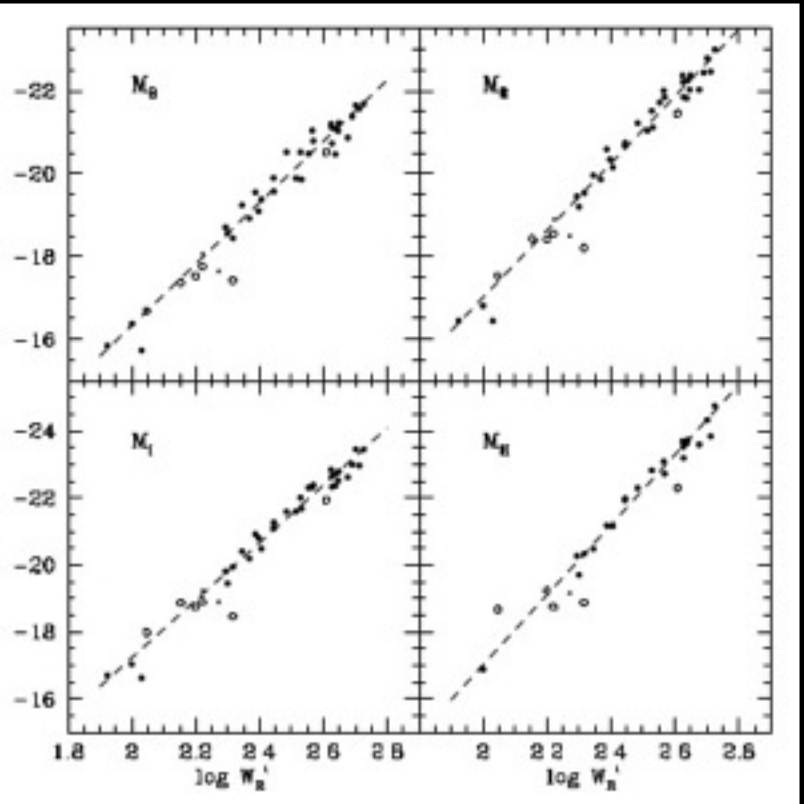
Βαθμονομημένες σχέσεις Tully-Fisher

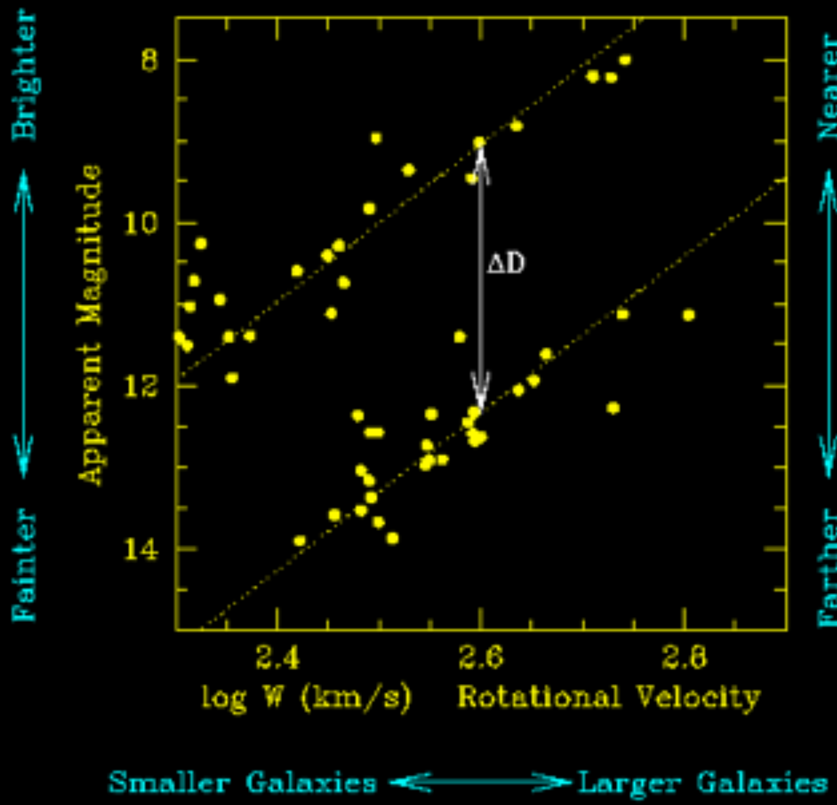
$$M_B = -7.41\ (\log W_i - 2.5) - 20.04\ (0.04)$$

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

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

$W = 2\ v_{max}$





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:

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

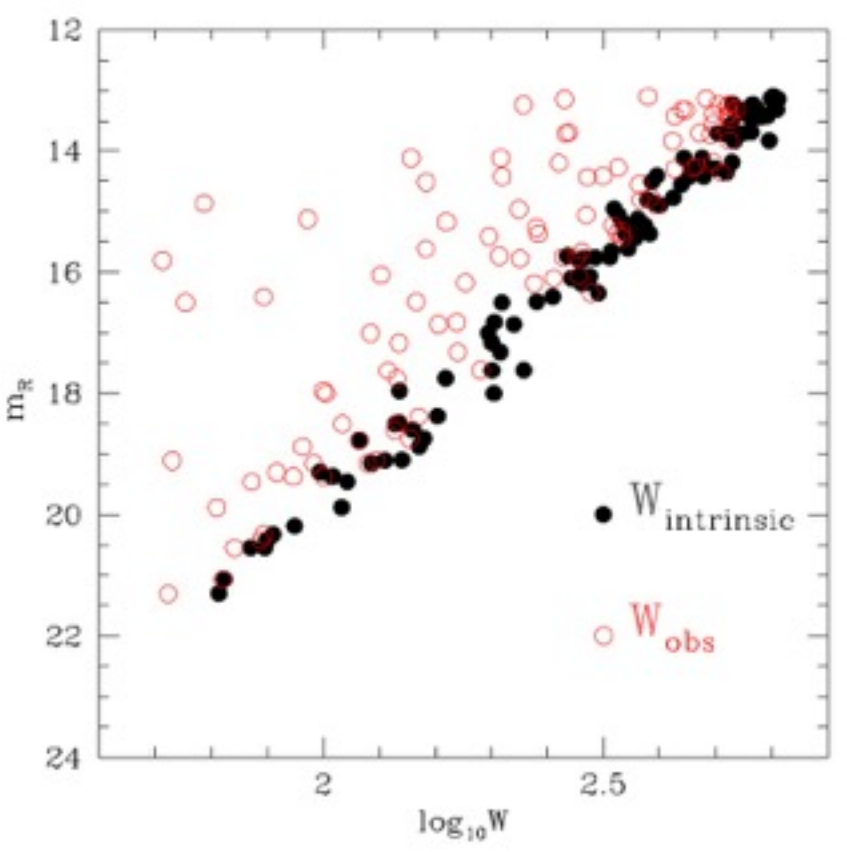
Όπου i είναι η γωνία μεταξύ επιπέδου γαλαξία και της ουρανίου σφαίρας

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:

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



Δεδομένα Σπειρωειδών γαλαξιών Μακρυνού σμήνου		
m_R	b/a	W_{obs}
14.301	0.401	423.8
16.731	0.697	179
16.381	0.914	91.3
13.327	0.798	398.4
18.714	0.494	123
14.744	0.203	386.4
13.413	0.816	388.3
16.844	0.84	132.4
14.311	0.214	492.9
13.536	0.569	443
15.187	0.458	339.2
15.564	0.536	301.1
20.28	0.242	79.1
15.327	0.552	275.6
20.809	0.707	55.9
14.714	0.722	315.9
13.378	0.788	388.2
12.976	0.255	615.2
16.792	0.952	76
15.417	0.411	260
17.135	0.565	160.1
13.694	0.71	374.5
15.011	0.993	49
16.315	0.365	223.2

Εργαστηριακή Άσκηση

Δεδομένα Σπειρωειδών γαλαξιών κάποιου σμήνους. Δίδονται τα φαινόμενα μεγέθη στη R-μπάντα, ο λόγος των αξόνων τους και η παρατηρούμενη περιστροφική τους ταχύτητα

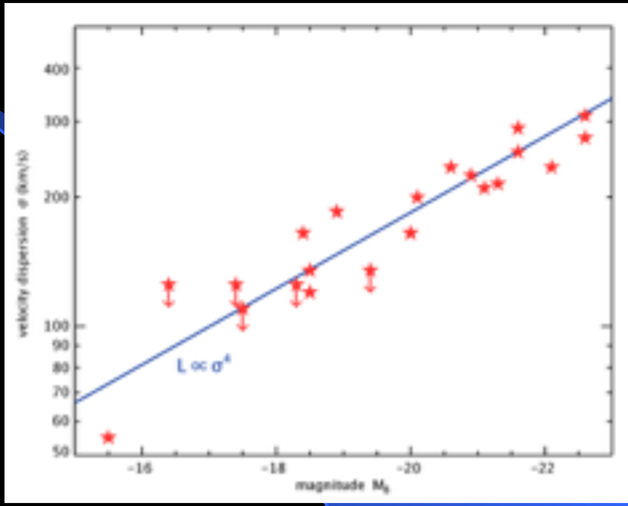
Υπολογίστε την απόσταση του σμήνους γαλαξιών για το οποίο έχουμε την σχέση T-F με φαινόμενα μεγέθη (στη μπάντα R)

$$m_R = -8.09\ (\log W_i - 2.5) + X$$

8^o Σκαλοπάτι: Η απόσταση γαλαξιών μέσω μετρικών σχέσων (Tully-Fisher, Faber-Jackson, D_n-σ)

Αντίστοιχη σχέση ισχύει και στους ελλειπτικούς γαλαξίες $L = C_2\ \sigma^{\gamma}$

Με γ=3.1 για λιγότερο μαζικούς γαλαξίες και γ=15 για πολύ μαζικούς. σ 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-mag arcsec^{-2}.

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

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

ΠΡΟΣΟΧΗ:

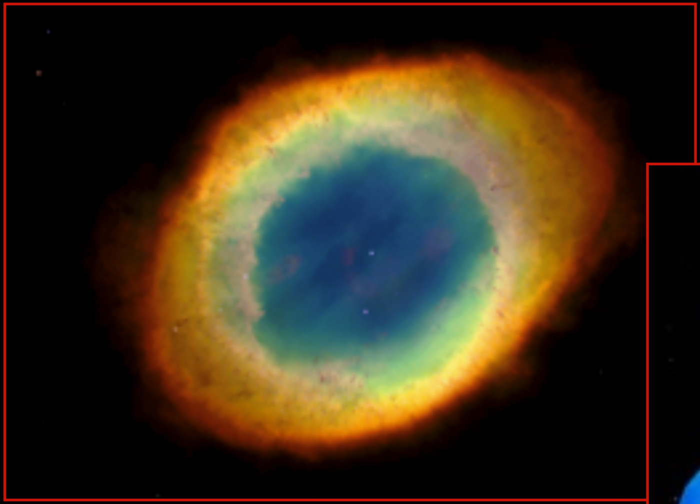
Οι μετρικές σχέσεις (Κηφείδες, TF, FJ κλπ) συνδέουν μια παράμετρο που είναι ανεξάρτητη της απόστασης με μια παράμετρο που εξαρτάται από την απόσταση (συνήθως φαινομενολογικές – εμπειρικές σχέσεις αλλά η συναρτησιακή μορφή τους είναι θεωρητικά αναμενώμενες)!

Από θεώρημα Virial, σταθερό λόγο M/L, και σταθερή τιμή επιφανειακής λαμπρότητας αναμένουμε:

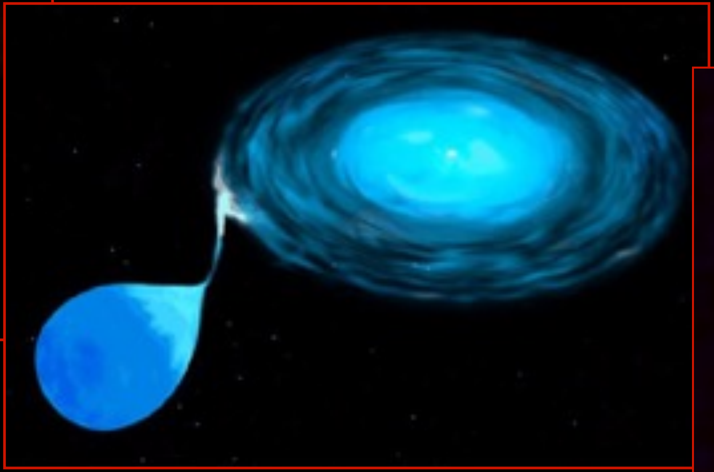
$$L \sim \sigma^4$$

9ο Σκαλοπάτι: Υπερκαινοφανείς τύπου Ia («σταθεροί Λαμπτήρες») έως z=1.3-1.4

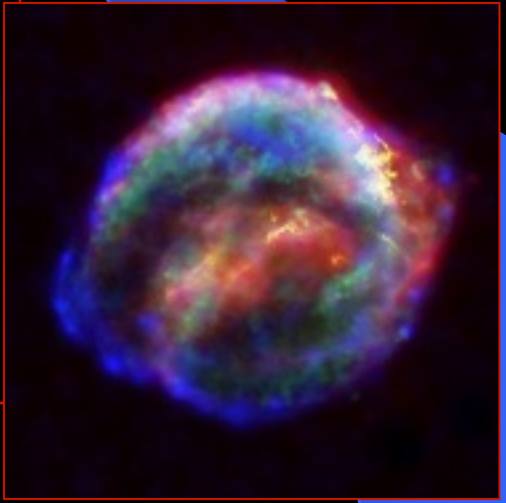
ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΑ SUPERNOVA Ia ;



Ο θάνατος αστέρων οδηγεί στην δημιουργία Λευκού Νάνου.

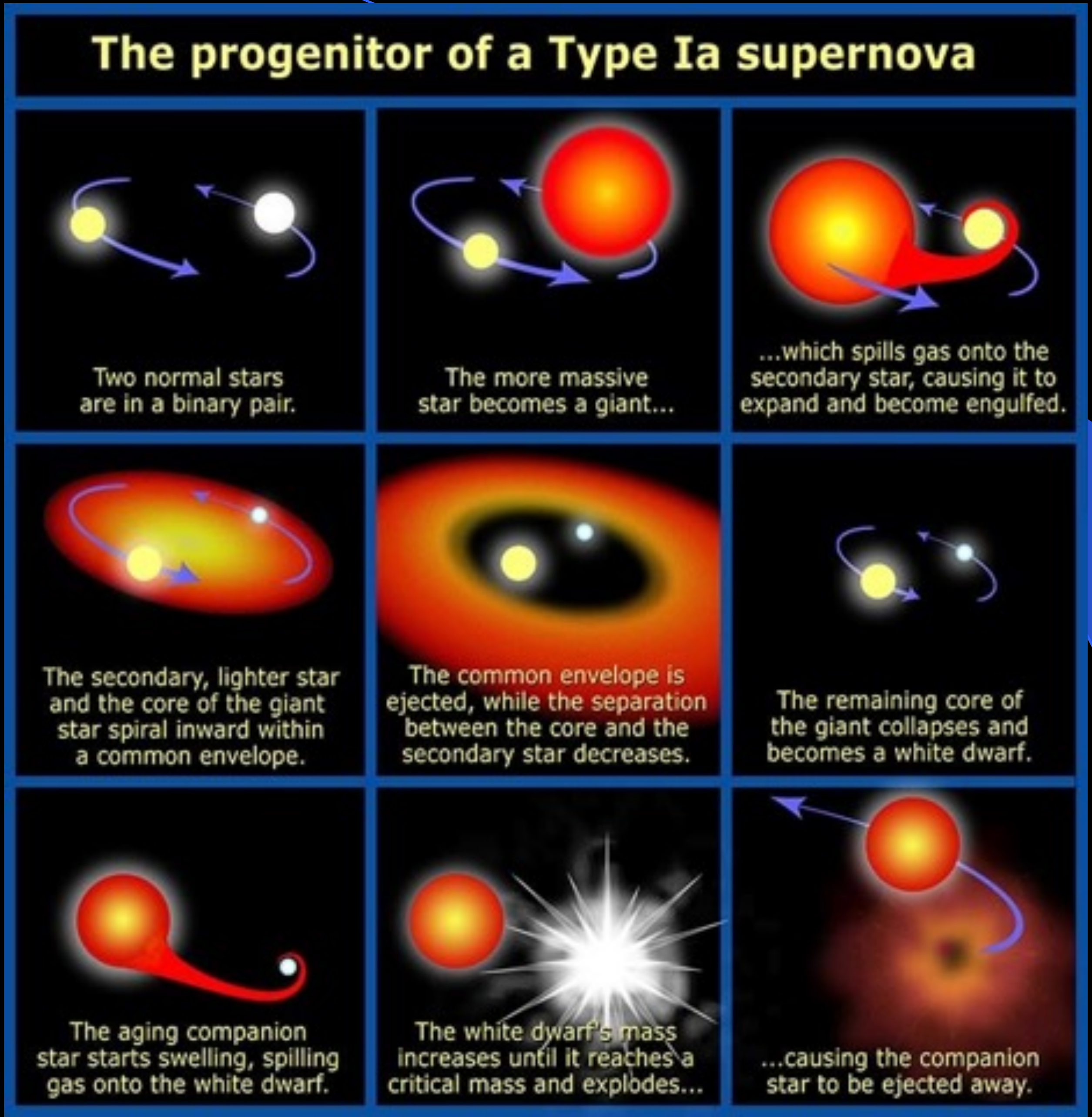


Ο λευκός νάνος (σε διπλά συστήματα αστέρων) απορροφά ύλη από συνοδό και καθίσταται ασταθής..

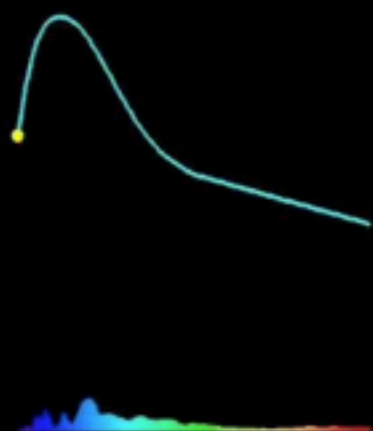


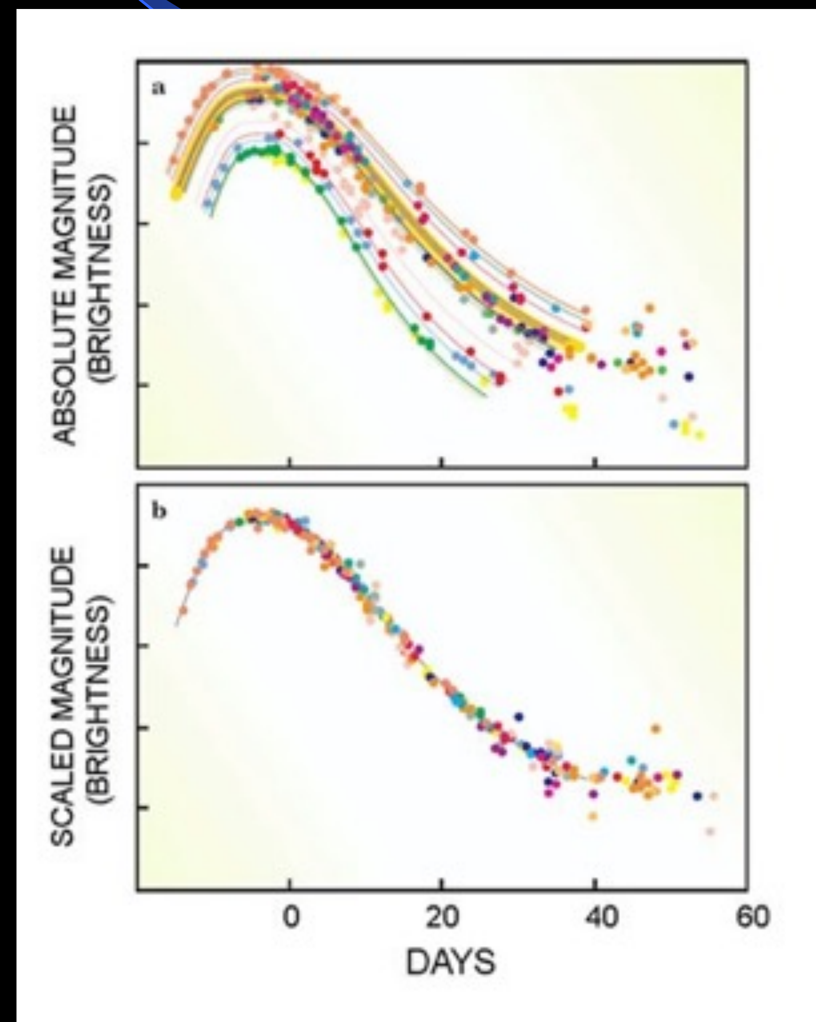
.... και εν τέλει εκρήγνυται

Type Ia supernovae (alone) make good 'standard candles'…

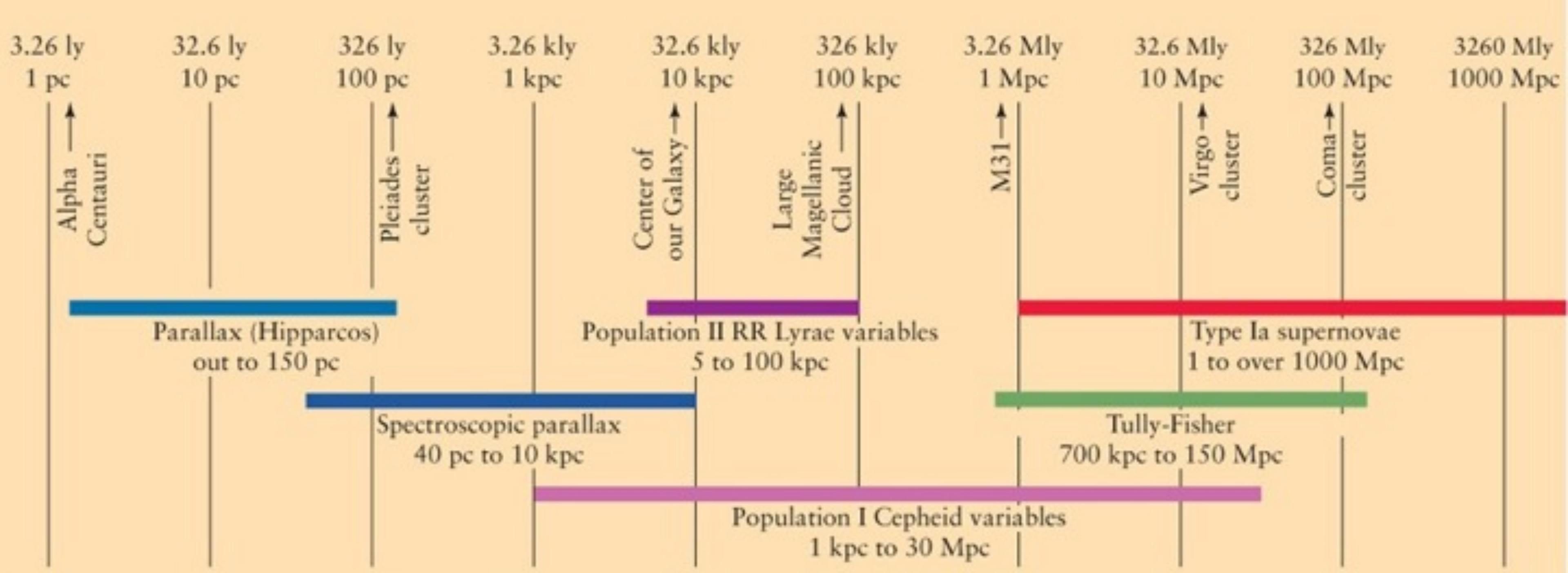


Σταθερή η λαμπρότητα του μέγιστου καμπύλης φωτός



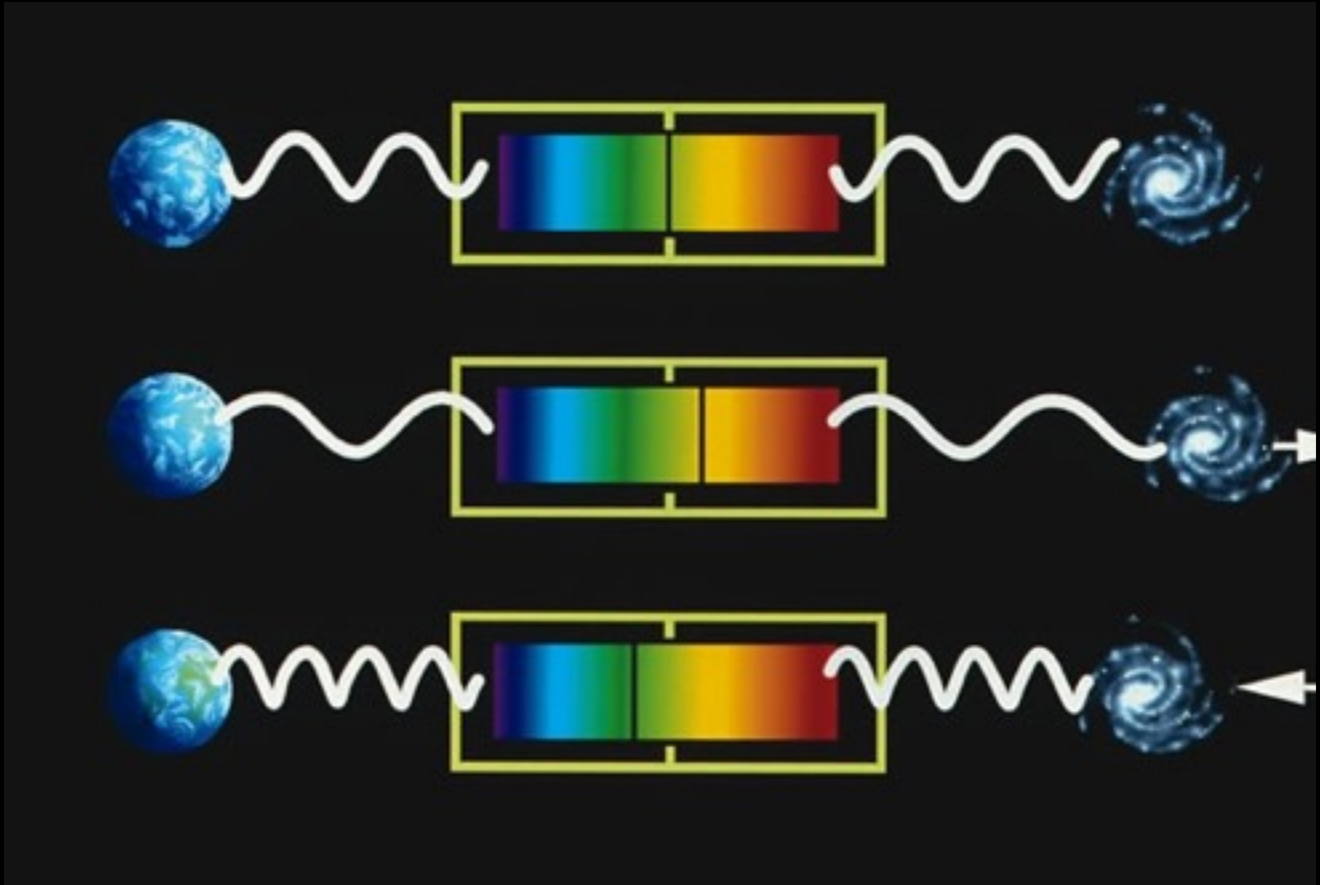


Η αλληλοσύνδεση των μεθόδων υπολογισμού κοσμικών αποστάσεων

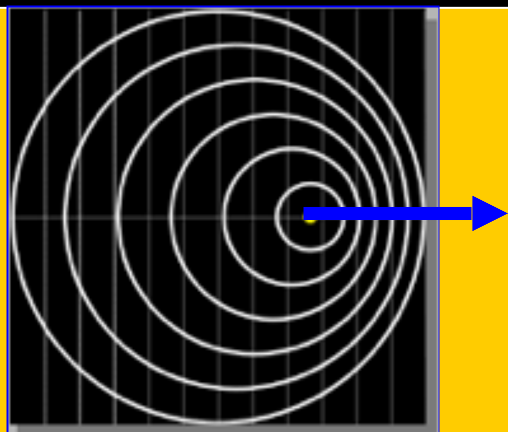


10ο Σκαλοπάτι: Η ερυθρομετάθεση μακρινών γαλαξιών

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

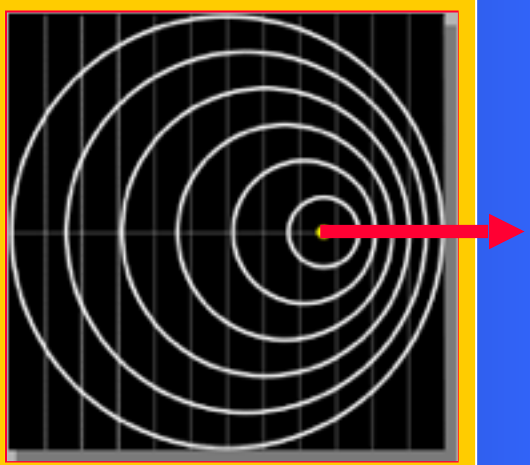


Μετατόπιση Doppler



Μήκος κύματος μικραίνει όταν πλησιάζει η πηγή

Στατικό κύμα



Μήκος κύματος μεγαλώνει όταν απόμακρύνεται η πηγή

BOX 26-2

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 λ_0 at a longer wavelength λ. 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

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

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

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

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 $H_0 = 50$ km/s/Mpc, the Hubble law gives the distance to the galaxy:

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

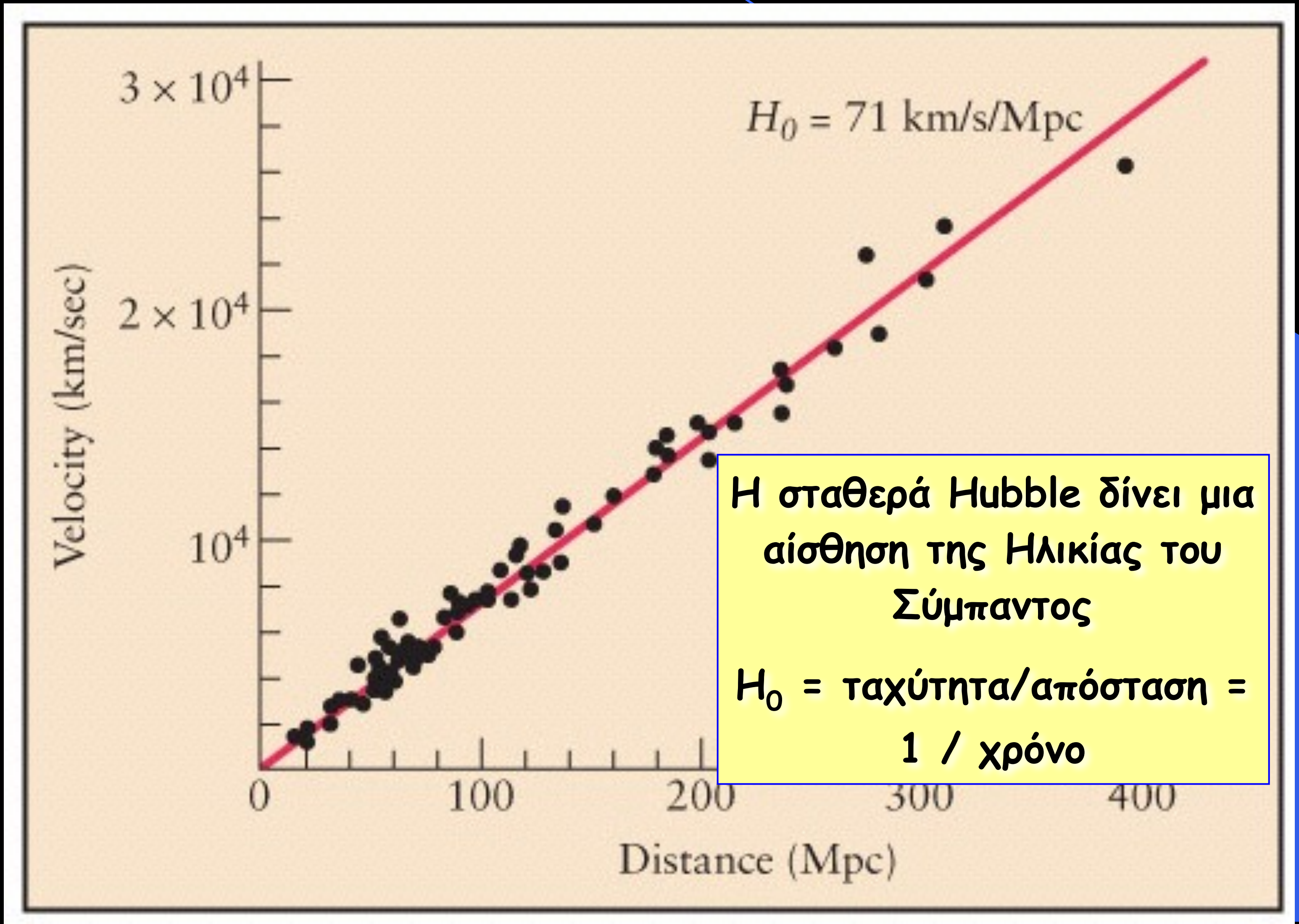
Note that if you had used $H_0 = 100$ km/s/Mpc, you would have concluded that the distance is

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

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:

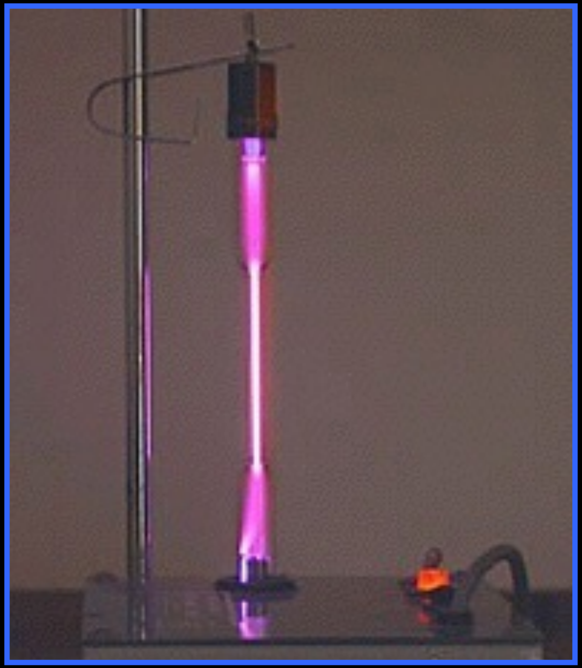
$V = H_0 \times$ απόσταση $= c\, z$



Η σταθερά Hubble δίνει μια αίσθηση της Ηλικίας του Σύμπαντος

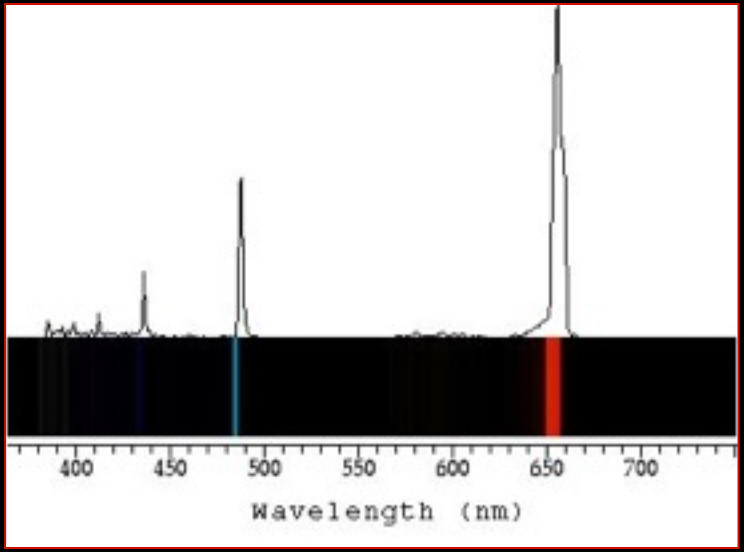
H_0 = ταχύτητα/απόσταση = 1 / χρόνο

Πως μετράμε την διαστολή του Σύμπαντος;



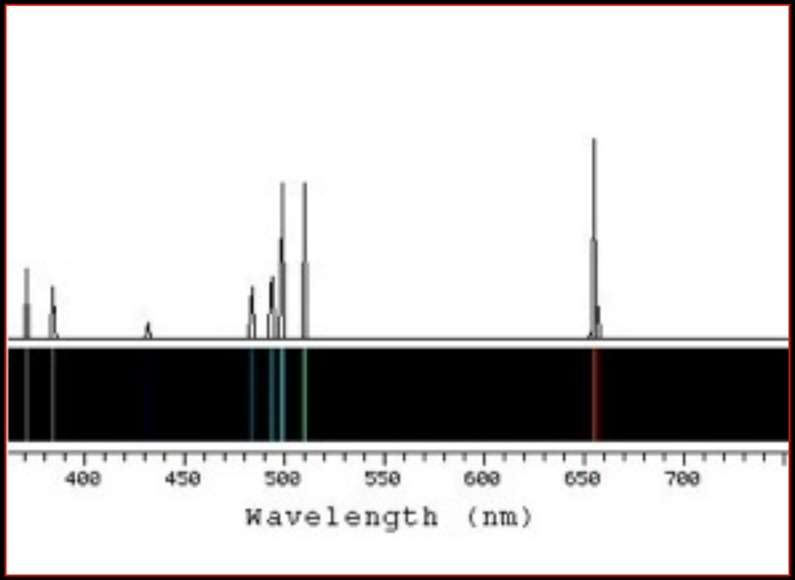
Λάμπα Υδρογόνου

Πχ. Το υδρογόνο παράγει μια χαρακτηριστική γραμμή εκπομπής

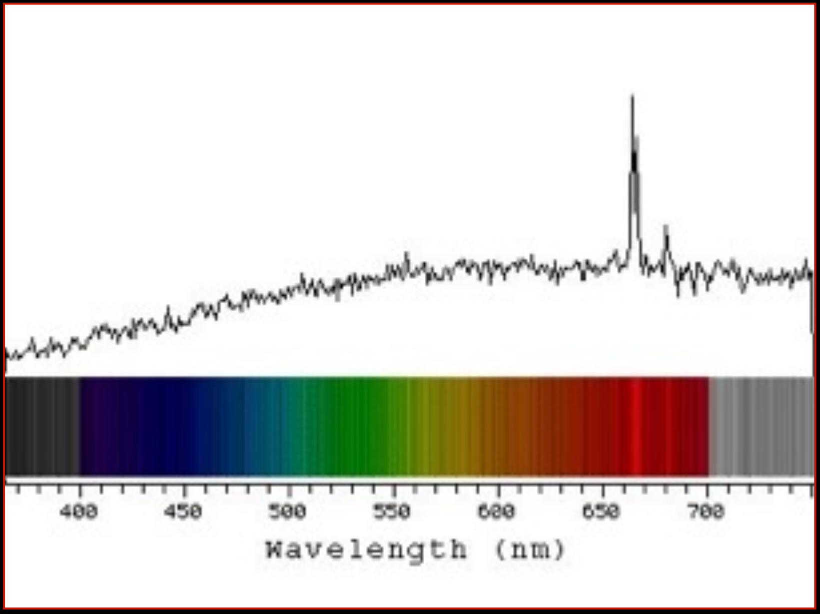


Orion Nebula

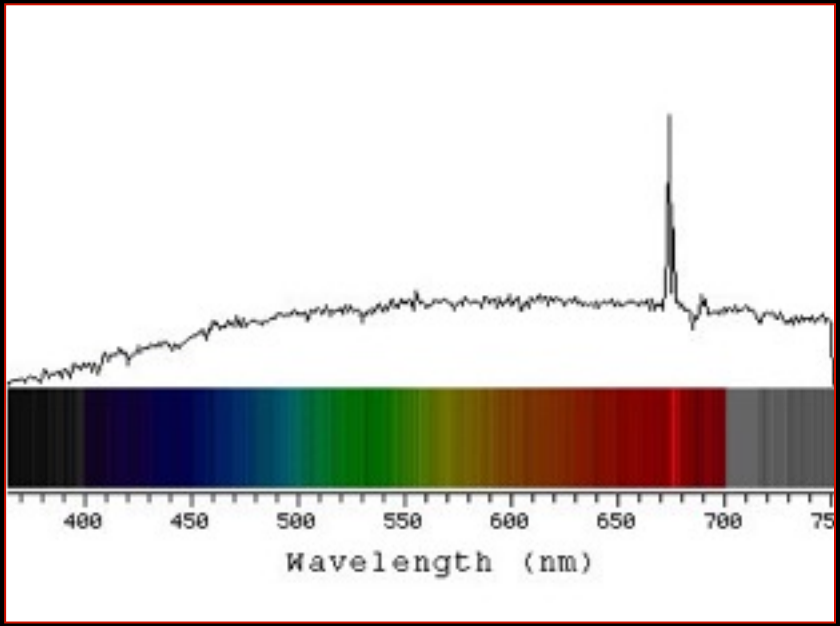
Όταν παρατηρούμε τις ίδιες γραμμές στο φάσμα ενός γαλαξία, αναγνωρίζουμε την γραμμή του Υδρογόνου.



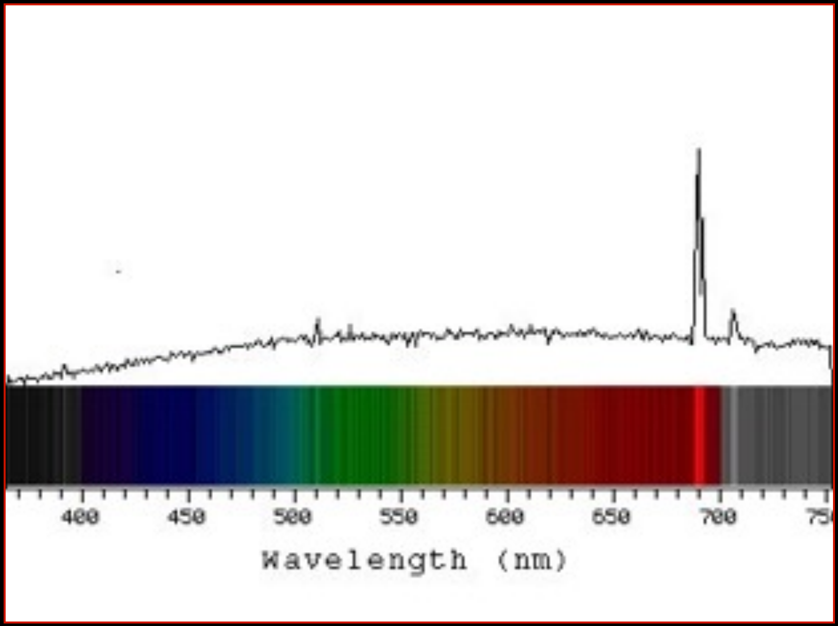
Γαλαξίας UGC 12915



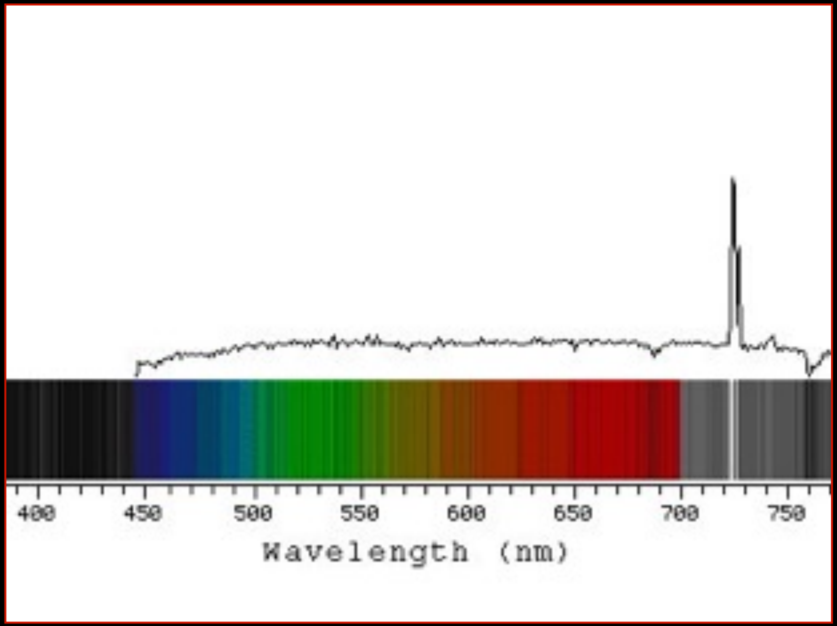
Γαλαξίας UGC 12508



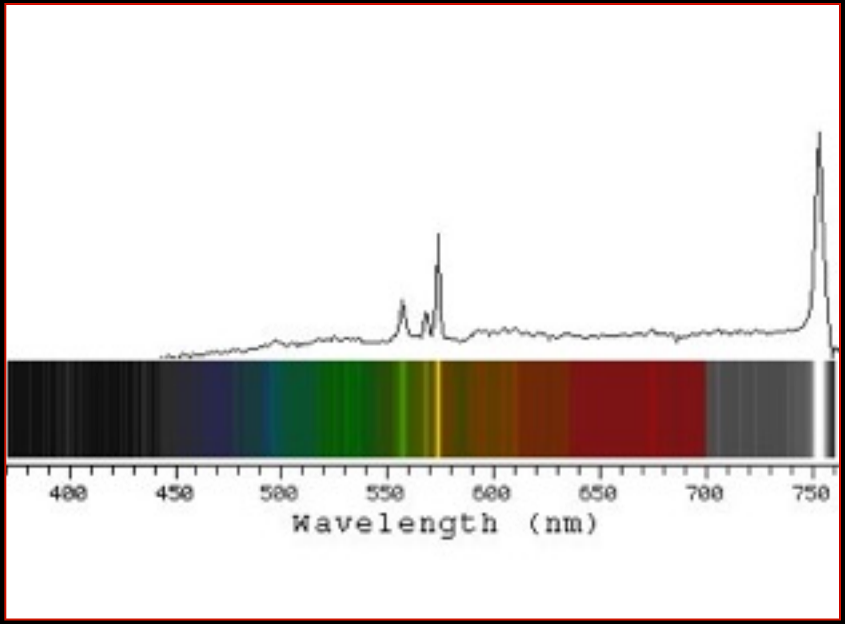
Γαλαξίας KUG 1750



Γαλαξίας KUG 1217



Γαλαξίας IRAS F09159



Τι σημαίνει ότι το Σύμπαν διαστέλλεται;

- Μήπως σημαίνει ότι βρισκόμαστε στο κέντρο του Σύμπαντος;

- ΟΧΙ ! Ο κάθε γαλαξίας απομακρύνεται από κάθε άλλο γαλαξία!!! **Κοπερνίκεια Αρχή !** Η διαστολή του Σύμπαντος δεν έχει κέντρο στον 3σ-διάστατο χώρο. Όπως αντίστοιχα το διαστελλόμενο μπαλόνι δεν έχει κέντρο στις 2 διαστάσεις.

- Διαστελλόμαστε και εμείς; Διαστέλλεται η Γη, η Σελήνη, το σπίτι μας, η γάτα μας; οι φίλοι μας; ΟΧΙ, όπως στη διαστολή ή συστολή των αερίων, τα μόρια τους μένουν ανεπηρέαστα.

ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΓΑΛΑΞΙΩΝ
αλλάζουν το νόμο του Hubble στον παρακάτω:

$$cz = H_0 r + u_{pec} \cdot r$$

Λόγω τοπικών βαρυτικών δυναμικών !!