

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of filaments and clusters of galaxies. The central region is a bright blue cluster, while the surrounding filaments are colored in shades of orange, red, and green. The background is black with numerous small white stars.

ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Εργαλεία Κατανόησης
του Σύμπαντος

Ε. Χατζηχρήστου

CERN, 25 Αυγούστου, 2010

- ✚ Εισαγωγή
- ✚ Διαστολή του Σύμπαντος - Νόμος Hubble
- ✚ Η απόσταση των Γαλαξιών
- ✚ Υπολογισμός της σταθεράς Hubble
- ✚ Υπερκαινοφανείς Ia - Κοσμολογική Σταθερά
- ✚ Κατανομή Γαλαξιών στο Σύμπαν
- ✚ Σκοτεινή Ύλη
- ✚ Καμπύλη Περιστροφής Γαλαξιών

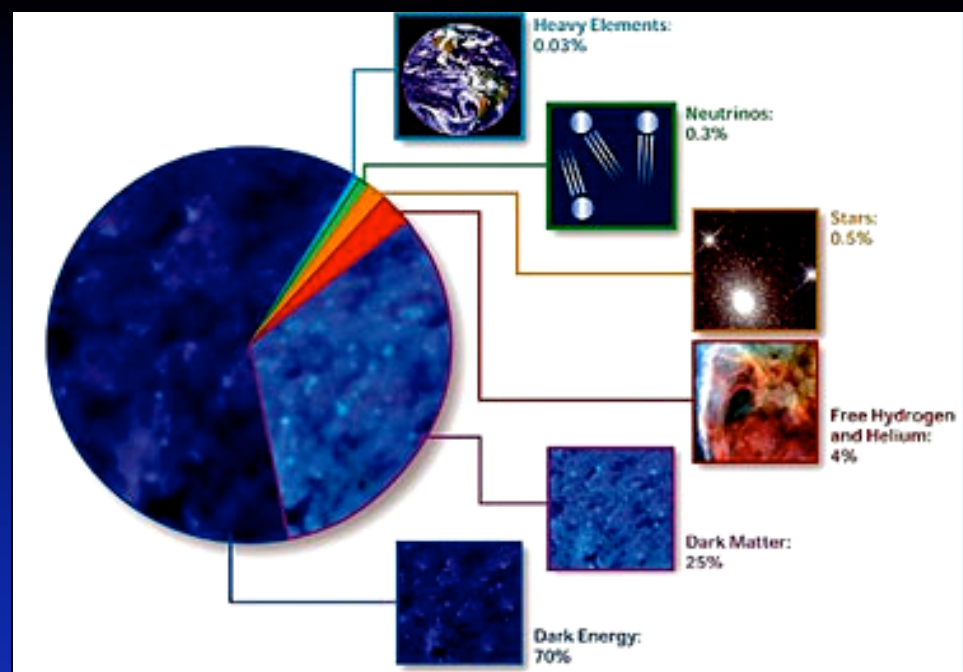
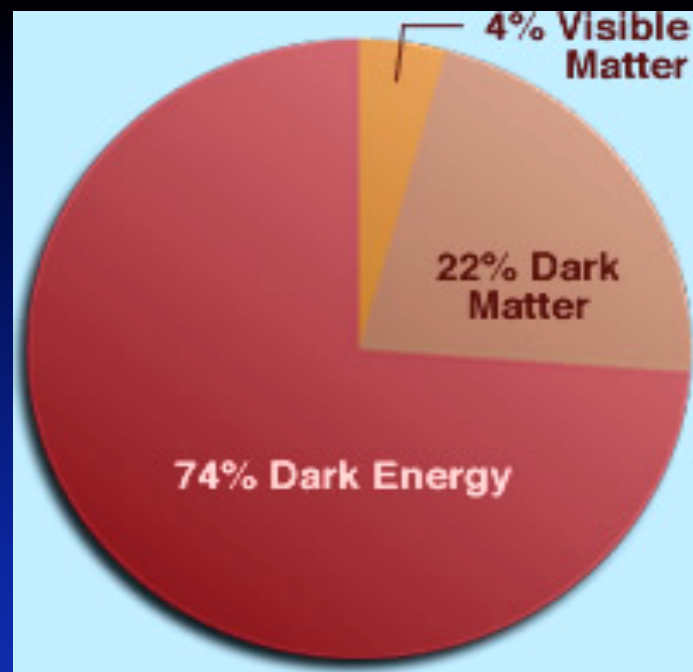
ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ-ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ:

Μελέτη της δομής και της εξέλιξης του Σύμπαντος

- 🏗️ Από τι συγκροτείται το Σύμπαν
- 🏗️ Πως δημιουργήθηκε?
- 🏗️ Ποιά είναι η εξέλιξη του?

Στις μέρες το Σύμπαν γίνεται όλο και πιο κατανοητό όσον αφορά αυτά που βλέπουμε, την **Φωτεινή Ύλη**: αστρική δημιουργία, γαλαξιακή δομή, εντυπωσιακά συμβάντα όπως οι εκρήξεις υπερκαινοφανών.

Η φωτεινή ύλη συμπυκνώνεται και δημιουργεί γαλαξίες και μικρότερες δομές -> σμήνη -> υπερσμήνη γαλαξιών (ιεραρχικά σενάρια). Οι γαλαξίες βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία, επομένως πρέπει να δημιουργήθηκαν πριν από τα σμήνη που δεν έχουν σταθεροποιηθεί.



Σκοτεινή Υλη , 22% !

Σκοτεινή Ενέργεια, 74% !

Υδρογόνο - Ηλιο, 3% ($H:He4 = 3:1$) !

Αστέρια, Γαλαξίες, Βαριά Στοιχεία, Νετρίνα ,... 1% !

Πρόσφατες παρατηρήσεις υπερκαινοφανών υποδεικνύουν ένα Σύμπαν που αποτελείται από (ως) 71.3% σκοτεινή ενέργεια και 27.4% σκοτεινής και βαρυονικής ύλης).

Σκοτεινή Ύλη:

CDM: Πρωτεύον συστατικό του Σύμπαντος: Μη ρελατιβιστικές ταχύτητες, μη βαρυονική (όχι πρωτόνια-νετρόνια), dissipationless (δεν μπορεί να κρυώσει μέσω ακτινοβολίας) αλληλεπιδρά μόνο βαρυτικά.

WIMP: υποθετικά βαρέα σωματίδια, αλληλεπιδρούν ελάχιστα με την ύλη (ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις και βαρύτητα). Δεν αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά και γι' αυτό δεν μπορούμε να τα δούμε. (μοιάζουν με τα νετρίνα αλλά είναι πολύ βαρύτερα και κινούνται αργότερα).

MACHO: (Massive Astrophysical Compact Halo Objects - μελανοί νάνοι, αστέρες νετρονίων, πλανήτες, κλπ).

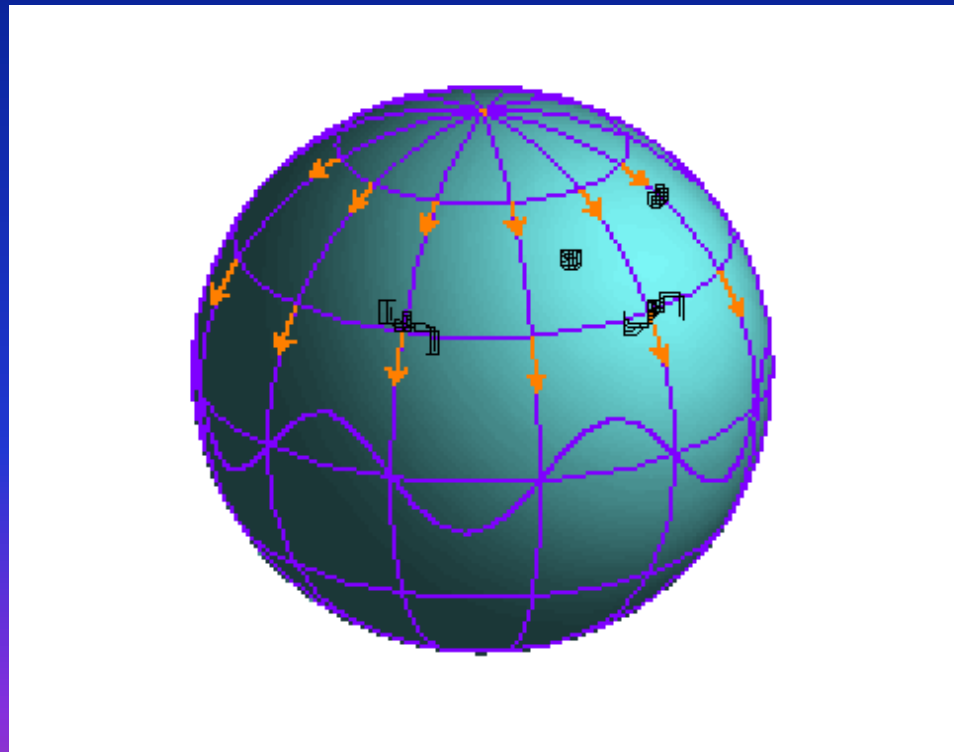
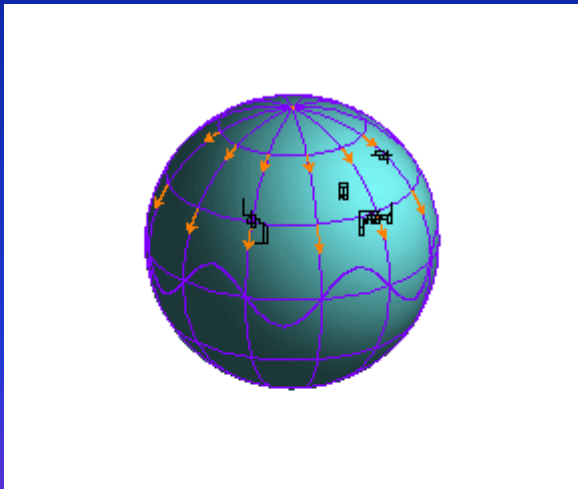
CDM προβλέπει και λίγο HDM (ο καλύτερος υποψήφιος - Νετρίνο ($m=1/5000 m_e$) κινούνται πολύ γρήγορα, αλληλεπιδρούν ελάχιστα με την ύλη.

Μονάδες Αποστάσεων

- Γήινες: Μέτρα-Χιλιόμετρα
- Ηλ. Σύστημα: 1AU ($149.6 \cdot 10^6$ Χμ)
- Γαλαξίες: 1 Έτος Φωτός ($10 \cdot 10^{12}$ Χμ)
1 Parsec (3 Ε.Φ.)
- Σύμπαν: Μετατόπιση στο Ερυθρό
Redshift $z = \Delta\lambda / \lambda_0$ $v = H \cdot d = c \cdot z$

Η Διαστολή του Σύμπαντος

Εσωτερική Ιδιότητα (μέση αύξηση της απόστασης ανάμεσα σε μακρινές δομές του Σύμπαντος στη διάρκεια του κοσμικού χρόνου). Όλα τα μήκη στη σφαίρα μεγαλώνουν, το ίδιο συμβαίνει και με τα φωτεινά μήκη κύματος (μετατόπιση στο ερυθρό, redshift) που αυξάνεται όσο πιο μακριά κοιτάμε.

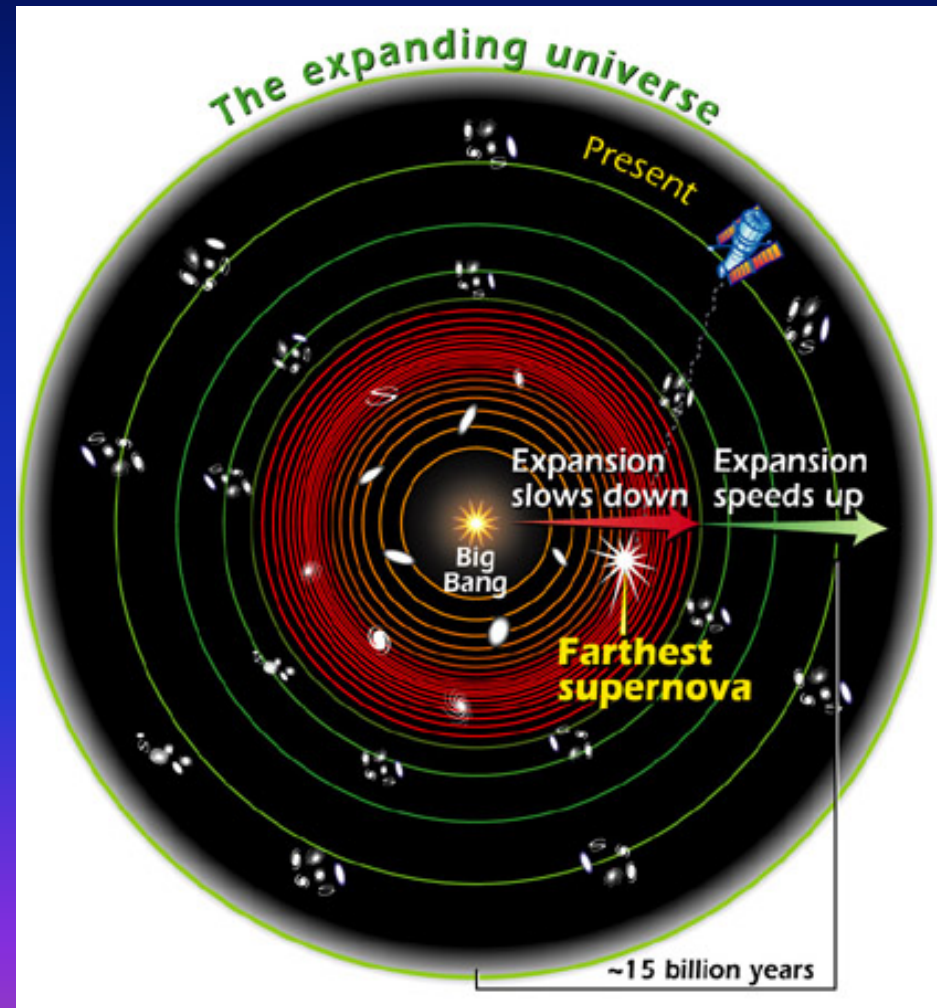


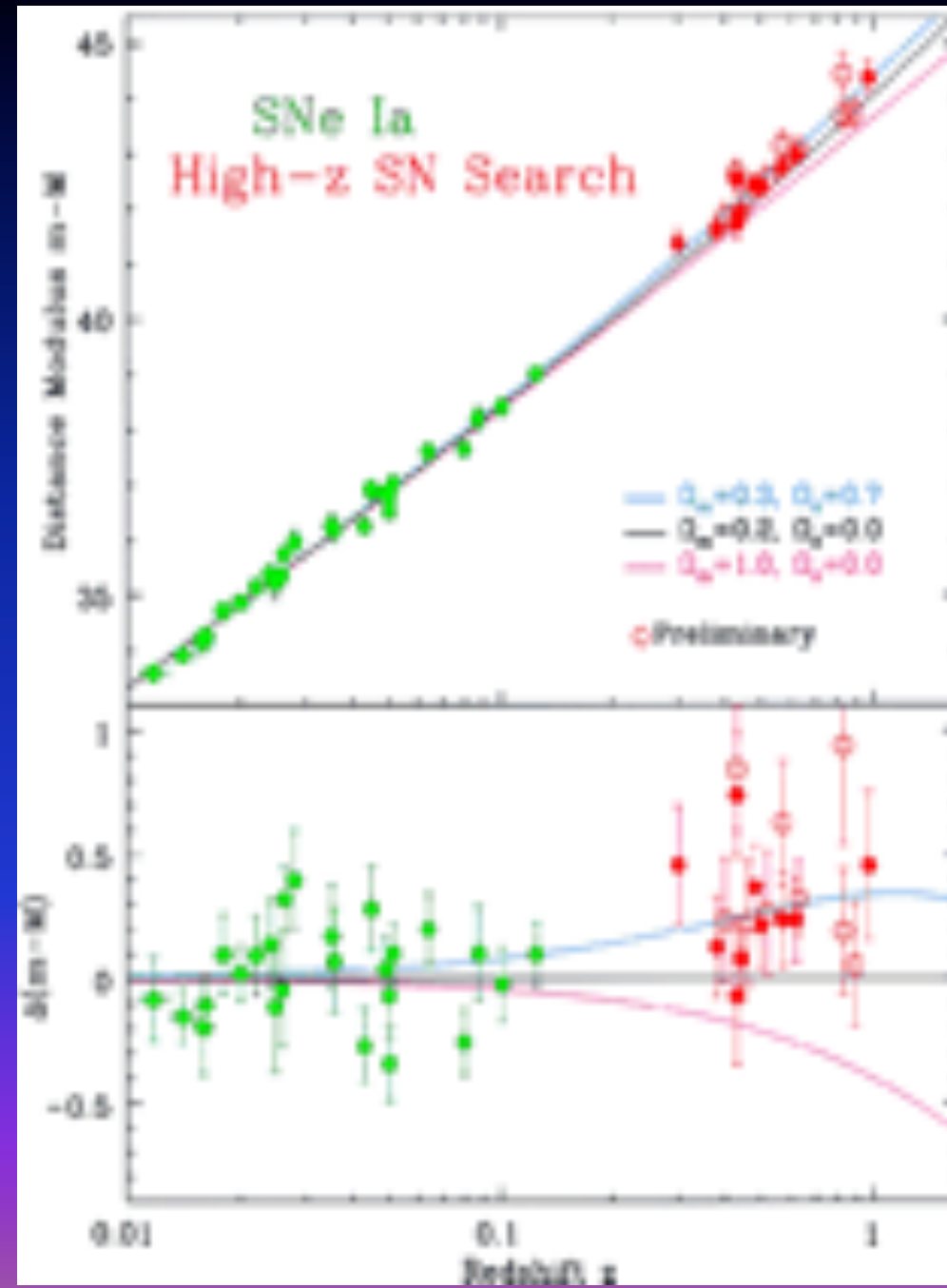
Διαστολή: Αδράνεια (λόγω της διαστολής μετά το BB) + Απωστική Δύναμη στο Σύμπαν (Σκοτεινή Ενέργεια - Κοσμολογική Σταθερά Λ).
ΑΔ επικρατούσε στο νεαρό Σύμπαν, ΑΔ και ΣΕ συνεισφέρουν ισότιμα σήμερα, ΣΕ θα επικρατεί στο μέλλον.

ΣΕ ενυπάρχει στο άδειο διάστημα και επιταχύνει το Σύμπαν σήμερα.

Λ CDM - $\Omega_\Lambda=0.7$ το ποσοστό της ολικής πυκνότητας μάζας-ενέργειας του Σύμπαντος που οφείλεται στη ΣΕ (73% της πυκνότητας ενέργειας στο σημερινό Σύμπαν).

Παρατηρήσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia έδειξαν το 1998 ότι η διαστολή του Σύμπαντος είναι επιταχυνόμενη.





Η διαστολή του Σύμπαντος επιβεβαιώνει την **Θεωρία Πληθωρισμού**, σύμφωνα με την οποία το νεογέννητο Σύμπαν διεστάλη εκθετικά χάρη σε μια αρνητική ενέργεια κενού (θετική πίεση κενού).

Η διαστολή με ένα παράγοντα $\sim 10^{78}$ σε όγκο. Διήρκεσε από 10^{-36} s μετά το BB ως $10^{-33} - 10^{-32}$ s. Από τότε το Σύμπαν συνεχίζει να διαστέλλεται.

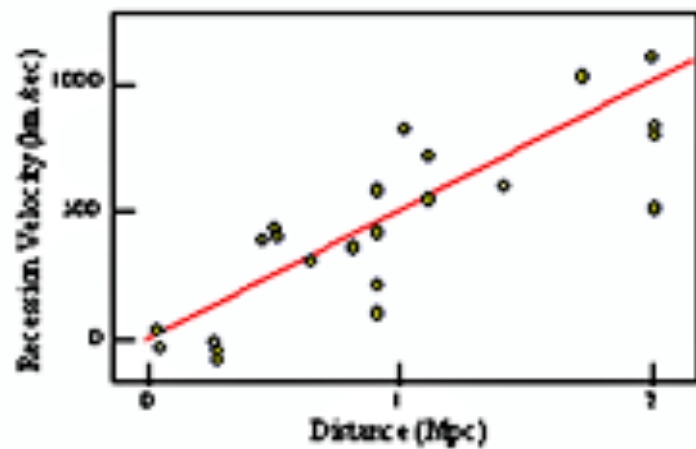
Έτσι εξηγείται η causal connection, και το γεγονός ότι το Σύμπαν φαίνεται επίπεδο, ομογενές και ισότροπο. Επίσης οι δομές μεγάλης κλίμακας (LSS) του Σύμπαντος (κβαντικές διακυμάνσεις στην αρχική μικρή περιοχή μεγιστοποιήθηκαν σε κοσμικές αποστάσεις).

Η ανακάλυψη της Διαστολής του Σύμπαντος από τον Hubble (1929)

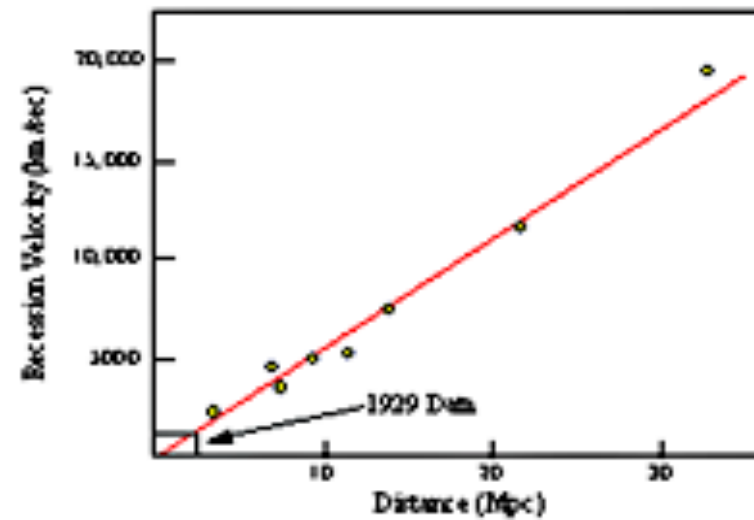
- Σπειροειδή «νεφελώματα» έχουν φάσματα μετατοπισμένα στο ερυθρό
- Οι Hubble και Humason διεξάγουν ποσοτικές μετρήσεις
- Ο Hubble δείχνει ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης είναι ανάλογη της απόστασής τους

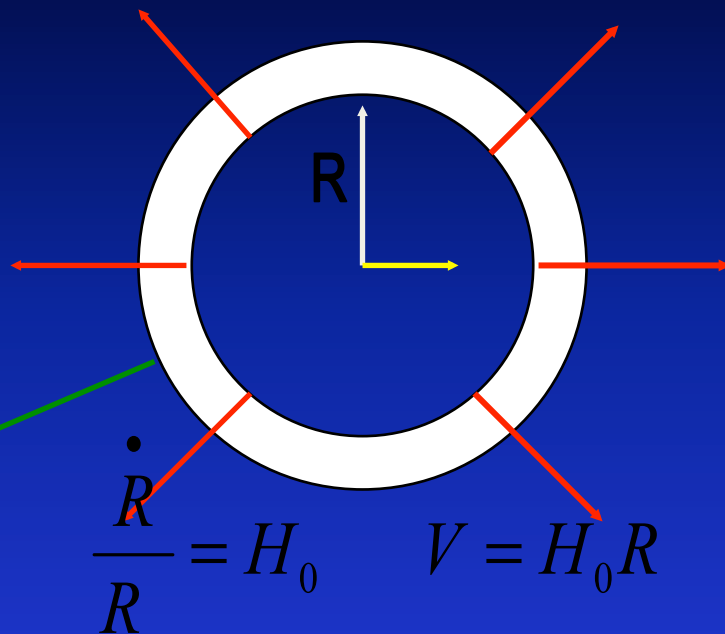


Hubble's Data (1929)

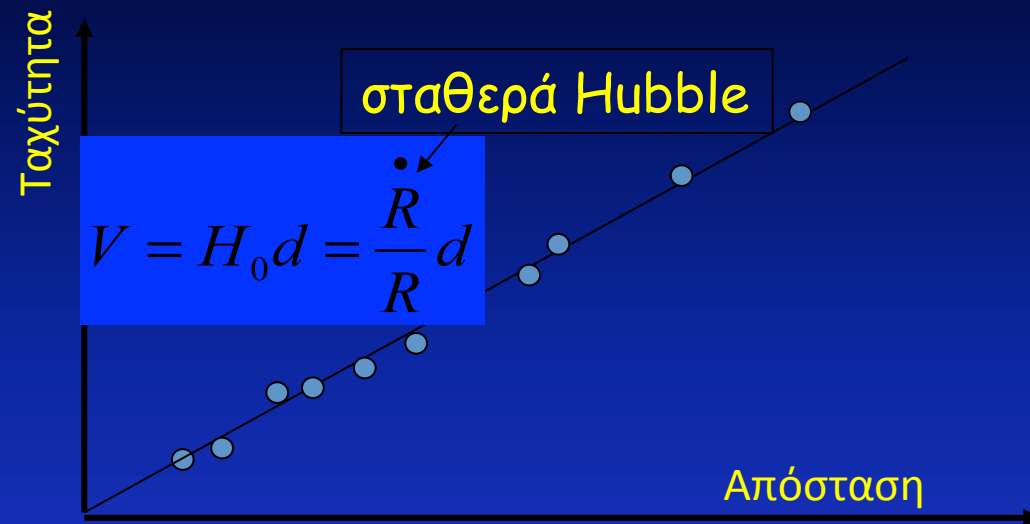


Hubble & Humason (1931)



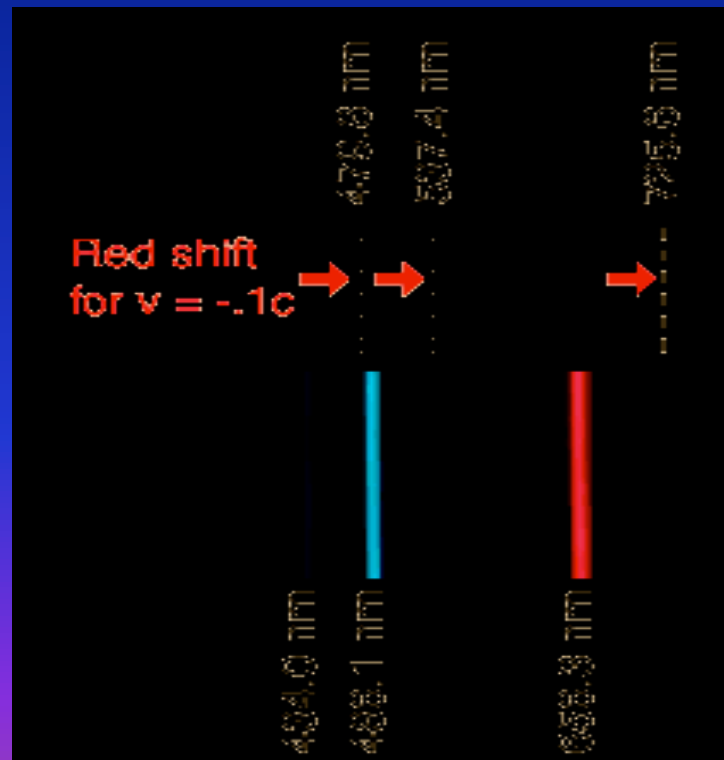
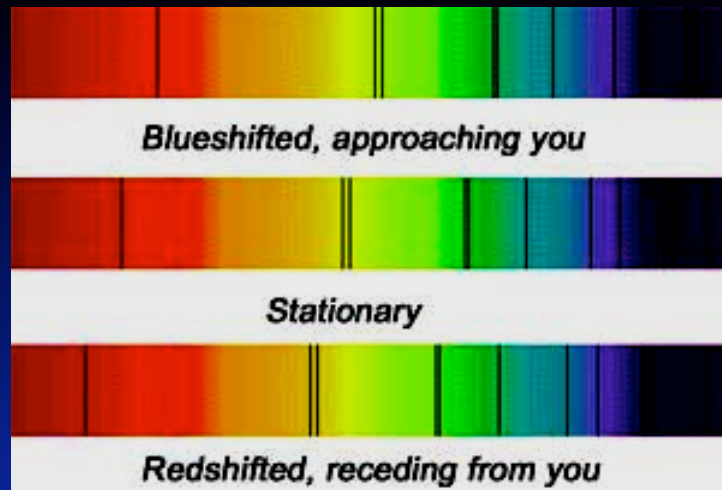


Ένα κομμάτι του Σύμπαντος με ακτίνα $R(t)$ διαστέλλεται με ταχύτητα ανάλογη της απόστασης R .

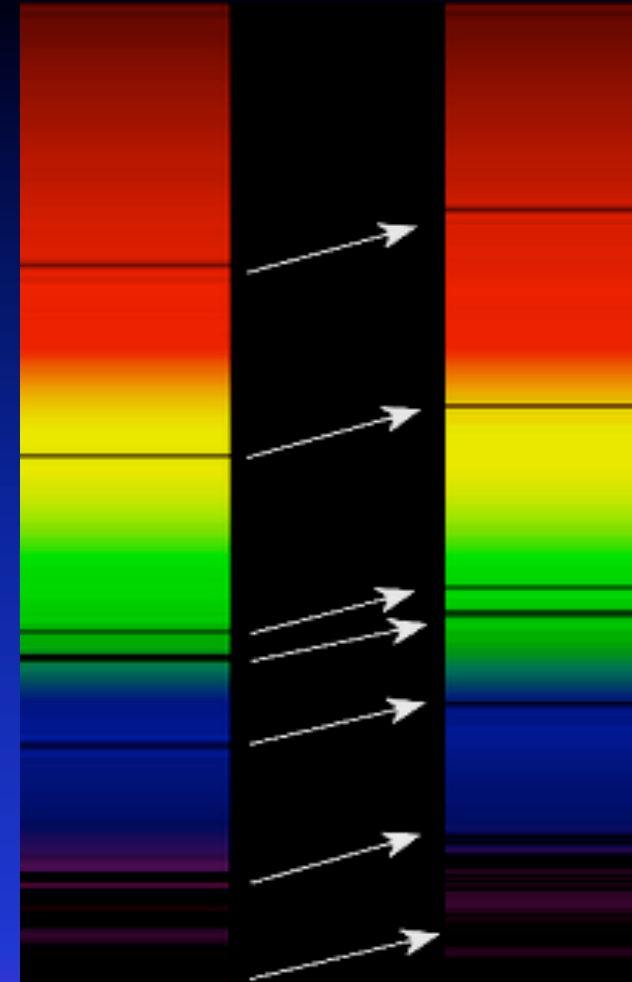


Η σταθερά του Hubble εκφράζει το ρυθμό διαστολής του Σύμπαντος.

Redshift $z = \Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$ $d = cz/H_0$



Οπτικό φάσμα του Ηλίου

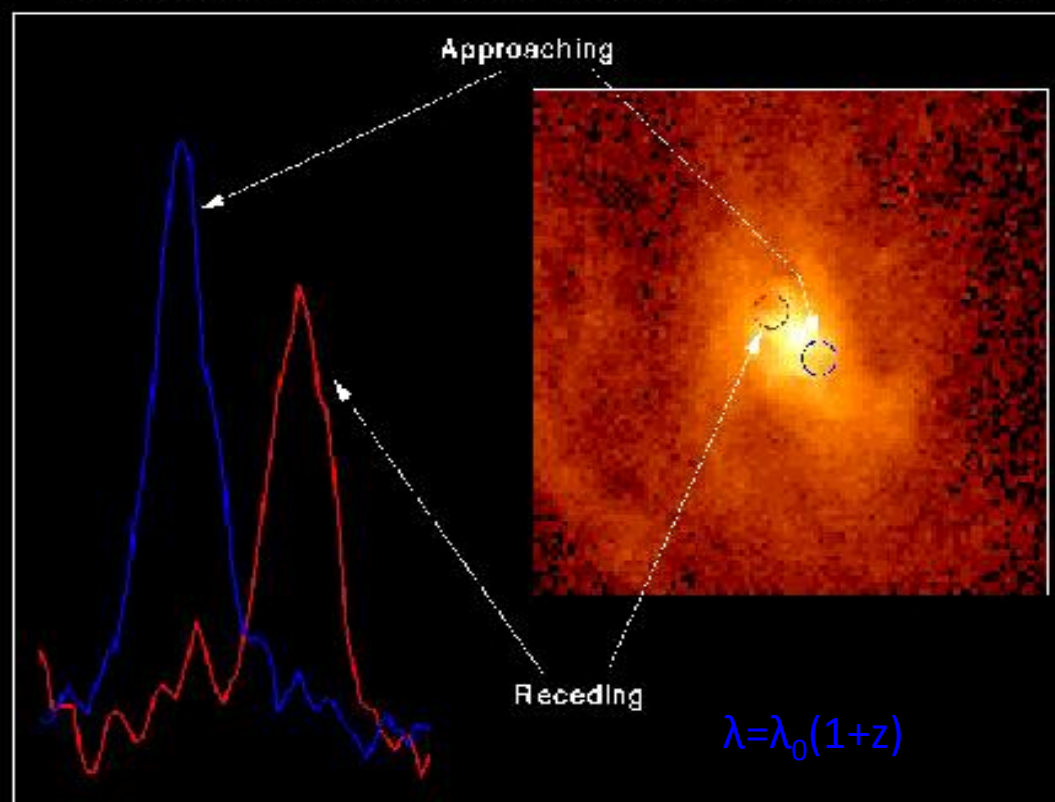


Οπτικό φάσμα Γαλαξία

$$V_G = c Z$$

Φαινόμενο Doppler

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



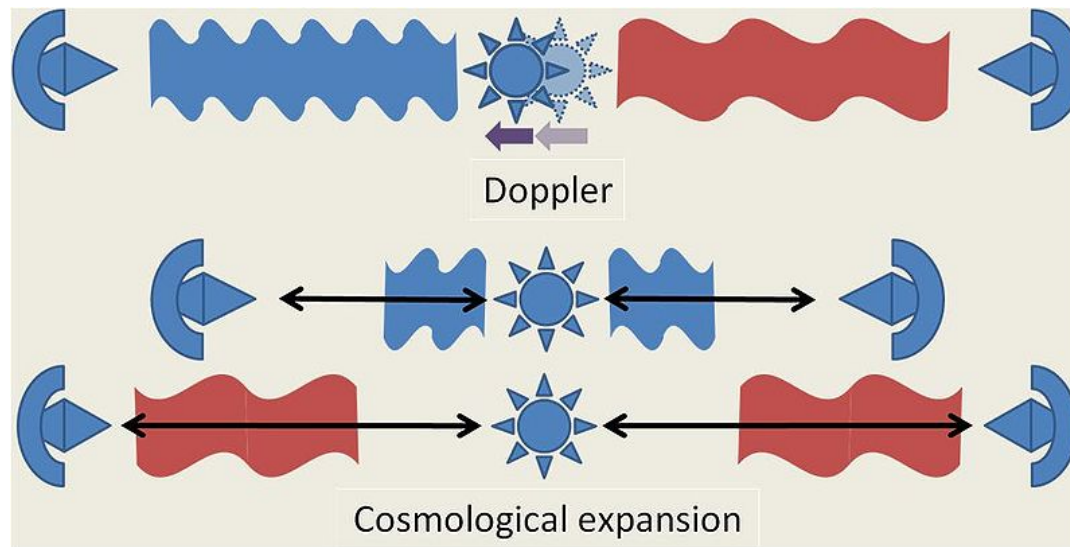
Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph



Αν $v \ll c$ $z = \Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$ Στο κλασσικό φαινόμενο Doppler η συχνότητα της πηγής δεν αλλάζει, απλά εμείς λαμβάνουμε ακτινοβολία μικρότερης συχνότητας.

Για αντικείμενα που κινούνται με ταχύτητα κοντά σε εκείνη του φωτός θα πρέπει να συμπεριλάβουμε διόρθωση για τα αποτελέσματα της ειδικής σχετικότητας με τη βοήθεια του Lorentz factor γ :

$$1 + z = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \gamma \quad 1 + z = \frac{1 + v \cos(\theta)/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad 1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

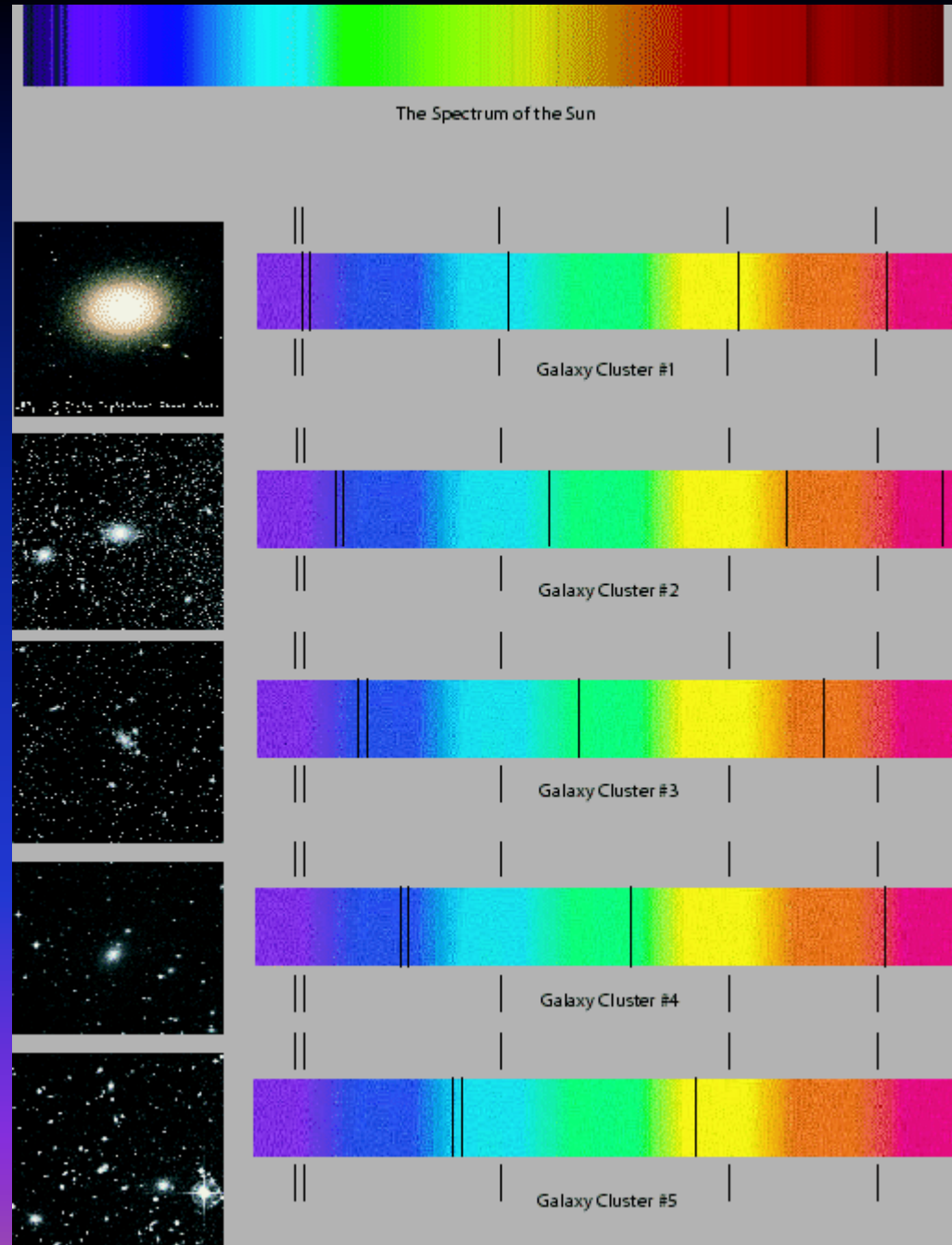


Οι Γαλαξίες απομακρύνονται με διαφορετική ταχύτητα ο καθένας !

$$V_G = C Z$$

Όσο πιο μεγάλη η μετατόπιση στο ερυθρό **z** τόσο πιο γρήγορα απομακρύνονται και τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τους (νόμος Hubble)

$$V_G = H_0 d_L$$



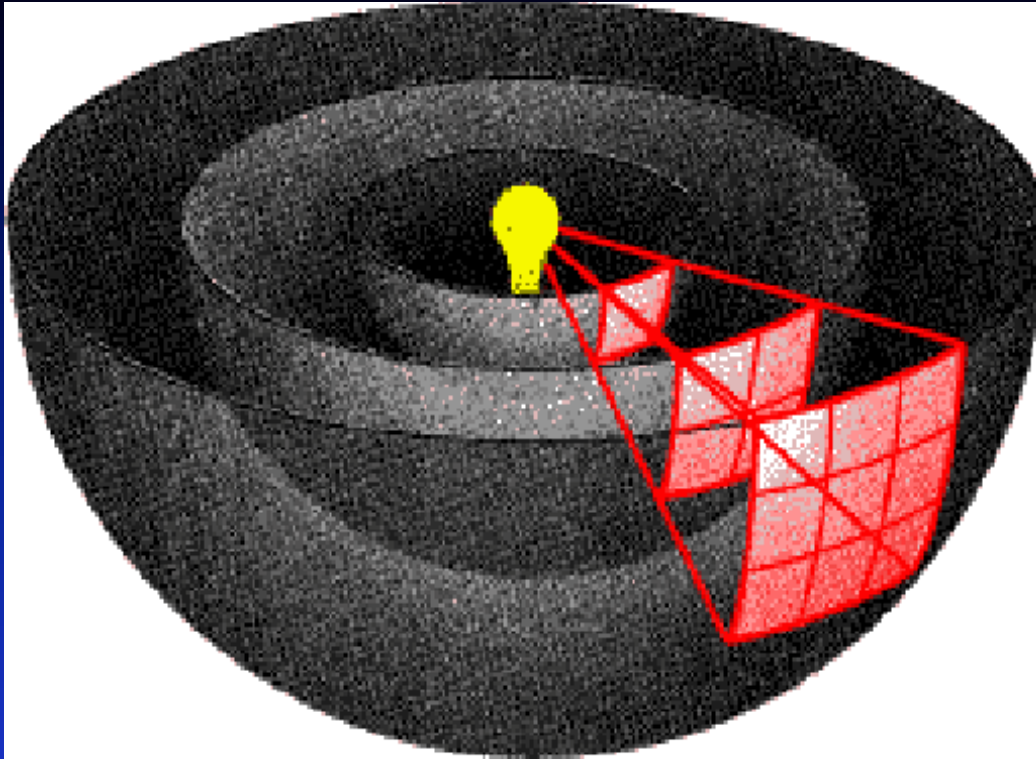
Είναι φανερό ότι η διαστολή του Σύμπαντος μπορεί να γίνεται με ταχύτητα $>c$. $H_0 = 71 \text{ Km/s/Mpc} = 0.007\%/\text{million years}$ (επομένως όταν μιλάμε για αποστάσεις γαλαξιών εννοούμε τωρινές αποστάσεις) ή για κάθε Mpc απόστασης ανάμεσα σε δύο γαλαξίες, η μεταξύ τους ταχύτητα απομάκρυνσης αυξάνει κατά 71 km/s . Πόσο μακριά πρέπει να βρίσκονται δύο γαλαξίες ώστε η μεταξύ τους ταχύτητα απομάκρυνσης να γίνει μεγαλύτερη από $c \Rightarrow 4,200 \text{ Mpc}$ ($13 \times 10^{19} \text{ Km}$)! Αυτό αντιστοιχεί σε $z=1.4$ (4.6 δισεκατομμύρια χρόνια μετά το BB).

Κάποιοι λένε ότι ανακάλυψαν γαλαξίες με $z=9-10$ (460 εκατομμύρια χρόνια μετά το BB) αλλά τα αποτελέσματα δεν έχουν επιβεβαιωθεί. Κάτοχος ρεκόρ ως τώρα: 6.96 (750 εκατομμύρια χρόνια μετά το BB). Όταν αυτά τα αντικείμενα εξέπεμψαν φως είχαν ταχύτητα $<c$ επομένως παραμένουν στο ορατό σε μας Σύμπαν.

Q: Σε τι απόσταση βρίσκονται οι Γαλαξίες ?

A: Η λαμπρότητα τους που μετράμε από τα τηλεσκόπια καθορίζει την απόσταση τους ! Όσο πιο ασθενικό είναι το φως τόσο πιο μακριά βρίσκονται !





$$d_L = 1 / \sqrt{L}$$



2-πλάσια απόσταση 4 φορές πίο ασθενές το φώς που παρατηρούμε

3-πλάσια απόσταση 9 φορές πίο ασθενές το φώς που παρατηρούμε

....

Το τετράγωνο της απόστασης είναι αντιστρόφως ανάλογο της λαμπρότητας που μετράμε !

Η Μέτρηση των Αστρονομικών Αποστάσεων

Για μικρές αποστάσεις βασιζόμαστε στην παράλλαξη

Για μεγάλες αποστάσεις (>3000 ε. φ.) στην λαμπρότητα



Luminosity=L

$$\text{brightness} = \frac{\text{luminosity}}{\text{area}} = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$\therefore$

$$d_L = D = \sqrt{\frac{L}{4\pi b}}$$

Κάποια αστρονομικά αντικείμενα είναι εξαιρετικοί δείκτες κοσμολογικών αποστάσεων: **standard candles** επομένως, σε συνδυασμό με το z , επιτρέπουν να δούμε την ιστορία της διαστολής του Σύμπαντος $d=cz/H_0$

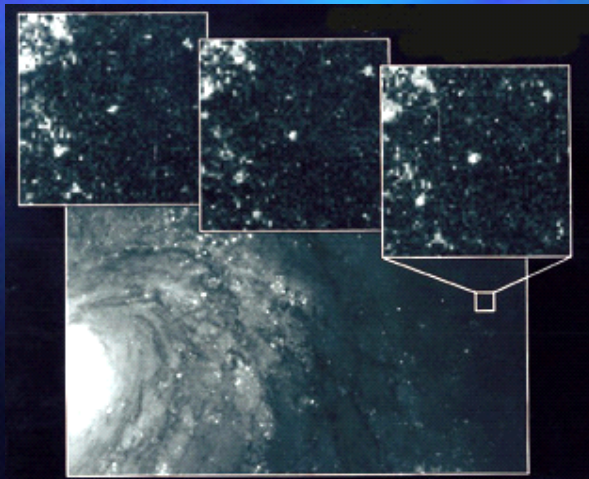
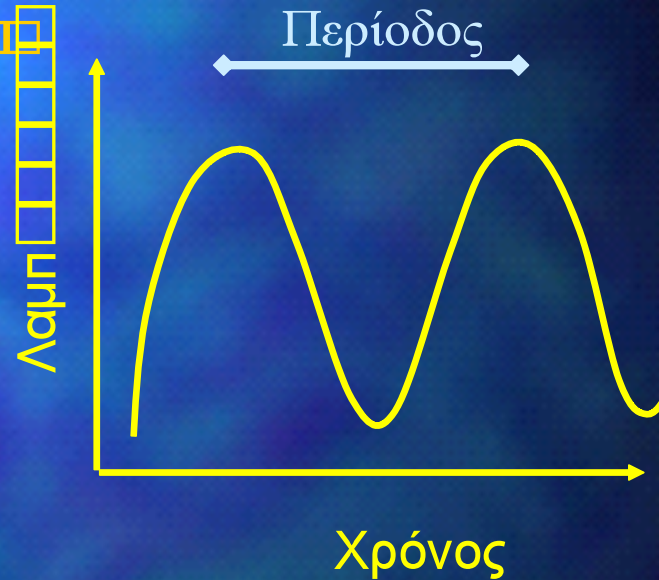
Standard Candles έχουν σταθερή λαμπρότητα (απόλυτο μέγεθος), επομένως μετρώντας τη φωτεινότητα (φαινόμενο μέγεθος) μπορούμε να υπολογίσουμε την απόστασή τους.

$$D = \sqrt{L / 4\pi b} \quad b (W/m^2)$$

- Μεταβλητοί Κηφείδες (Cepheid Variables)
- Υπερκαινοφανείς (Type Ia Supernovae): Είναι τα λαμπρότερα και σταθερότερης λαμπρότητας standard candles στο Σύμπαν.

Cepheid Variable Stars: Key to Extragalactic Distances

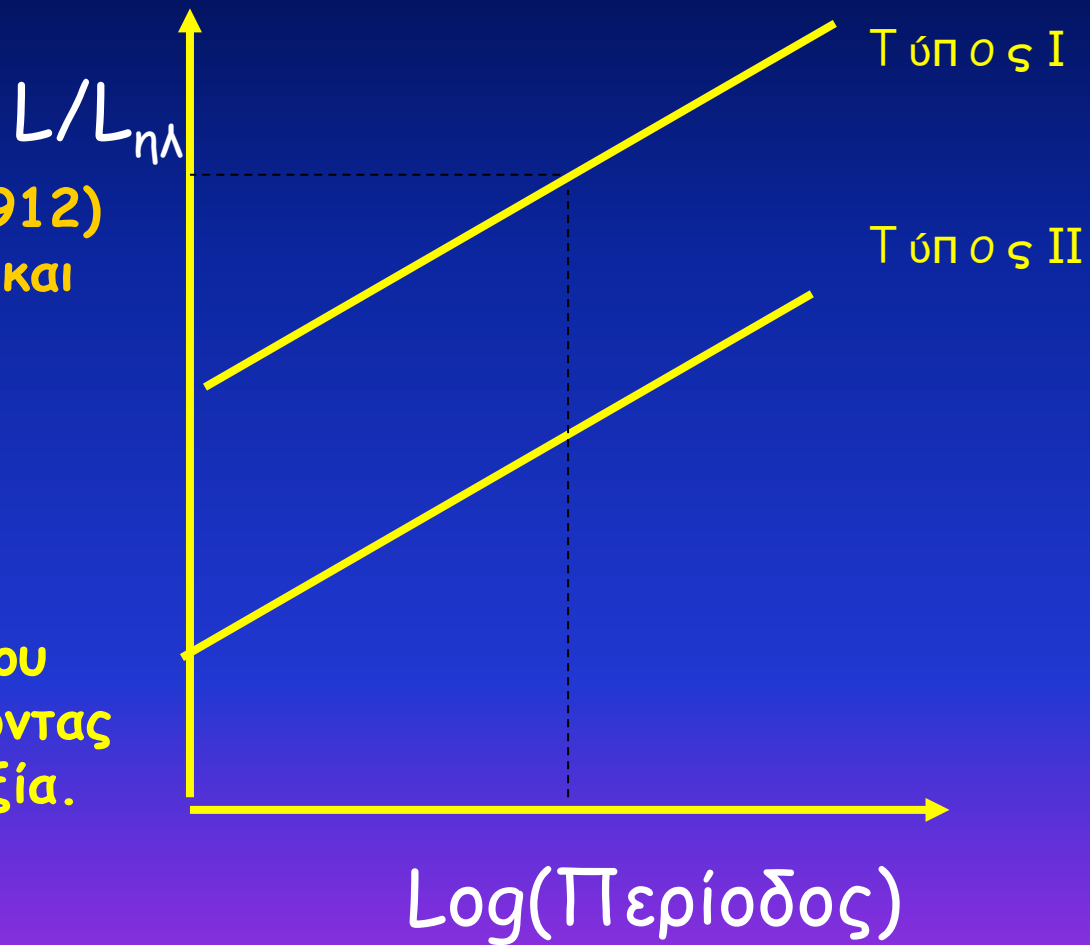
Η λαμπρότητα των Κηφειδών
μεταβάλλεται λόγω αναπλάσεων
της ατμόσφαιράς τους



Η σχέση Περιόδου-Λαμπρότητας των Κηφείδων

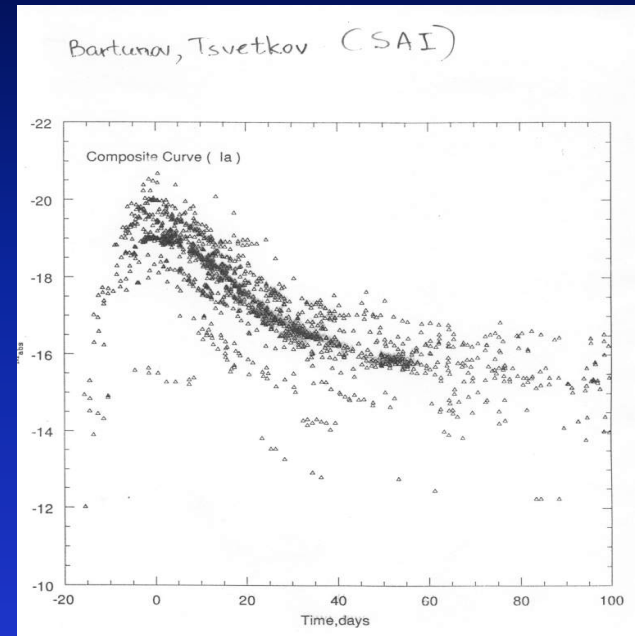
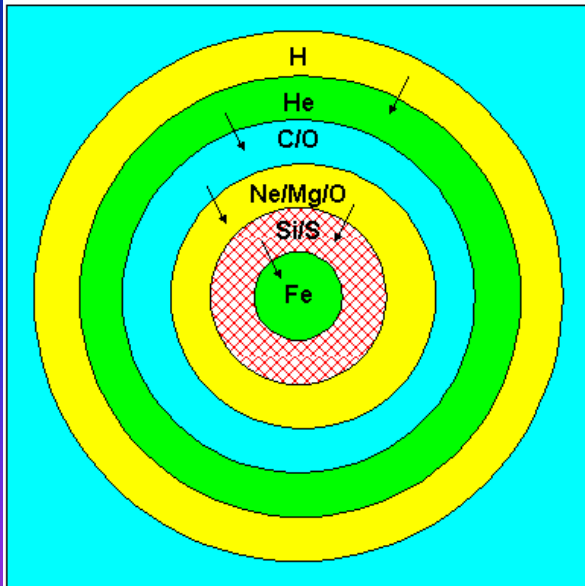
Η Henrietta Leavitt (1912) ανακάλυψε ότι περίοδος και λαμπρότητα συνδέονται

Ο Edwin Hubble (1921) παρατήρησε ένα Κηφείδα στην Ανδρομέδα και μέτρησε την απόστασή του (800 000εφ) αποδεικνύοντας ότι ανήκει σε άλλο γαλαξία.



Υπερκαινοφανείς Τύπου Ia

Για τη μέτρηση αποστάσεων
μεγαλύτερων απο το τοπικό
σμήνος γαλαξιών (20 Mpc)



Υπερκαινοφανείς Ia
Μέγιστο απόλυτο μέγεθος $M_B = -19.6$
Μέτρηση αποστάσεων μέχρι 1000 Mpc

Οι υπερκαινοφανείς τύπου Ia έχουν σταθερή μέγιστη λαμπρότητα:
 $L = (1,4 \pm 0,4) * 10^{36} \text{ Watts}$ ή $M_v = -19.3$ (5 δισ. φορές L_o).

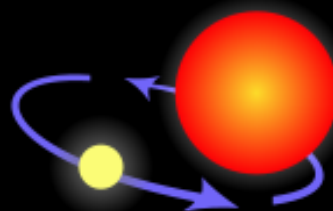
Λευκοί νάνοι (τέλειωσαν τη ζωή τους στην ΚΑ αφού έπαψαν οι
θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό τους) , με μικρή ταχύτητα
περιστροφής και μάζα $< 1.38 M_o$ (Chandrasekhar limit).

Εάν επαυξήσουν τη μάζα τους από κάποιο συνοδό άστρο θα αρχίσει να
καταρρέει βαρυτικά αυξάνοντας την θερμοκρασία στο κέντρο του,
οπότε θα αρχίσει η καύση C στον πυρήνα του, ενώ τα εξωτερικά του
στρώματα θα εκτιναχθούν στο διάστημα (κρουστικό κύμα 5-20,000
km/s) εκπέμποντας ενέργεια της τάξης των $1-2 \times 10^{44} \text{ joules}$
(υπερκαινοφανής). Η σταθερότητα της μάζας των λ.ν. και του
μηχανισμού έκρηξης, έχει ως αποτέλεσμα τη σταθερότητα της μέγιστης
λαμπρότητας των υπερκαινοφανών Ia.

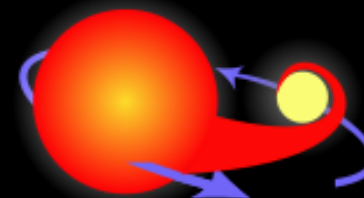
The progenitor of a Type Ia supernova



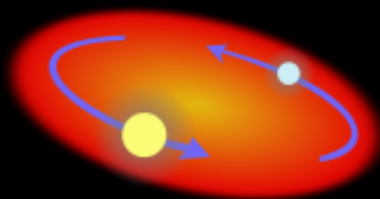
Two normal stars are in a binary pair.



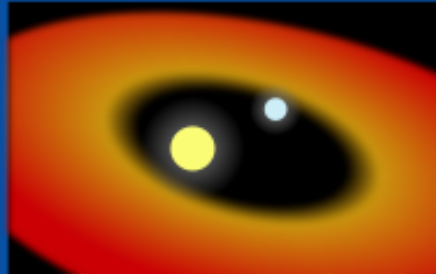
The more massive star becomes a giant...



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



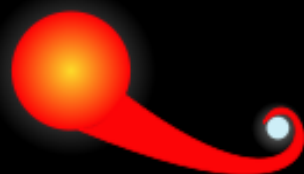
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral toward within a common envelope.



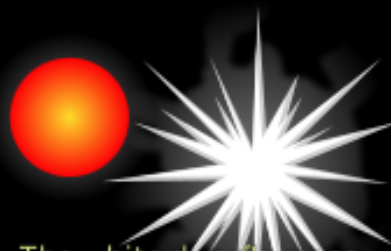
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



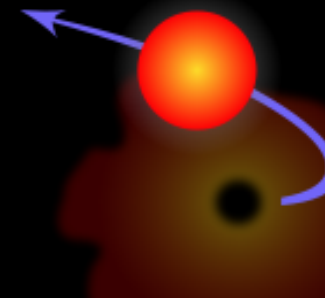
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



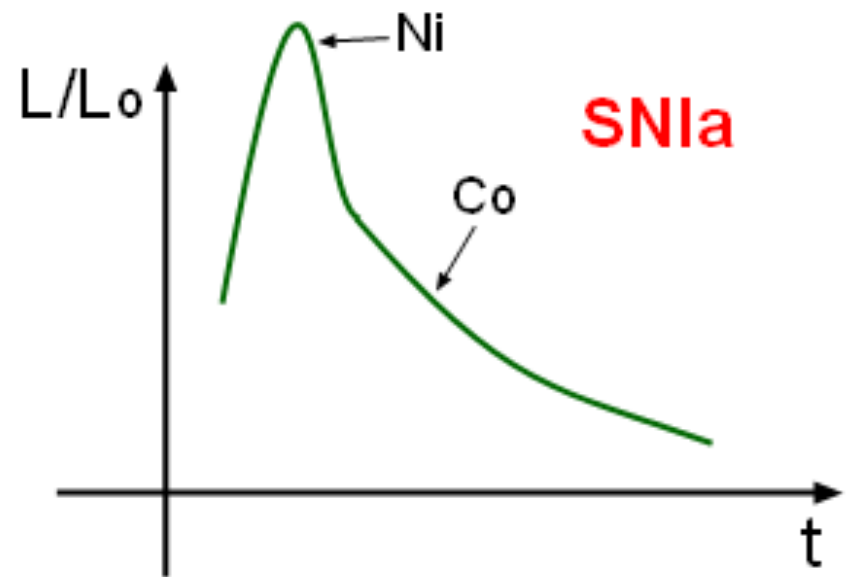
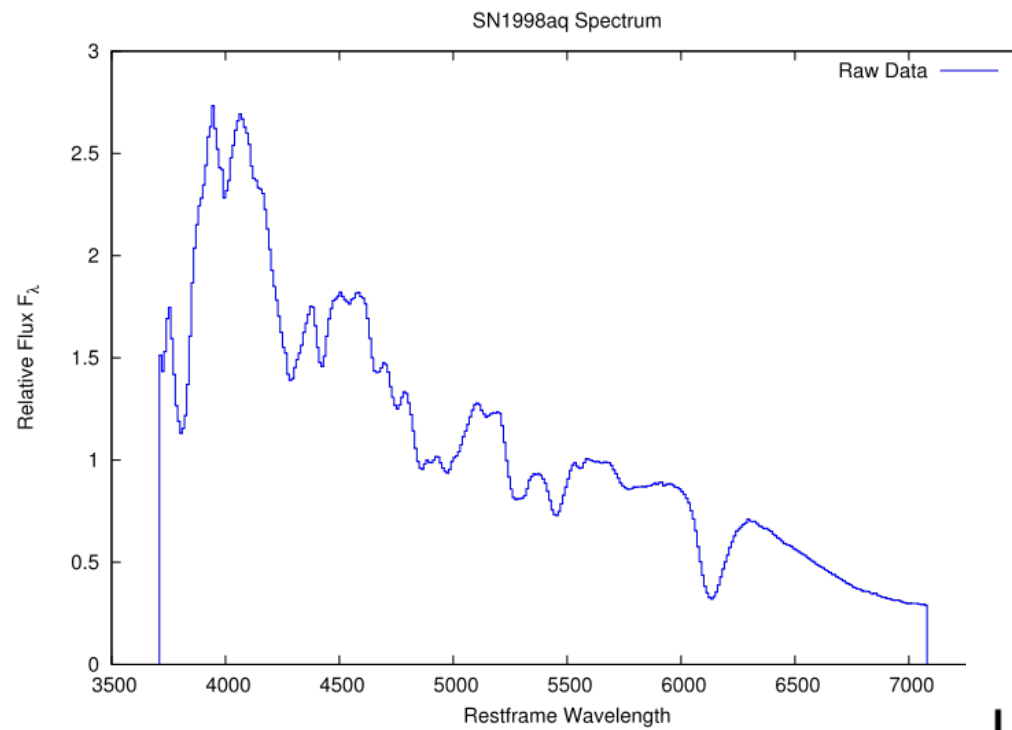
The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



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



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



ΑΣΚΗΣΗ: Μετρήστε την διαστολή του Σύμπαντος H_0

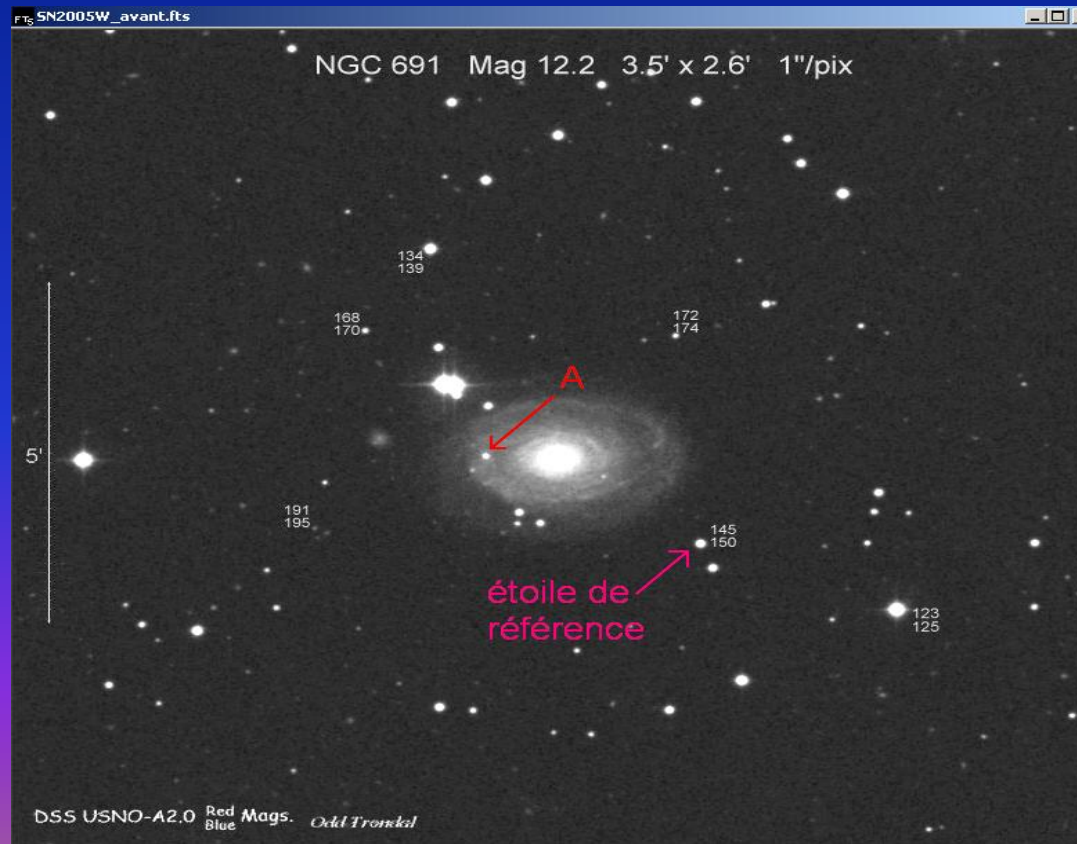
Με τη βοήθεια του Ia supernova SN2005W στον γαλαξία NGC 691.

$$v \text{ [km/sec]} = H_0 \text{ [km/s/Mpc]} * D \text{ [Mpc]}$$

(1pc=3×10¹⁶m)

Η αβεβαιότητα στην τιμή του H_0 :

$H_0=50-100 \Rightarrow$ Ηλικία του Σύμπαντος 20-10 δισ. χρόνια



Υπολογισμός απόστασης D

Η φωτεινότητα του άστρου αναφοράς είναι γνωστή:

$$E_{\text{réf}} = 5.24 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$$

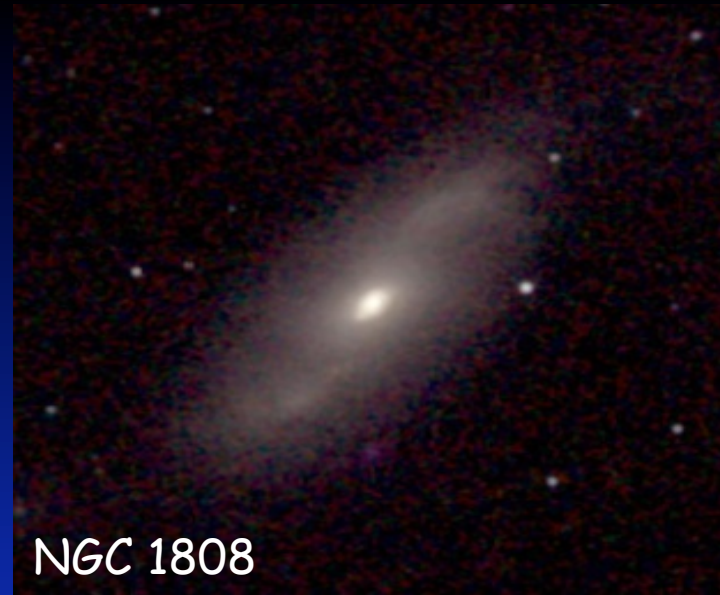
Με τη βοήθεια φωτομετρικών εργαλείων μετράμε την φωτεινότητα του άστρου A, σε φωτογραφίες του γαλαξία πριν το 2005, E_A

Ο SN2005W εμφανίστηκε κοντά στο άστρο A, οπότε αρχικά μετράμε την ολική φωτεινότητα (με τη βοήθεια το άστρου αναφοράς) $E_{\text{tot}} = E_{\text{SN2005W}} + E_A$ απ' όπου συμπεραίνουμε την E_{SN2005W}

Γνωρίζοντας την απόλυτη λαμπρότητα του SN2005W: $L = (1.4 \pm 0.4) \times 10^{36} \text{ Watts.}$, βρίσκουμε την απόστασή του $D = \sqrt{L / 4\pi E}$



NGC 34



NGC 1808



NGC 3511



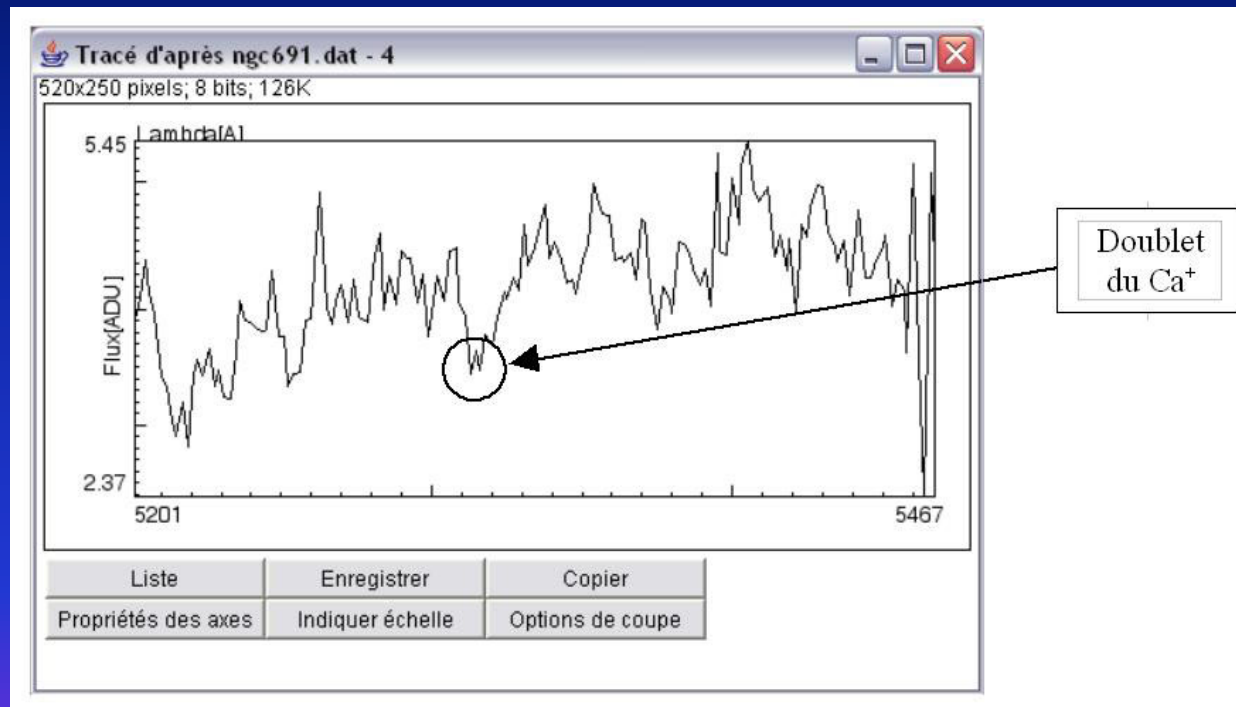
NGC 5427

Γαλαξίες	Αποστάσεις (Mpc)
NGC 34	84,0
NGC 1808	14,2
NGC 3511	15,8
NGC 5427	37,4
NGC 691	...

$\lambda_{\text{obs}}_{\text{ngc691}} = \text{\AA} \dots$

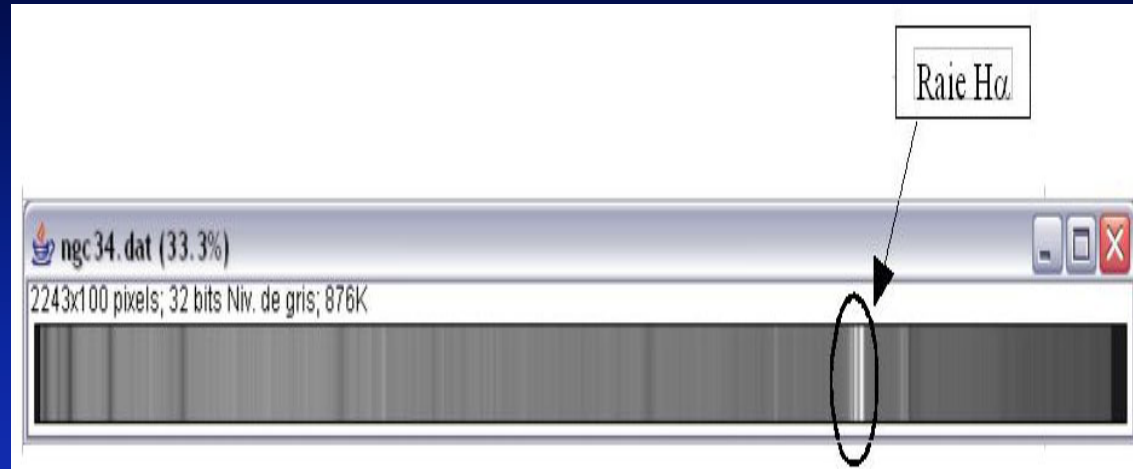
Υπολογισμός Ταχύτητας v

NGC 691: Χρησιμοποιούμε την φασματική γραμμή ιονισμένου ασβεστιου (Ca^+), που στην πραγματικότητα είναι διπλή: $5265.557 \text{\AA}$ et $5270.27 \text{\AA}$ (rest frame; $1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-10} \text{m}$)



$$\lambda_{\text{obs}} = \dots \text{\AA}$$
$$z_{\text{ngc691}} = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0 = \dots$$
$$v_{\text{ngc691}} = \dots \text{ km/s}$$

Για τους γαλαξίες NGC 34, NGC 1808, NGC 3511 et NGC 5427, χρησιμοποιούμε τη γραμμή εκπομπής H α : 6562,8Å. (rest frame).



Γαλαξίας	λ_{obs}	z	v
NGC 34			
NGC 1808			
NGC 3511			
NGC 5427			

Υπολογισμός της σταθεράς Hubble H_0

Σε ένα διάγραμμα σχεδιάζουμε την (km/s) των πέντε γαλαξιών ως συνάρτηση της απόστασής τους D (Mpc).

Προσαρμόζουμε την καλύτερη ευθεία στα δεδομένα (linear regression) η κλίση της οποίας δίνει την $H_0 = \dots\dots\dots$ km/s/Mpc. $d=cz/H_0$

Μπορείτε στη συνέχεια να αναρωτηθείτε:

Αν η διαστολή του Σύμπαντος ήταν σταθερή, ποια ηλικία του Σύμπαντος δίνει αυτή η H_0 ;

Η εκτιμώμενη ηλικία του Σύμπαντος είναι 13.75 ± 0.17 δισ. χρόνια. Προφανώς το Σύμπαν πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο παλιό όσο τα παλαιότερα αντικείμενα που βλέπουμε σ' αυτό: Στις 23 Απριλίου 2009 ανιχνεύθηκε μια έκλαμψη ακτίνων γ (gamma-ray burst σε απόσταση 13 δισ. εφ από τη Γη (630 εκατομμύρια χρόνια μετά το BB, ή $z=6.7$). Προς το παρόν γνωρίζουμε τουλάχιστον 30 αντικείμενα που προέρχονται από τα πρώτα 1 δισ. χρόνια του Σύμπαντος.

Ο προσδιορισμός της ηλικίας του Σύμπαντος ανάγεται στον προσδιορισμό των κοσμολογικών παραμέτρων.

Μοντέλο Λ CDM: Το Σύμπαν περιέχει κανονική (βαρυονική ύλη), CDM, ακτινοβολία και Λ . Η συνεισφορά καθενός στη παρούσα πυκνότητα ενέργειας του Σύμπαντος δίνεται από τις παραμέτρους Ω_m , Ω_r , Ω_Λ .

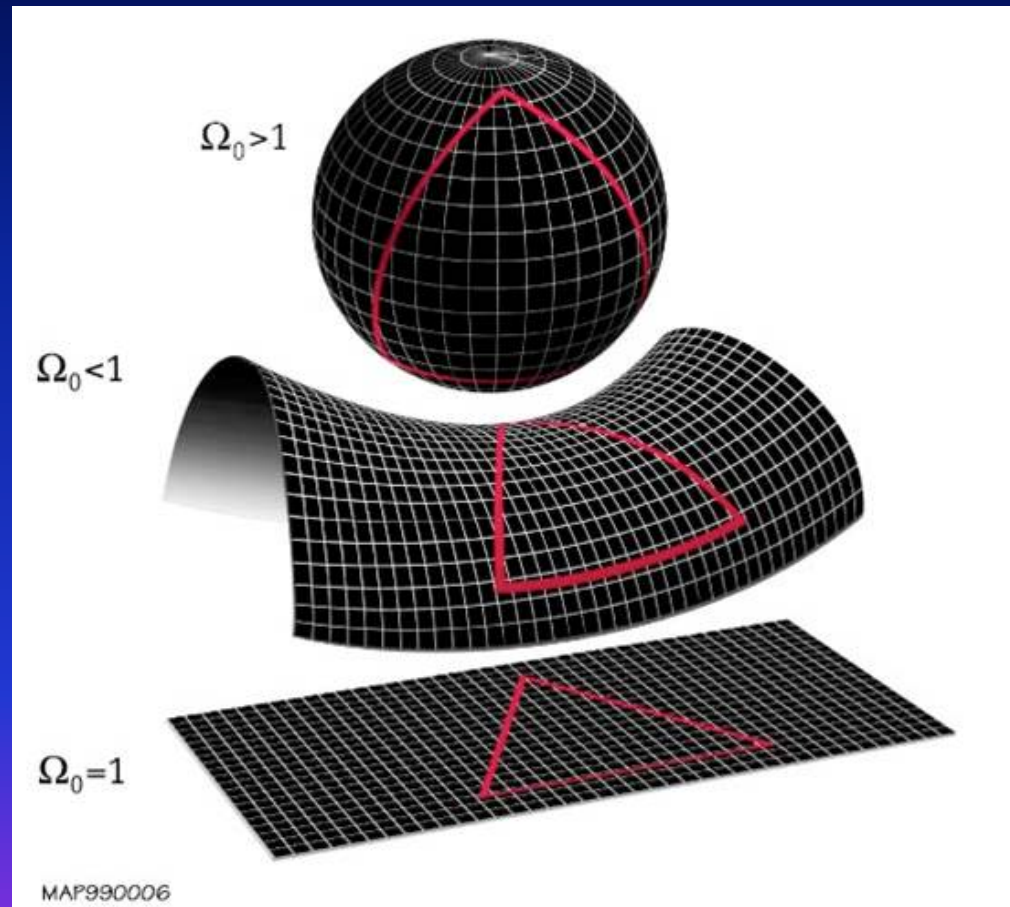
$$t_0 = \frac{1}{H_0} F(\Omega_r, \Omega_m, \Omega_\Lambda, \dots) \frac{1}{H_0} = \left(\frac{H_0}{72 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})} \right)^{-1} \times 13.6 \text{ Ga.}$$

Πυκνότητα Ενέργειας: Η χρήσιμη ενέργεια αποθηκευμένη σε ένα σύστημα ή στο διάστημα, στη μονάδα όγκου. Στη γενική θεωρία σχετικότητας η κοσμολογική σταθερά είναι ανάλογη της πυκνότητας ενέργειας και μετριέται από την καμπυλότητα του χώρου.

Αντί για την Λ αναφερόμαστε στον λόγο της πυκνότητας ενέργειας που οφείλεται στην Λ και της κρίσιμης πυκνότητας (στο παρόν) του Σύμπαντος, Ω_Λ . Η παράμετρος πυκνότητας $\Omega =$ λόγος της παρούσας πυκνότητας ρ προς την κρίσιμη πυκνότητα ρ_c του Σύμπαντος. Αυτή η σχέση είναι που καθορίζει την γεωμετρία του Σύμπαντος.

Σήμερα η κρίσιμη πυκνότητα = πέντε άτομα (υδρογόνου)/κμ ($1 \text{ to } 2 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$) ενώ η μέση πυκνότητα της κανονικής ύλης στο Σύμπαν είναι 0.2 άτομα/κμ. Συνυπολογίζοντας τη σκοτεινή ύλη η πυκνότητα γίνεται μεγαλύτερη και το Σύμπαν θα έπρεπε να διαστέλλεται. Αλλά το μεγαλύτερο μέρος πυκνότητας οφείλεται στη σκοτεινή ενέργεια. Αν και η ολική πυκνότητα είναι τελικά ίση με την κρίσιμη πυκνότητα, η σκοτεινή ενέργεια συνεισφέρει στην διαστολή του Σύμπαντος.

Η Γεωμετρία του Σύμπαντος είναι πολύ ειδική !
Χαρακτηρίζεται από μία "ακτίνα" $R(t)$ και από μία σταθερά k που χαρακτηρίζει την καμπυλότητα του (Robertson-Walker)



$$k = 1$$

$$k = -1$$

$$k = 0$$

Για κάθε είδος "i" η σχετική πυκνότητα είναι : $\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$

Η ολική πυκνότητα σήμερα : $\Omega_0 = 1 + \frac{k}{R^2} H_0^{-2}$

Ποιά η τιμή του Ω_0 ?

Μετρήσεις του μικροκυματικού υποβάθρου (CMB) δίνουν τιμή πολύ κοντά στην μονάδα. ΤΟ ΣΥΜΠΑΝ ΕΙΝΑΙ ΕΠΙΠΕΔΟ !

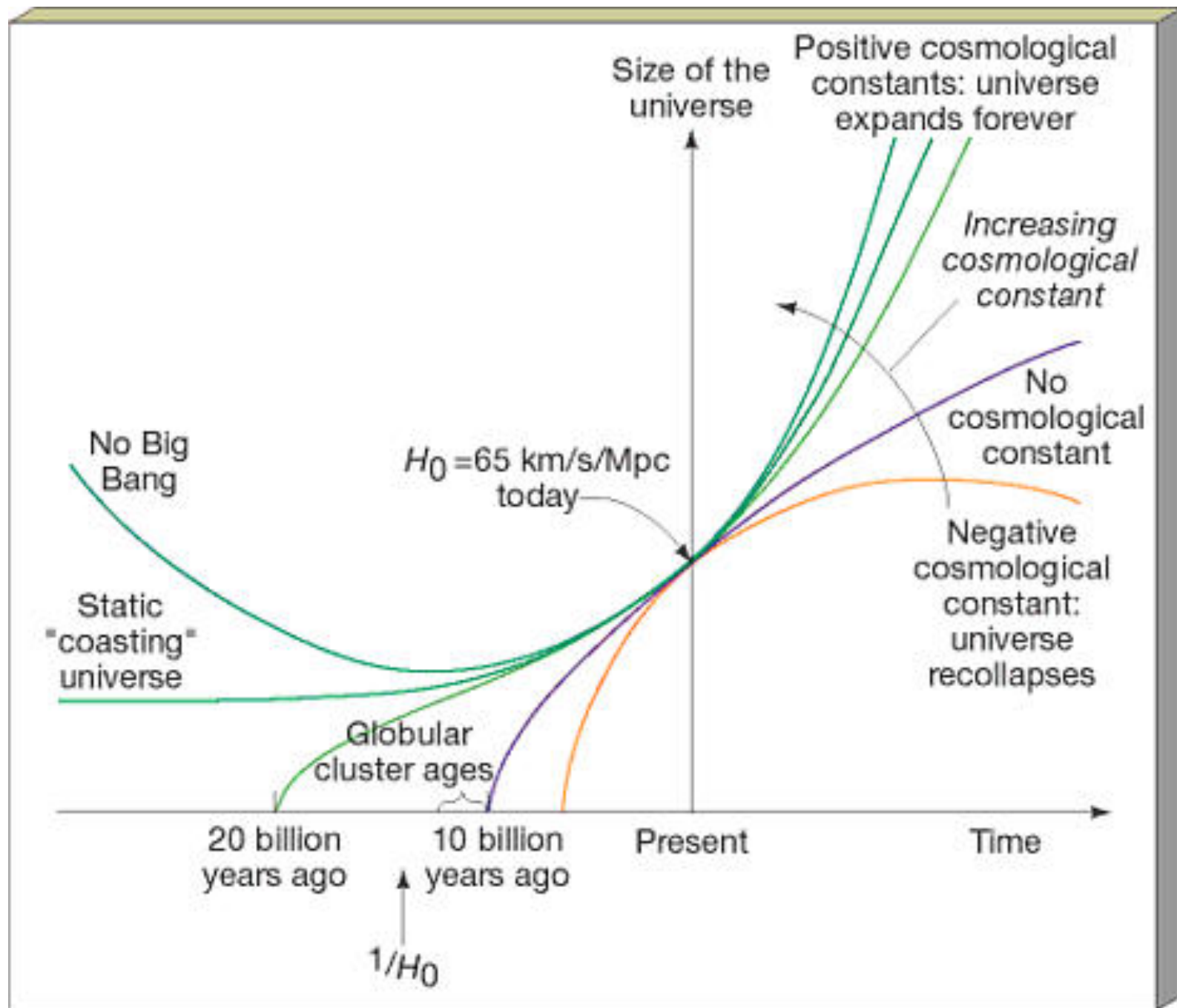
Τί συμμετέχει στο ολικό Ω_0 ?

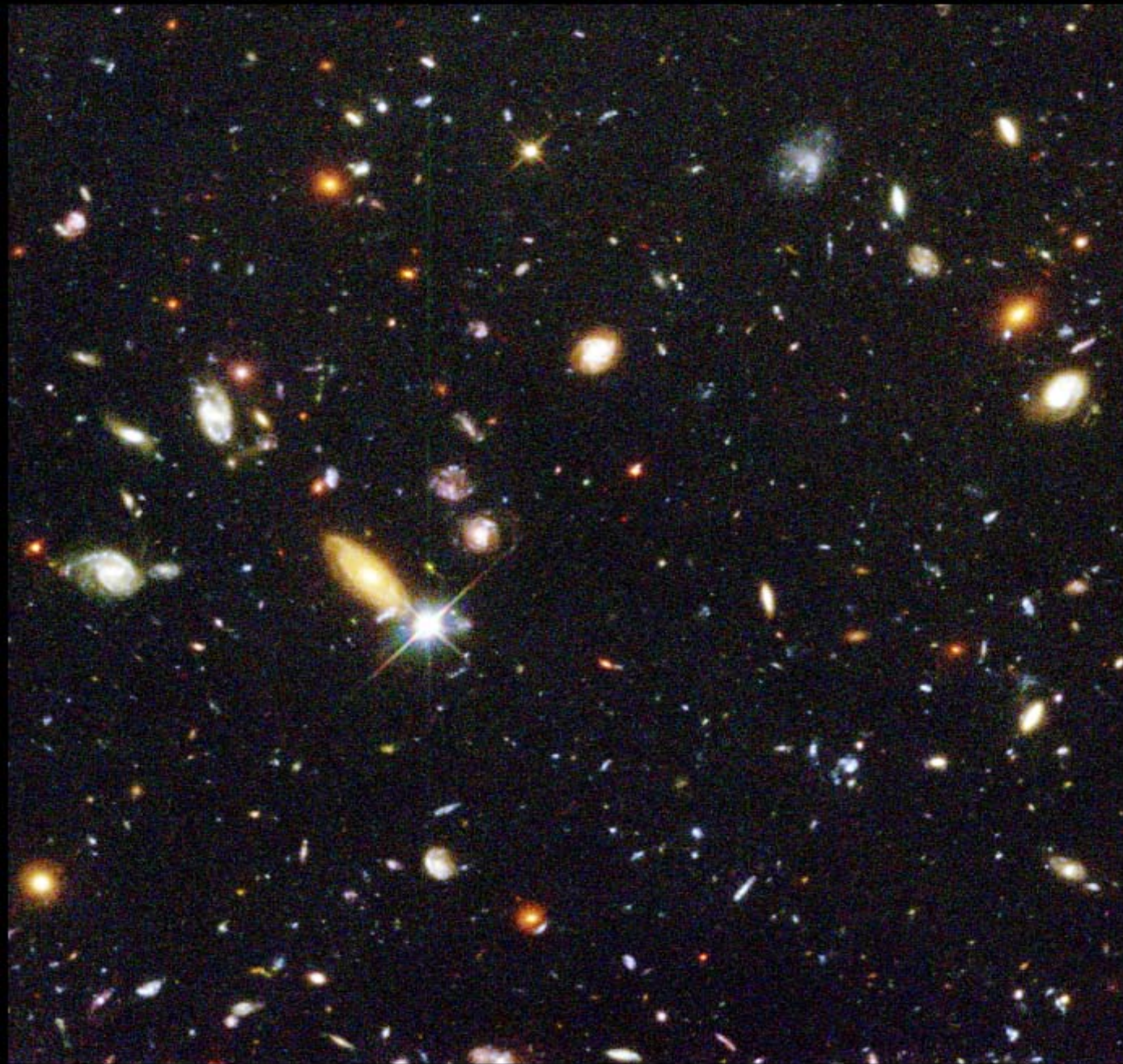
Η συνήθης ορατή ύλη συμμετέχει σε ποσοστό 4%

Αόρατη (η Σκοτεινή Υλη) συμμετέχει στο 22% !

Αγνωστο είδος ενέργειας (Σκοτεινή Ενέργεια) στο 74% !

Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν με μεγάλη ακρίβεια από τον δορυφόρο WMAP



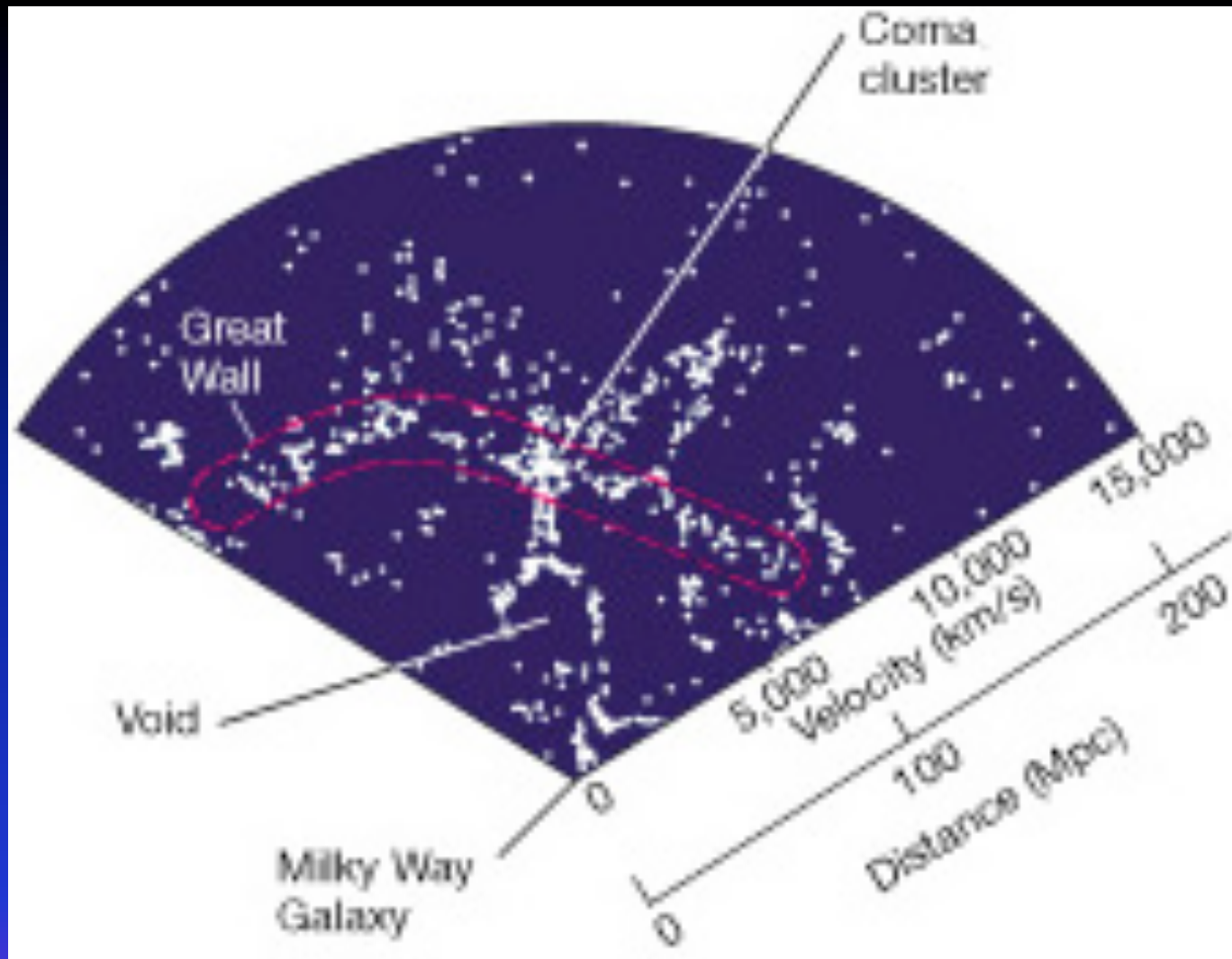


8/26/10

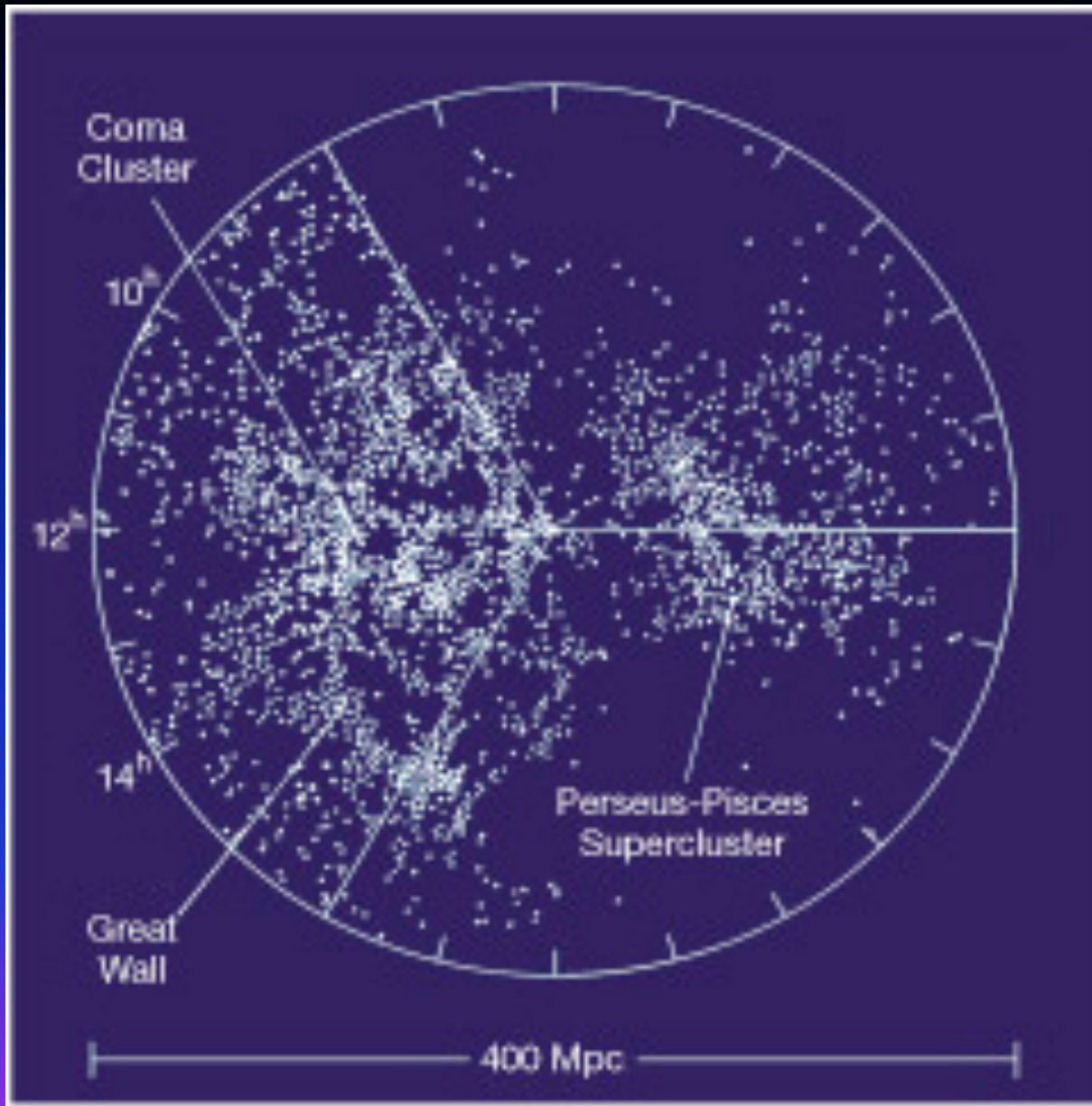
Hubble Deep Field

PRC96-01a · ST Scl OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST Scl), NASA

HST · WFPC2



Η πρώτη «φέτα» του Σύμπαντος που παρατηρήθηκε περιλαμβάνει 1057 γαλαξίες σε απόσταση μέχρι 200 Mpc.



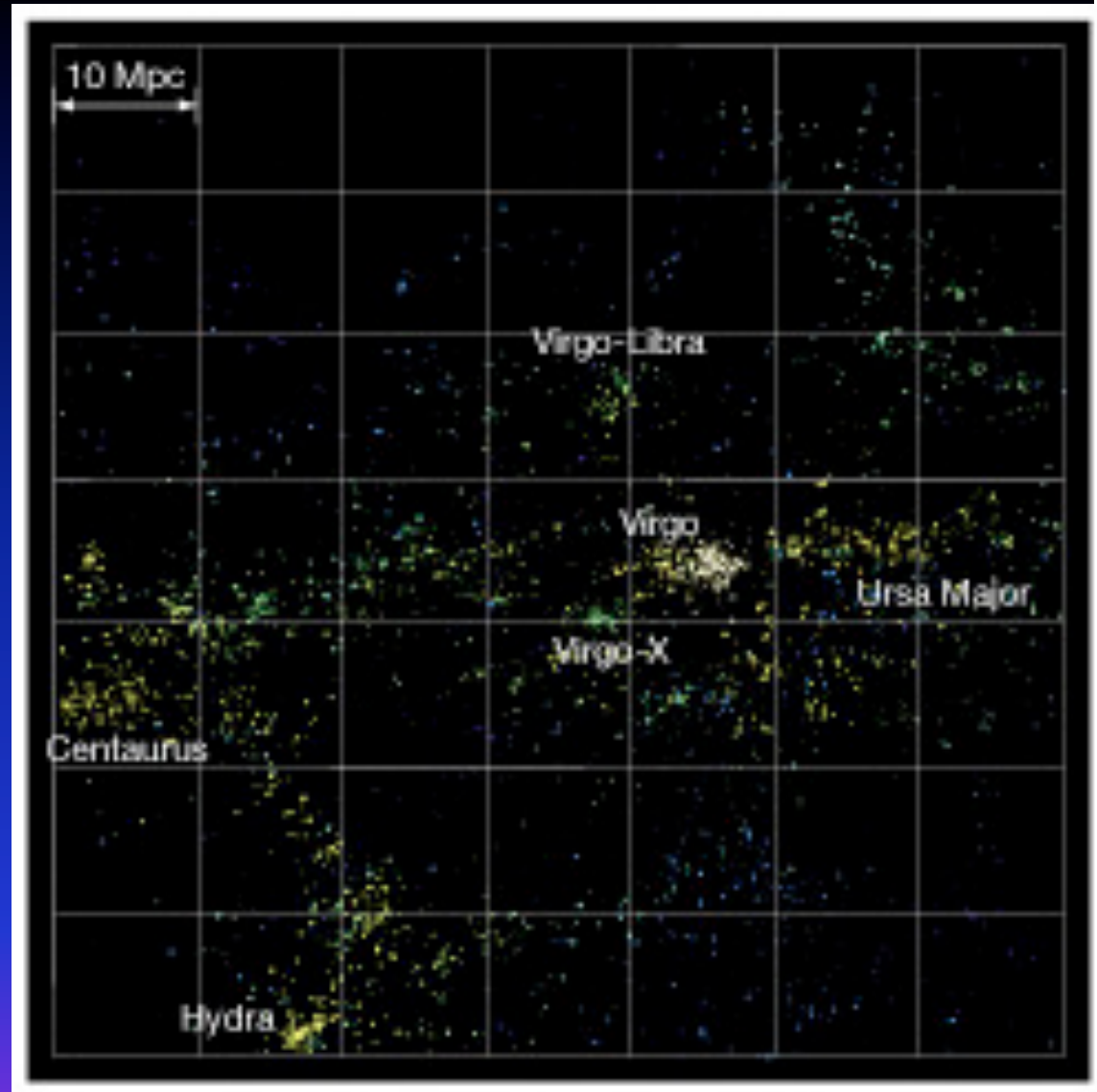
Οι γαλαξίες είναι διασκορπισμένοι πάνω στις επιφάνειες που περικλείουν «φυσαλλίδες» κενού χώρου.

Τα πυκνότερα σμήνη γαλαξιών βρίσκονται εκεί που συναντιούνται πολλές «φυσαλλίδες».

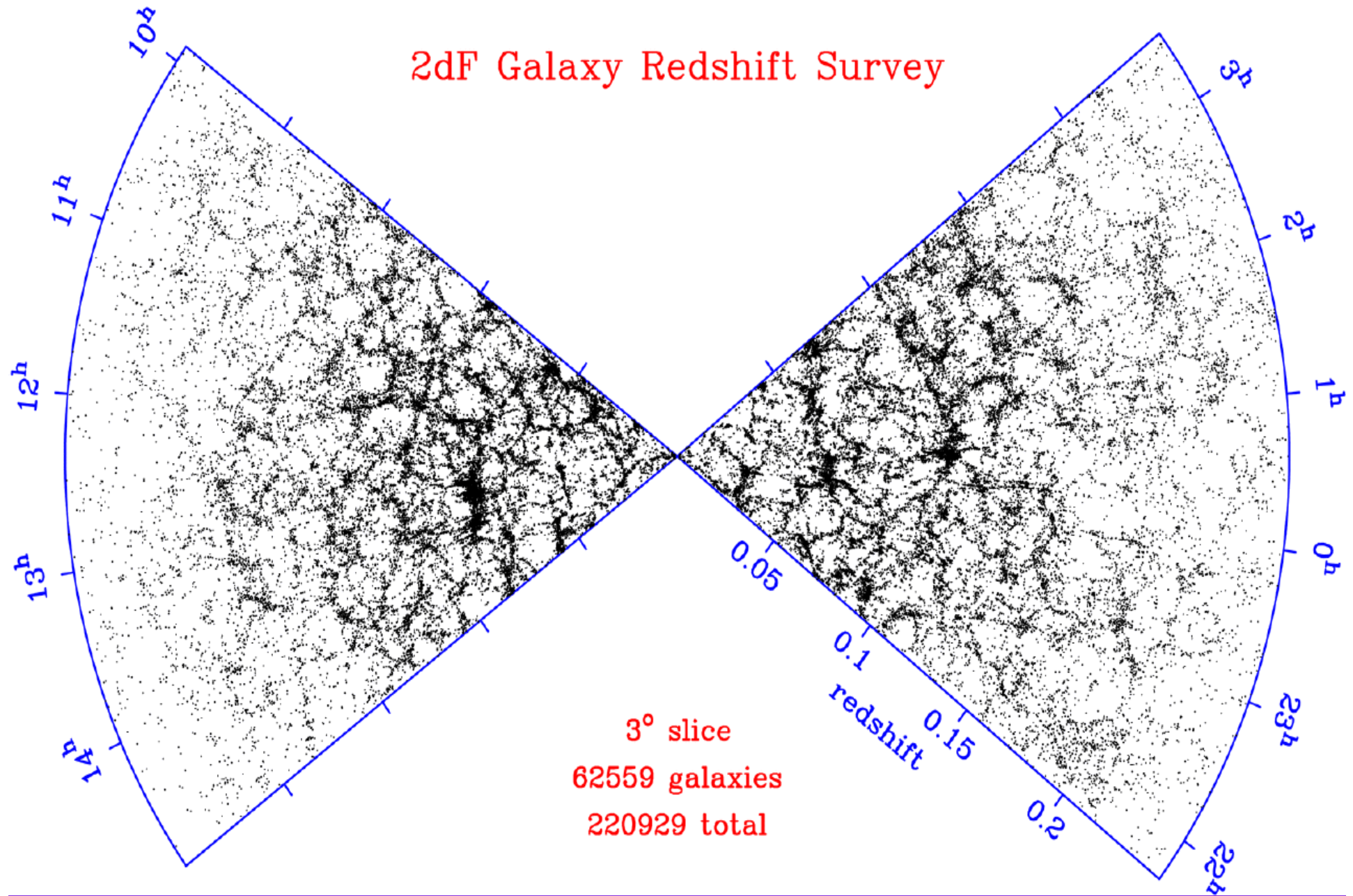
Τοπικό Υπερσμήνος Γαλαξιών

Βλέπουμε το υπερσμήνος της Παρθένου (Virgo) όπως φαίνεται από τον Γαλαξία μας, 20 Mpc μακριά (δυσ τετράγωνα πάνω από την εικόνα).

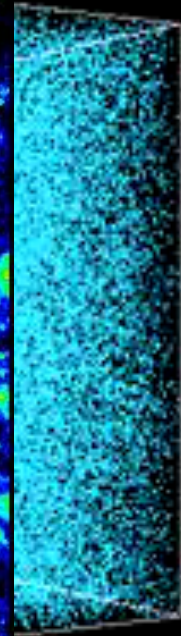
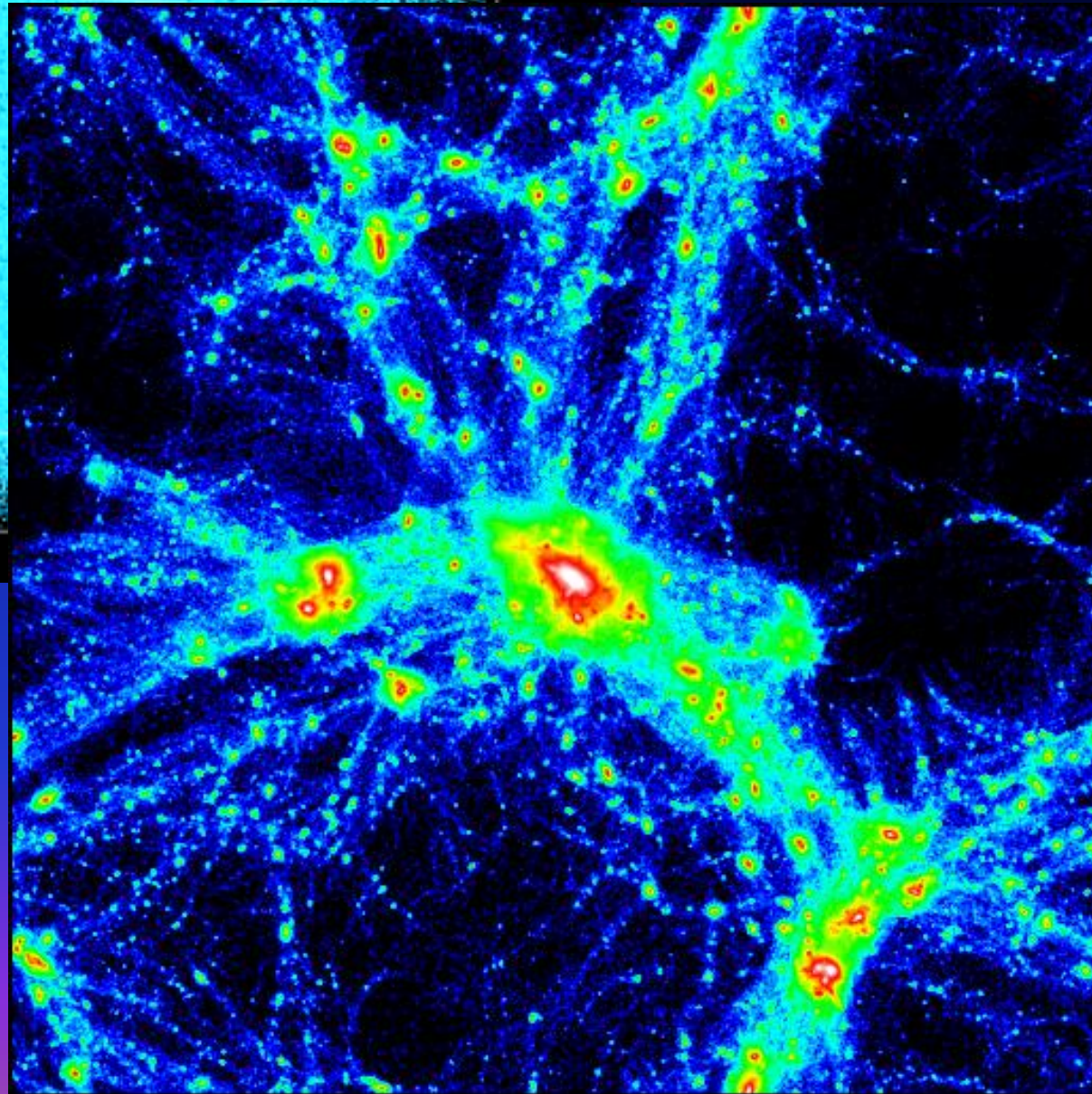
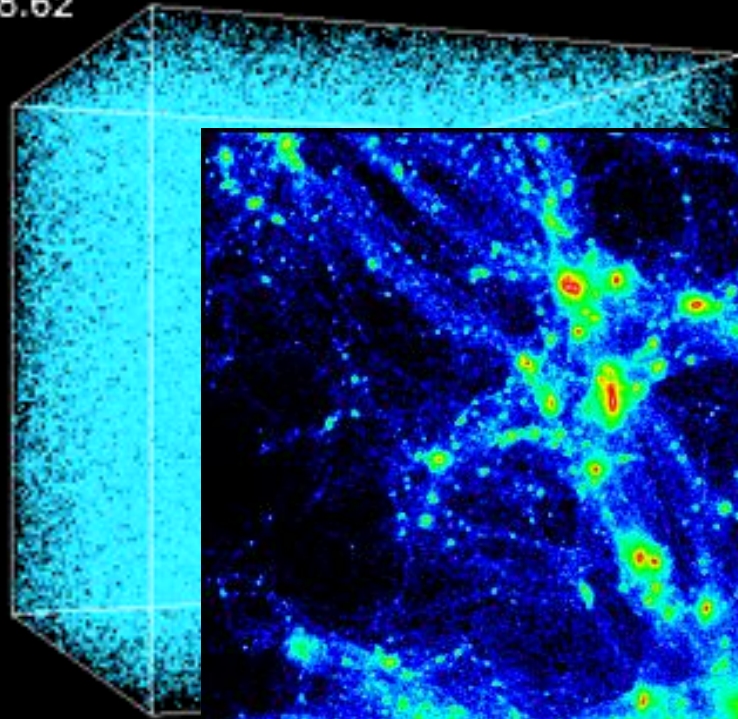
Εδώ βρίσκουμε πάνω από 4500 γαλαξίες (οι περισσότεροι μεγάλοι ελλειπτικοί και σπειροειδείς, ενώ οι πιο αμυδροί νάνοι και ακανόνιστοι έχουν παραληφθεί) και πολλά σμήνη γαλαξιών.



2dF Galaxy Redshift Survey



$Z=28.62$



8/26/10

Τα υπερσμήνη έχουν μέγεθος πολλών εκατοντάδων εκατομμυρίων εφ.
Σχηματίζουν νηματοειδείς μορφές (τοίχους) μήκους δισ. εφ. (>5% του
ορατού Σύμπαντος)

(Η ηλικία του Σύμπαντος είναι 13.7 δισ. χρόνια, αλλά η διάμετρος του
ορατού Σύμπαντος είναι 28 δισ. parsecs => 93 δισ. εφ).

ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ

Οι πρώτες ενδείξεις για την ύπαρξη Σκοτεινής Υλης προέρχονται από τις ταχύτητες περιστροφής των Γαλαξιών που εμφανίζονται μεγαλύτερες από το αναμενόμενο (F. Zwicky 1933)

$$V = \sqrt{\frac{G_N M(r)}{r}}$$

r είναι η απόσταση από το κέντρο του σμήνους που ανήκει ο Γαλαξίας και $M(r)$ η ολική μάζα που τον περιστρέφει μέσα σε σφαίρα ακτίνας r . Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από το αν η μάζα αυτή αποδοθεί στην ύλη που βλέπουμε με τα τηλεσκόπια ! Αρα θα πρέπει να υπάρχει και ύλη που δεν βλέπουμε, **Σκοτεινή Υλη**, άγνωστης σύνθεσης μέχρι τώρα που αποτελεί τουλάχιστο το 90% της ύλης ενός γαλαξία.

➤ Σμήνη (εκατοντάδων-χιλιάδων) γαλαξιών:

Ταχύτητες γαλαξιών πολύ μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες υποδεικνύουν μεγαλύτερη μάζα στο εσωτερικό του σμήνους από την ορατή.

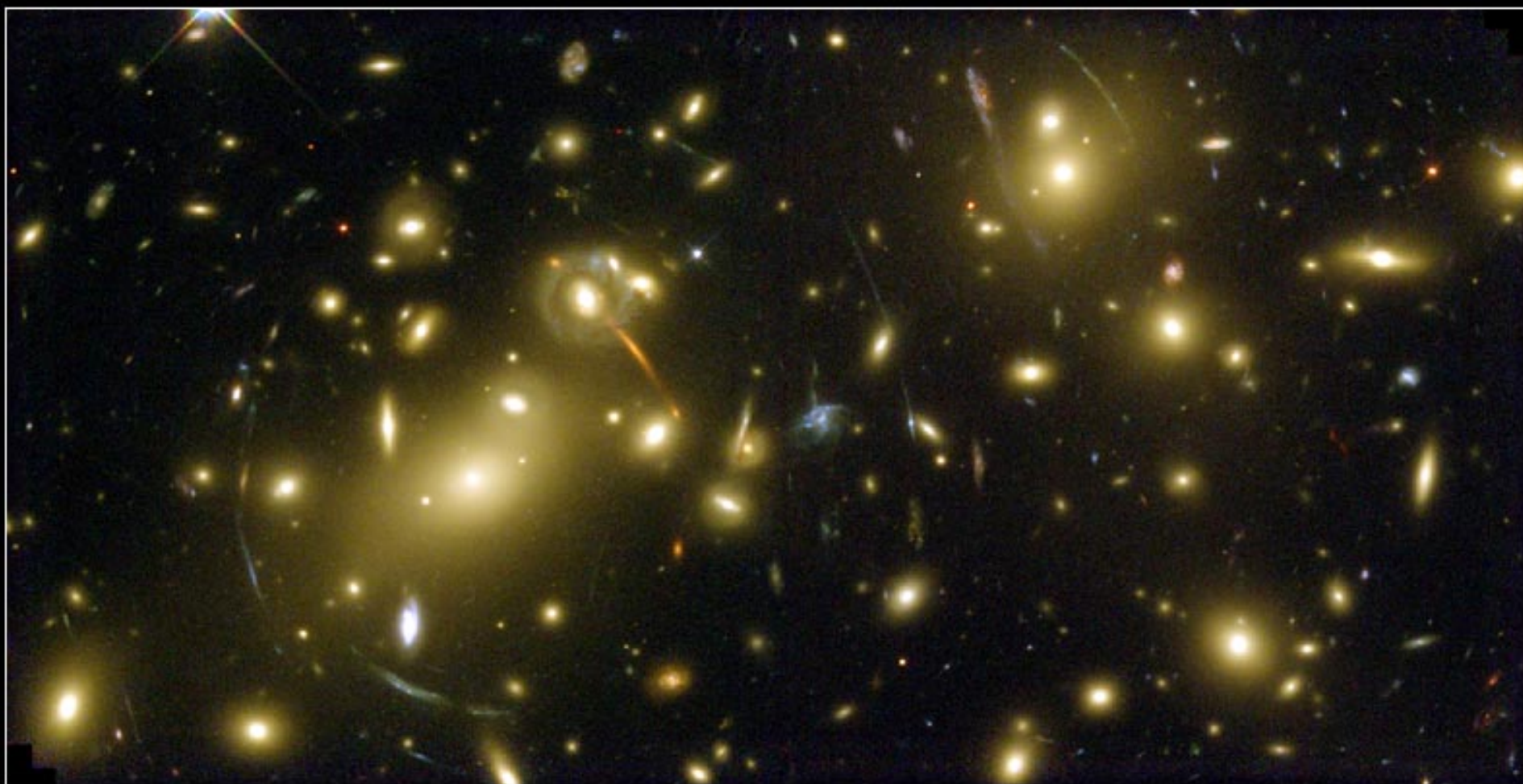
Ταχύτητα διαφυγής $\Rightarrow$ μάζα σμήνους.

➤ Καμπύλη περιστροφής γαλαξιών:

Η ταχύτητα περιστροφής ενός γαλαξία γύρω από το κέντρο του είναι ανάλογη της μάζας που περιέχεται στο εσωτερικό της κάθε ακτίνας και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης (ακτίνας) από το κέντρο (νόμοι Kepler).

Η ταχύτητα παρουσιάζεται σταθερή με την απόσταση ενώ η φωτεινή ύλη μειώνεται $\Rightarrow$ σκοτεινή ύλη επικρατεί στο εξωτερικό ενός γαλαξία.

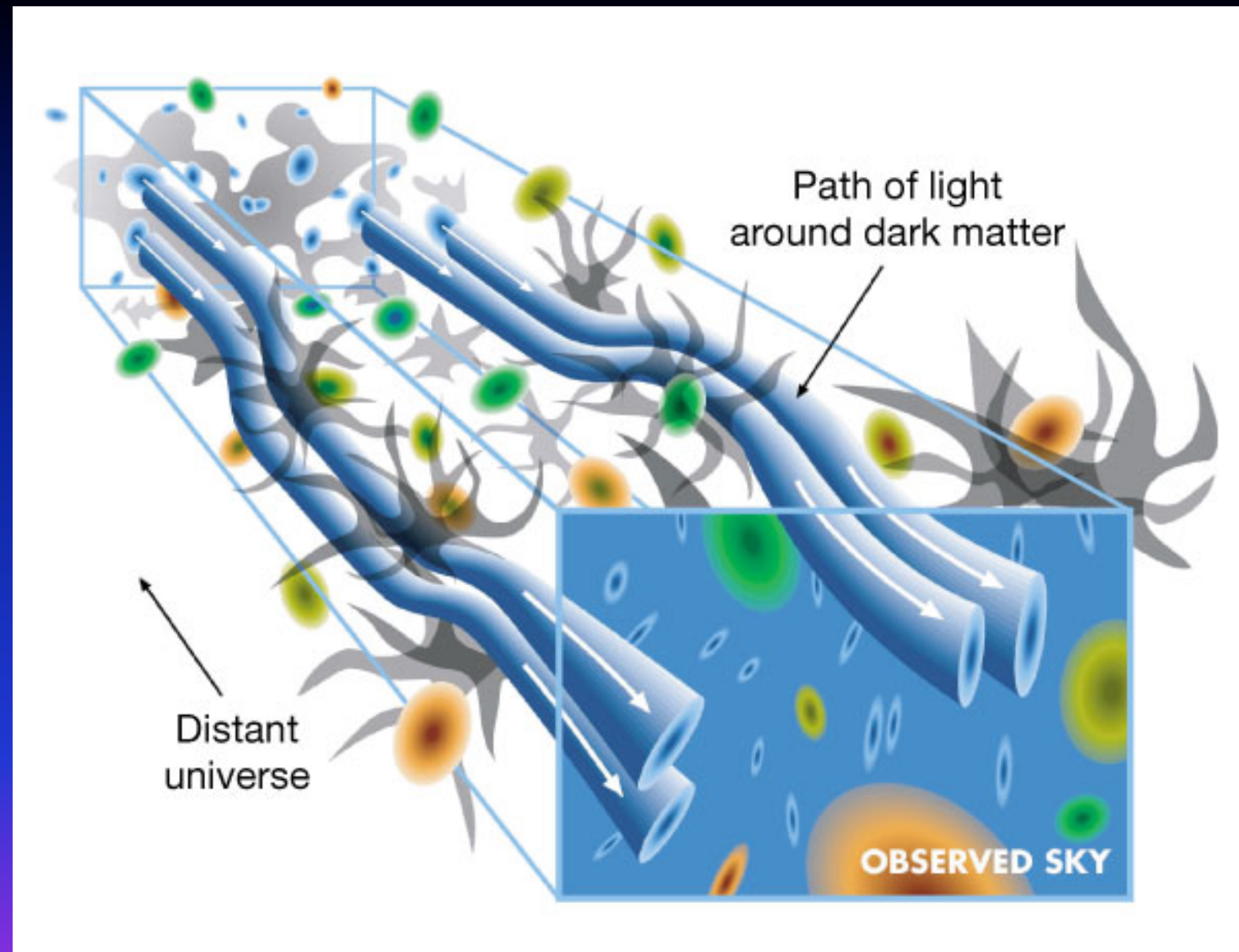
➤ Φαινόμενο Βαρυτικών Φακών

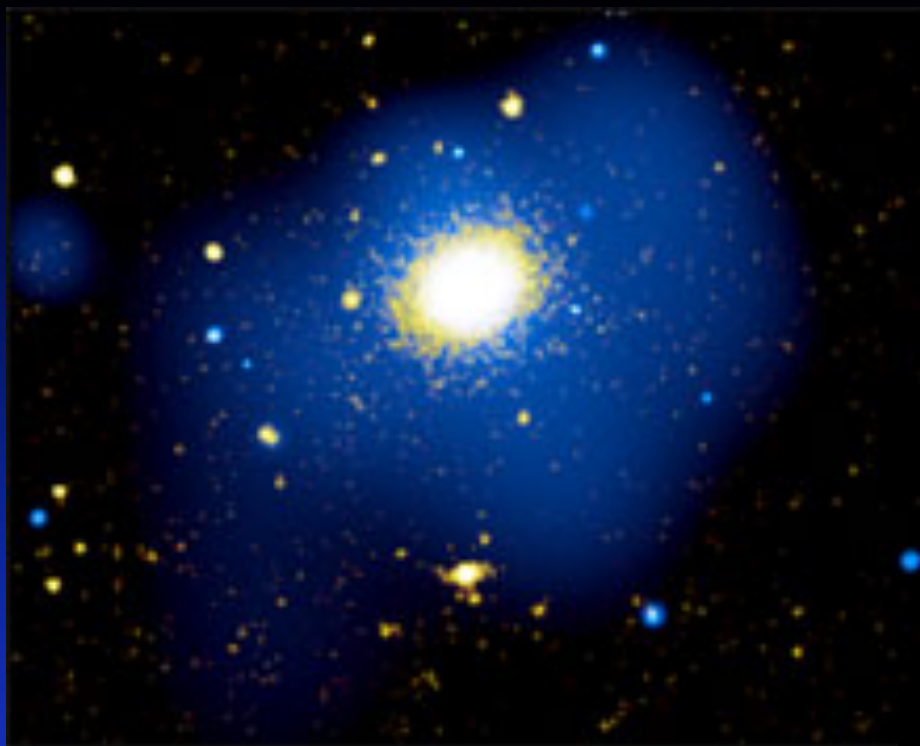


Galaxy Cluster Abell 2218

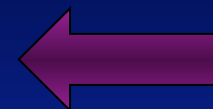
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

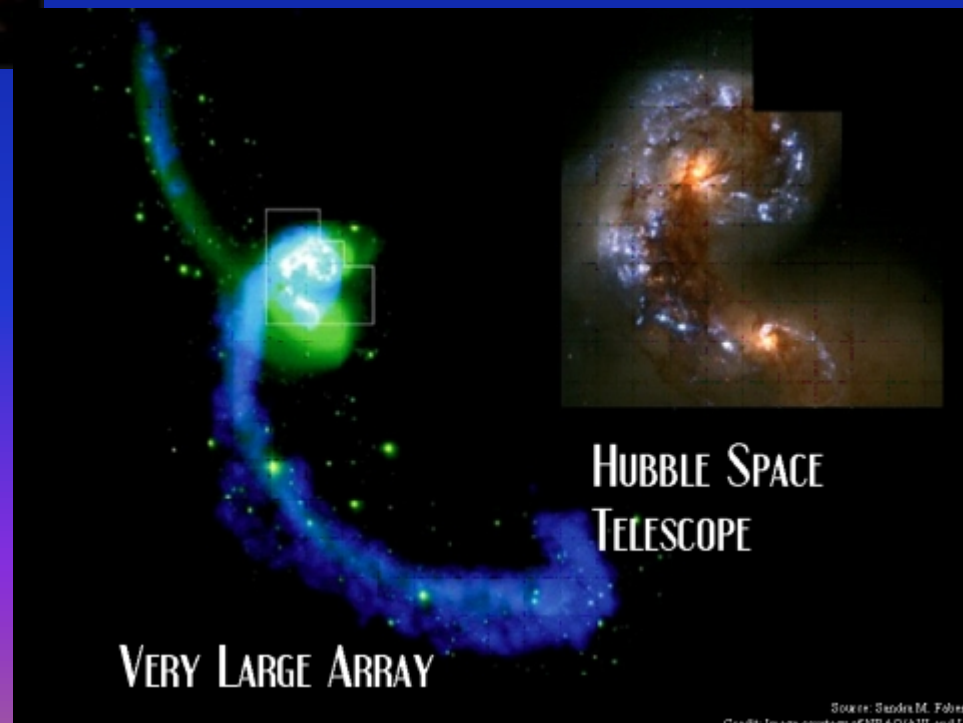




Ο Γαλαξίας NGC4555 Το νέφος αερίων συγκρατείται από την βαρυτική έλξη της Σκοτεινής Υλης

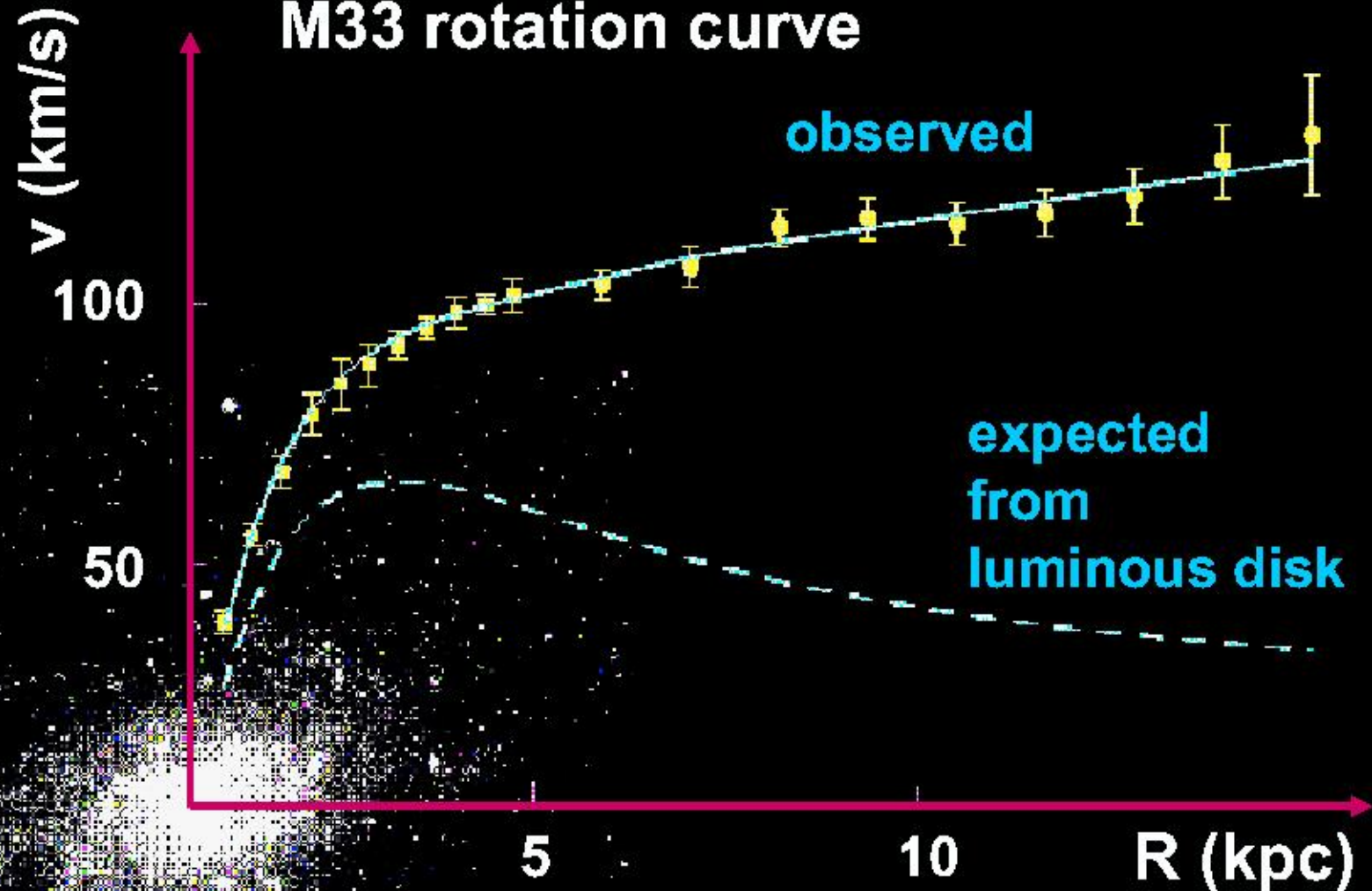


Συγκρουόμενοι Γαλαξίες Η Σκοτεινή Υλη ίσως είναι η πιθανή αιτία του φαινομένου



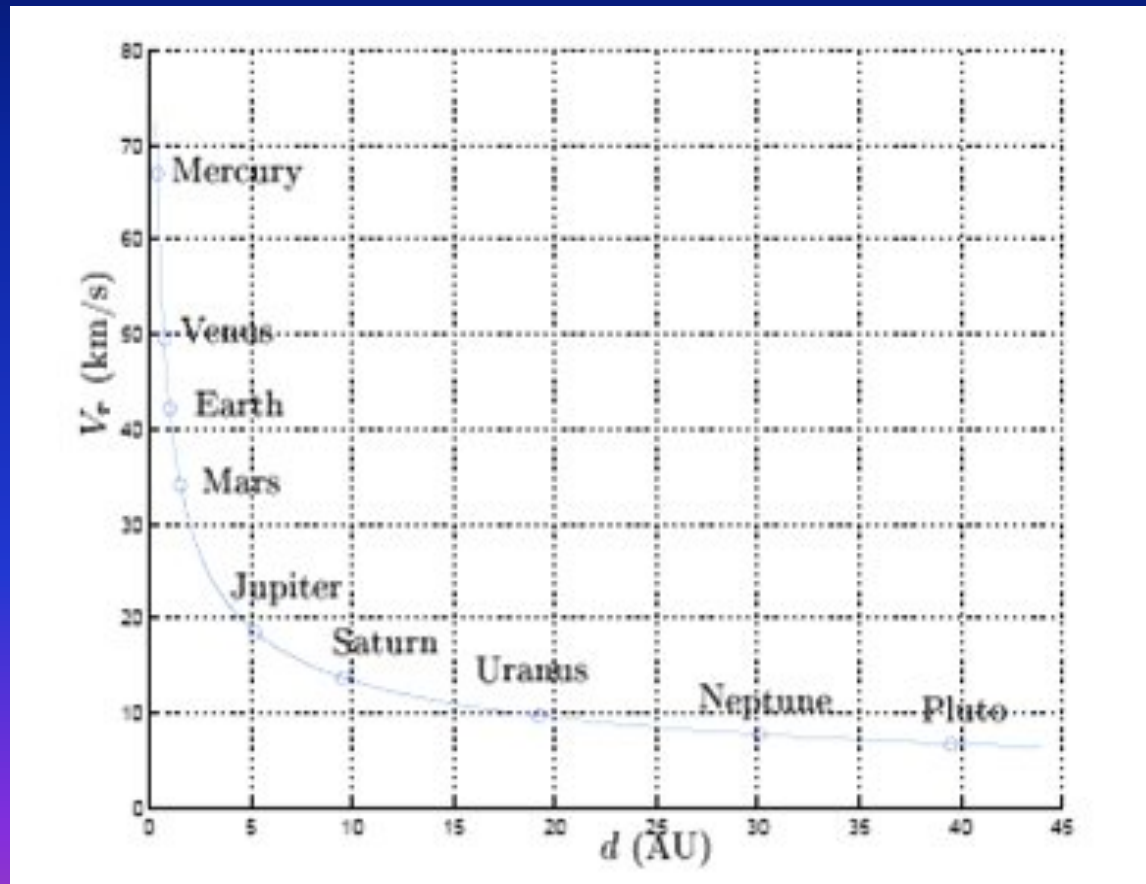
Source: Sandra M. Faber
Credit: Image courtesy of CNRA/ATM and F.

M33 rotation curve

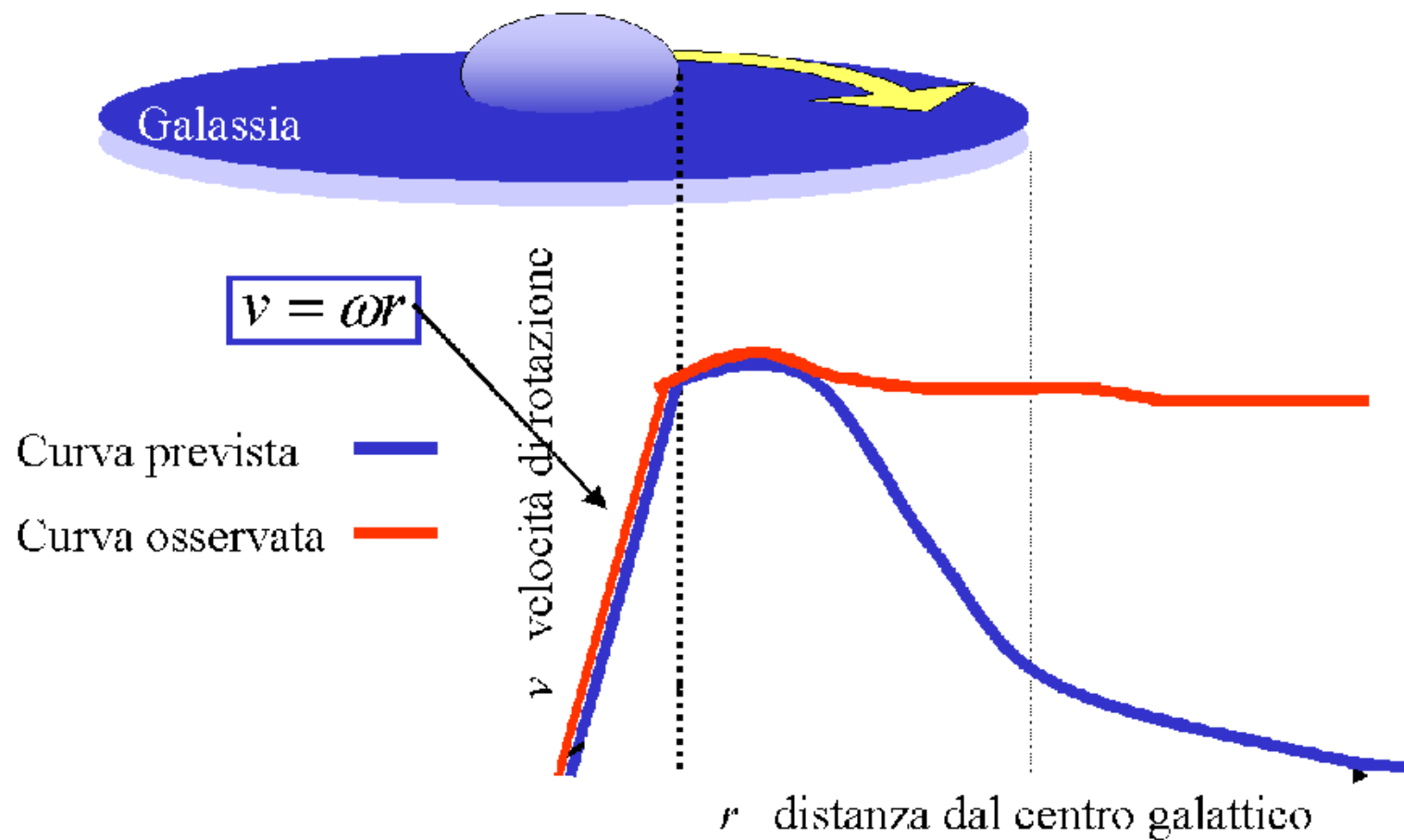


- galaxy & cluster dynamics
- gravitational lensing
- structure formation
- CMB observations

Στο ηλιακό σύστημα, οι πλανήτες έχουν μηδαμινή μάζα σε σχέση με τον Ήλιο, επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κέντρο μάζας του ηλιακού συστήματος βρίσκεται κοντά στο κέντρο του Ήλιου. Επομένως η καμπύλη περιστροφής ακολουθεί το νόμο του Kepler : $V \propto 1 / \sqrt{R}$



La curva di rotazione delle galassie



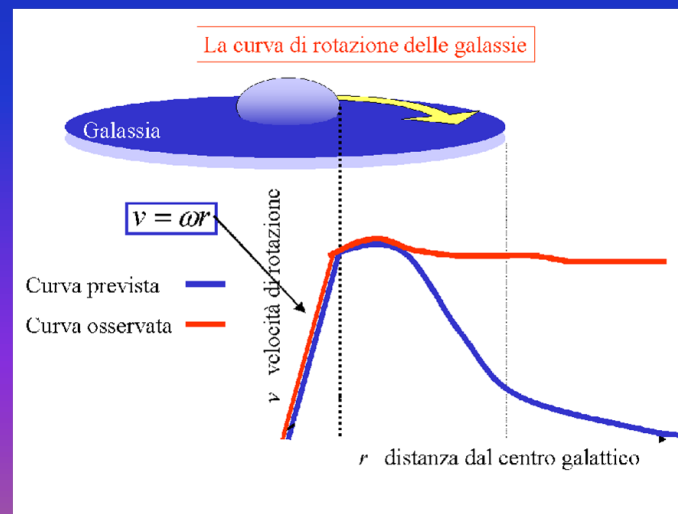
Επεξήγηση της μπλε καμπύλης: Σε μικρές αποστάσεις (στο πυρήνα του γαλαξία) έχουμε περιστροφή rigid body με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Που αυξάνει με την απόσταση από το κέντρο: $v = \omega \cdot r$

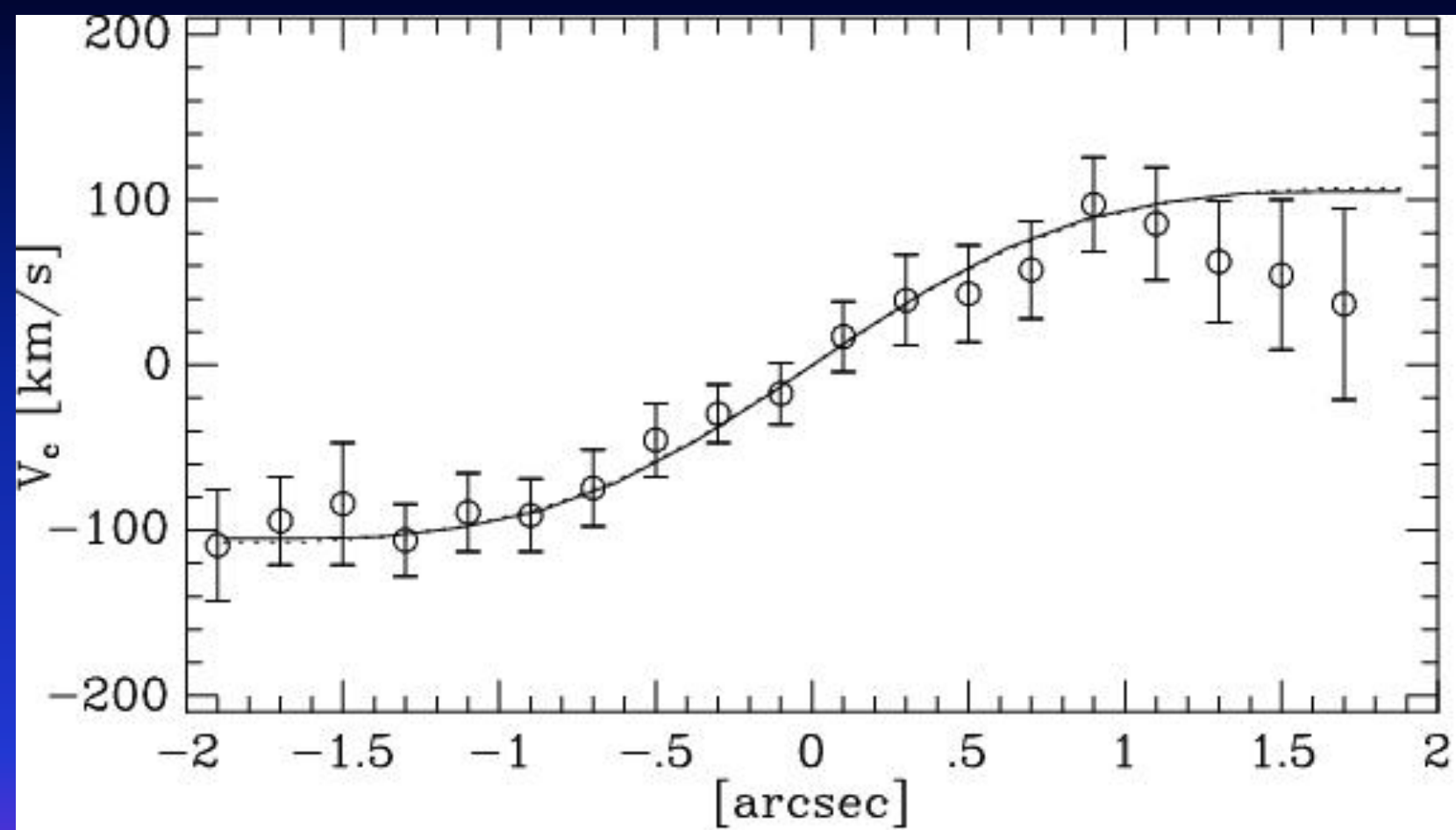
«Βγαίνοντας» από τον πυρήνα θεωρούμε ότι η μάζα είναι όλη συγκεντρωμένη στο κέντρο (η μεγαλύτερη πυκνότητα άστρων) και επομένως ισχύει ο νόμος της παγκόσμιας βαρύτητας:

Newton force = $m \cdot \text{centripetal acceleration}$

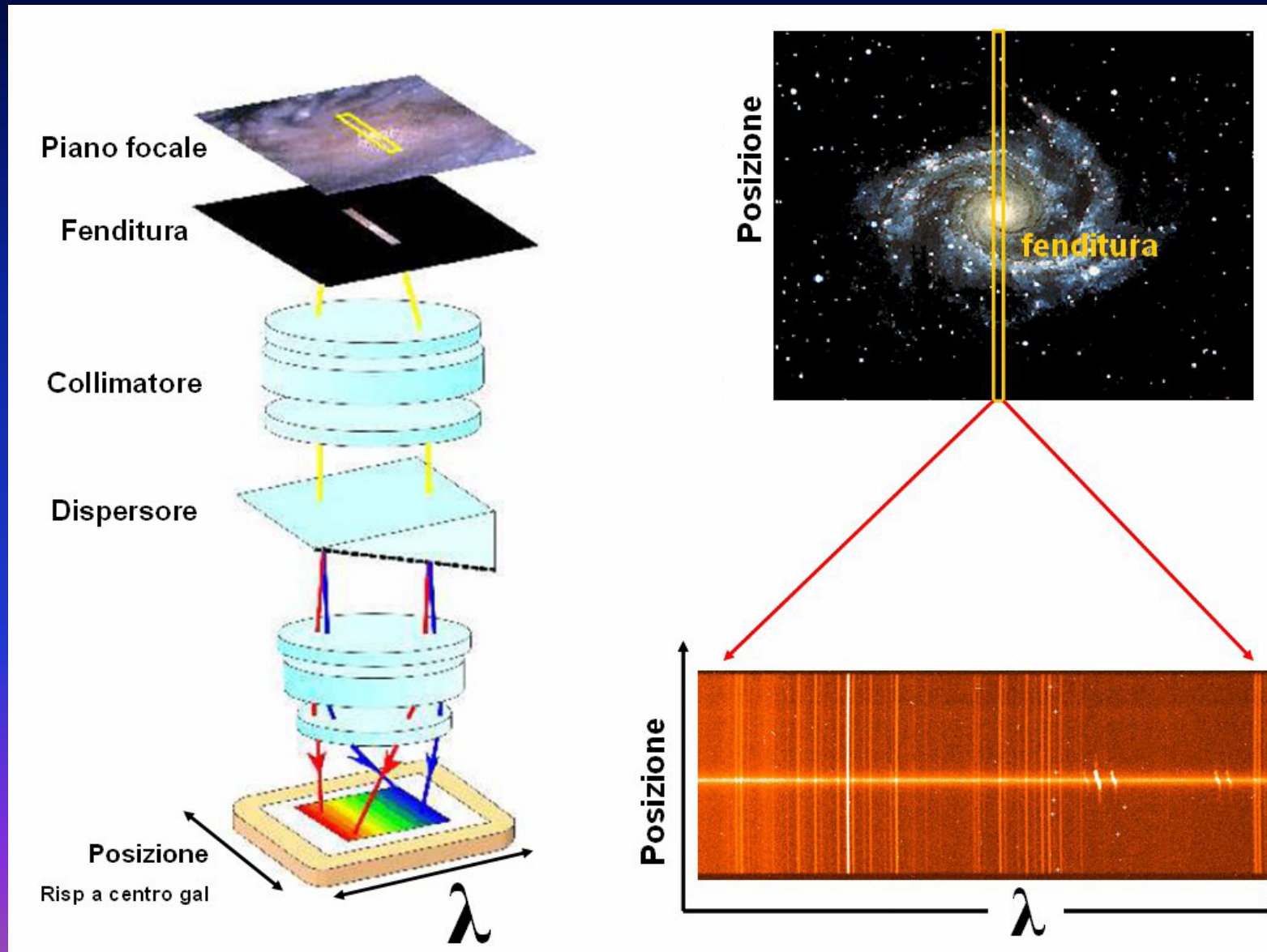
$$G \cdot m \cdot M / r^2 = m \cdot v^2 / r$$

e.g. Η ταχύτητα ελαττώνεται όπως η ρίζα της απόστασης r .





ΑΣΚΗΣΗ: ΚΑΜΠΤΥΛΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΓΑΛΑΞΙΑ

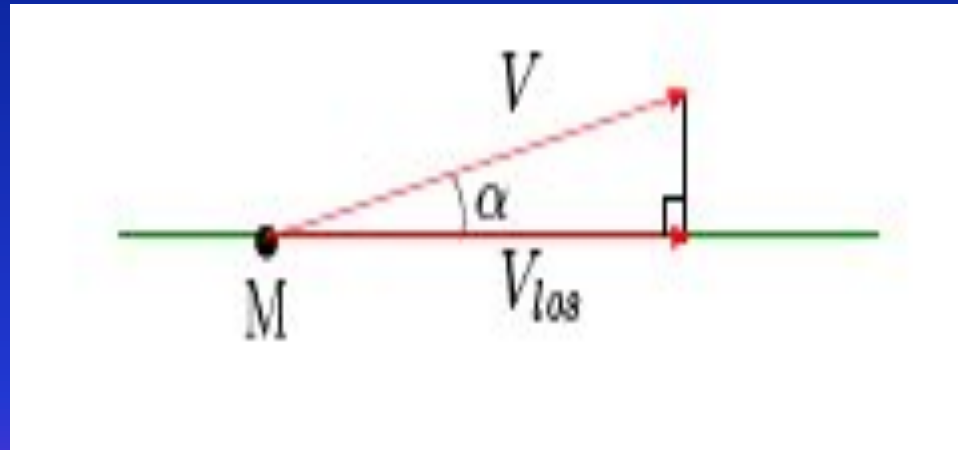


$$V_{los} = V \cos \alpha$$

Στον Γαλαξία μας: Θα μετρήσουμε την ακτινική ταχύτητα νεφών Η που βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από τα κέντρο του γαλαξία. Θα βρούμε την εφαπτόμενη ταχύτητα και θα κάνουμε το τελικό διάγραμμα.

Συνήθως η πραγματική ταχύτητα σχηματίζει γωνία με την διεύθυνση παρατήρησης (line of sight los) V_{los} .

$$V_{los} = V \cos \alpha$$

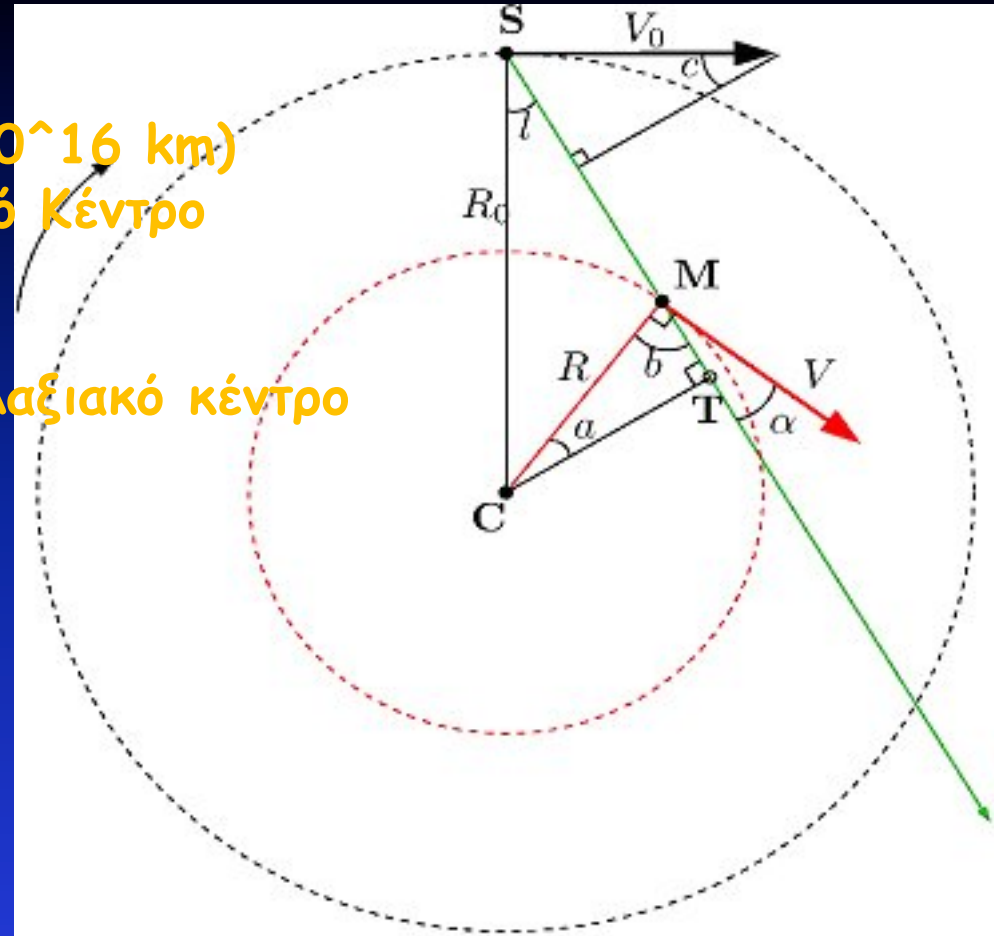


$R_0 = 8.5 \text{ kpc}$ (1 kpc = $3,1 \cdot 10^{16} \text{ km}$)
απόσταση Ήλιου από Γαλαξιακό Κέντρο

$V_0 = 220 \text{ km/s}$
Ταχύτητα Ήλιου γύρω από Γαλαξιακό κέντρο

$$V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin l$$

$$CT = R_0 \sin l = R \cos \alpha$$



l = longitude galactique

V = vitesse d'un nuage de gaz

R = distance entre la nuage et le centre galactique

r = distance entre le soleil et le nuage.

Παρατηρούμε την ακτινική ταχύτητα V_r , που είναι η προβολή της ταχύτητας του νέφους H στην κατεύθυνση παρατήρησης (V_{los}) μείον η προβολή στην ίδια κατεύθυνση της ταχύτητας του Ήλιου.

$$V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin c$$

$$(90 - l) + 90 + c = 180 \Rightarrow c = l$$

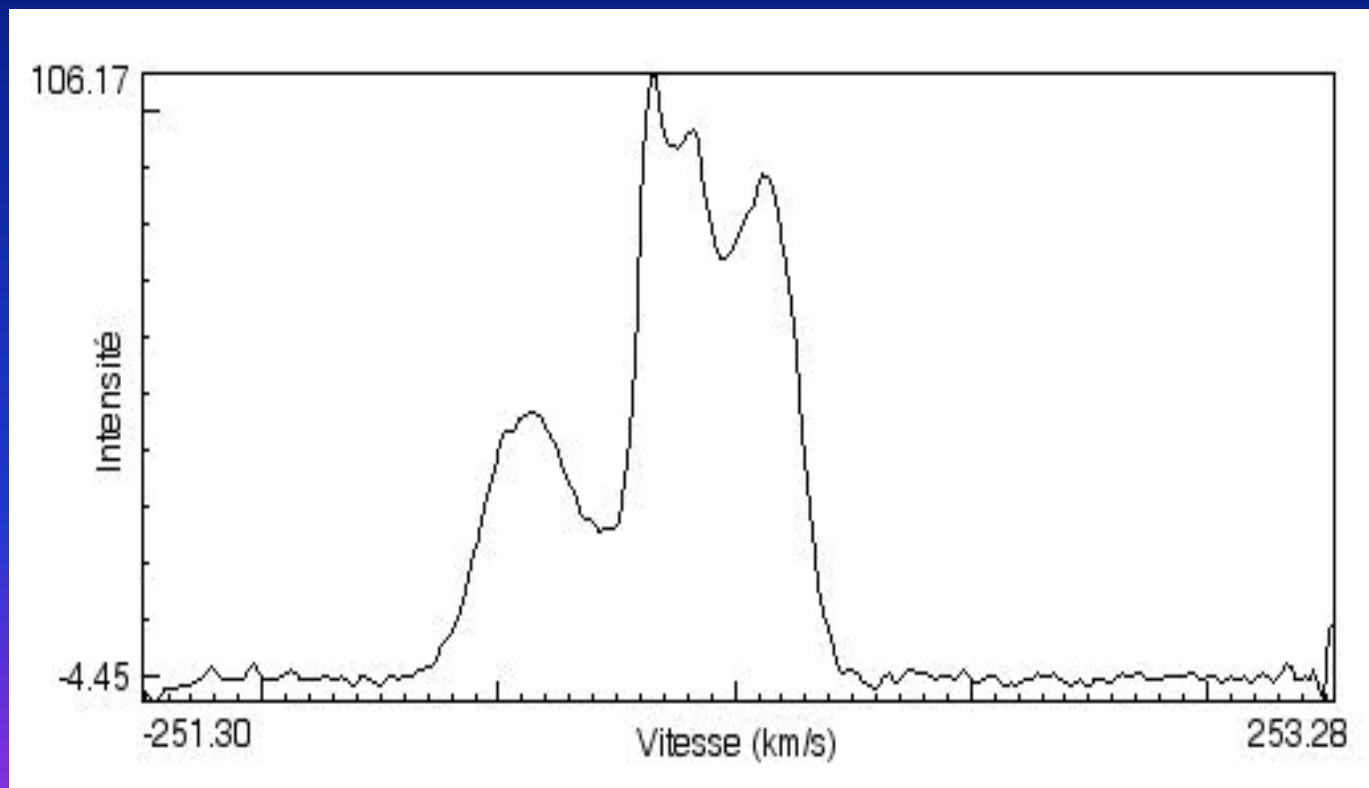
$$V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin l$$

$$a + b + 90 = 180 ; b = 90 - a, a = 90 - b = 90 - (90 - a) = a ; a = a$$

$$CT = R_0 \sin l = R \cos \alpha$$

$$V_r = V \cdot R_0 / R \sin l - V_0 \sin l$$

Στην I_{os} μπορεί να υπάρχουν πολλά νέφη που συνεισφέρουν στην παρατηρούμενη ταχύτητα. Το νέφος στο εφαπτόμενο σημείο είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη ταχύτητα ($\alpha=0$) $V_{r,\text{max}}$ και είναι αυτή που λαμβάνουμε υπ' όψιν.



Κάνουμε τις απαραίτητες απλοποιήσεις εκφράζοντας το R_t σαν συνάρτηση των R_0 και l , και την V_t σαν συνάρτηση των $V_{r,max}$, V_0 , l .

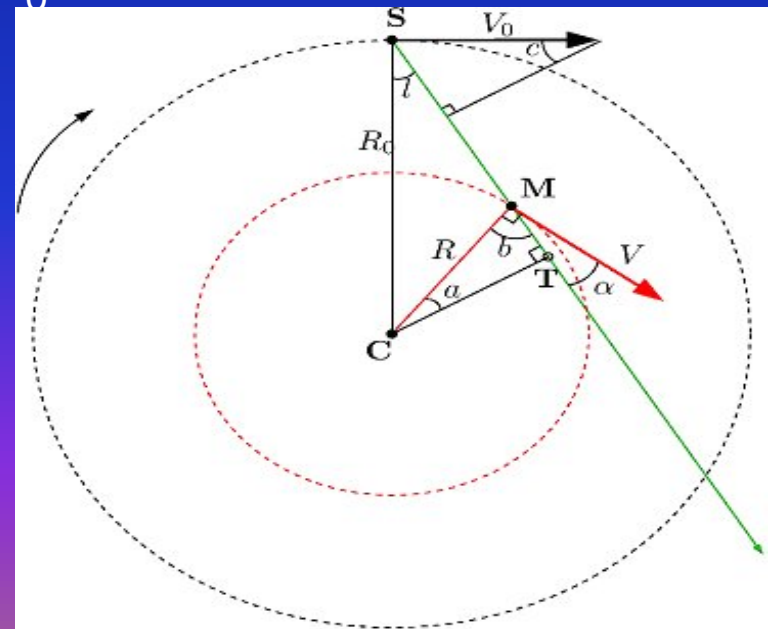
Στο εφαπτόμενο σημείο το σημείο M συμπίπτει με το σημείο T και
 $R_t = R_0 \sin l$

Επίσης $\alpha = 0$, επομένως: $(R_0 \sin l = R \cos \alpha \Rightarrow) R_0 \sin l / R = 1$

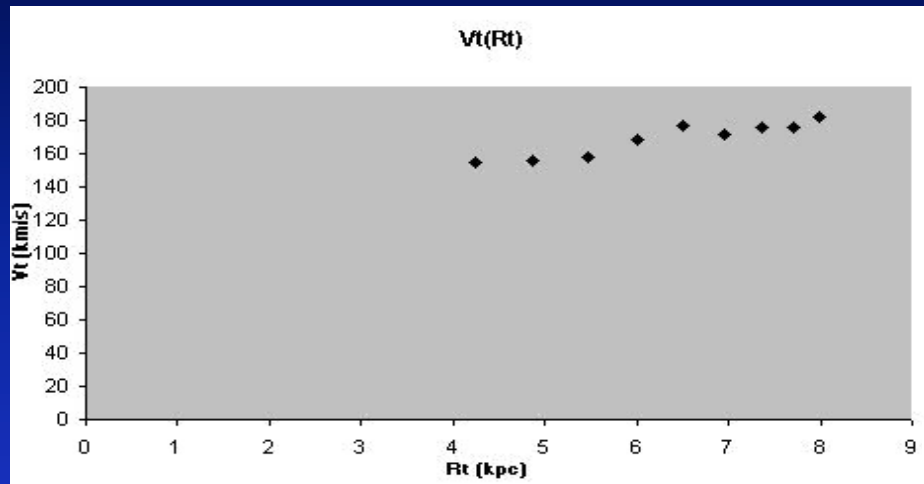
$(V_r = V \cdot R_0 / R \sin l - V_0 \sin l \Rightarrow) V_r = V_t - V_0 \sin l$

$\Rightarrow$

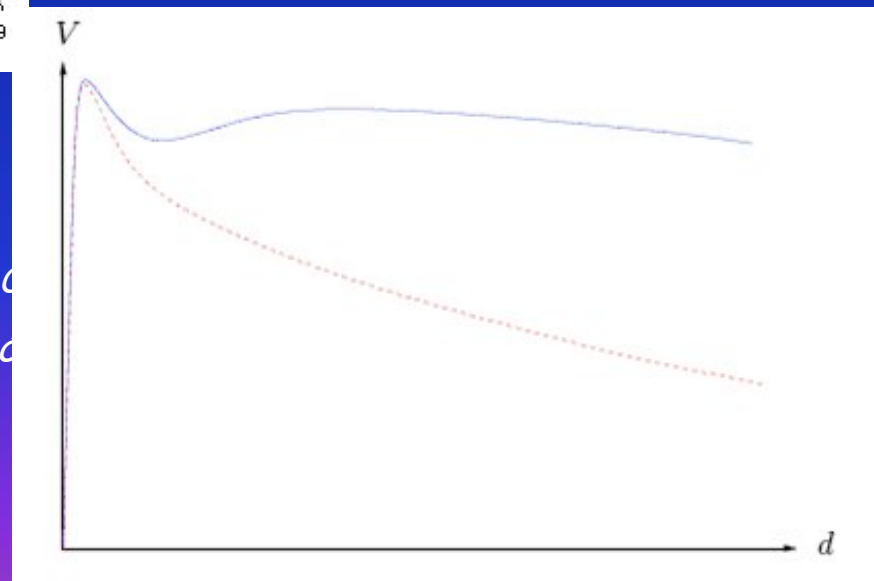
$V_t = V_{r,max} + V_0 \sin l$

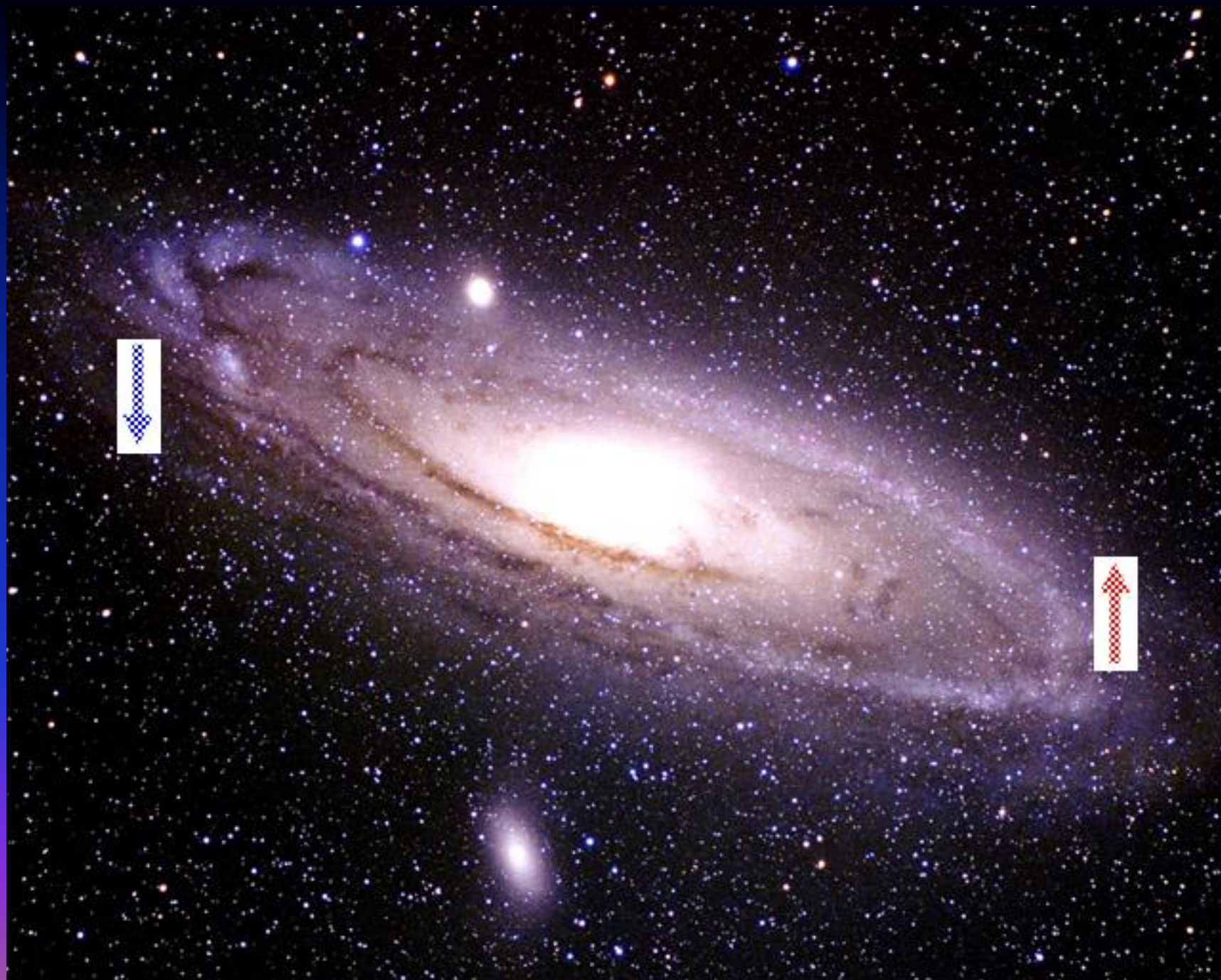


Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία σε πολλά Γαλαξιακά μήκη και στη συνέχεια κατασκευάζουμε την καμπύλη $V_t(R_t)$.



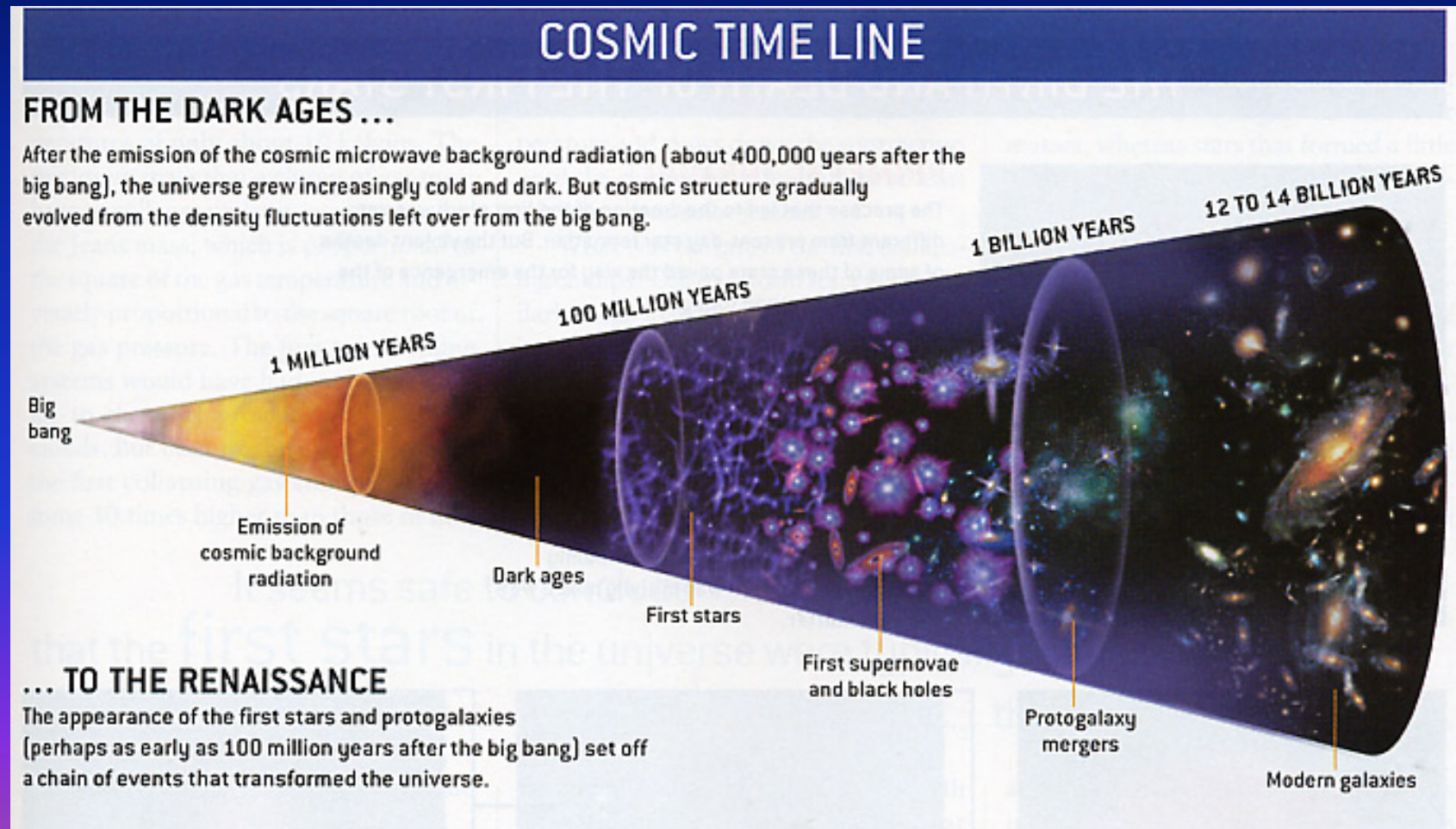
Καμπύλη περιστροφής του
σε σχέση με την αναμενόμενη

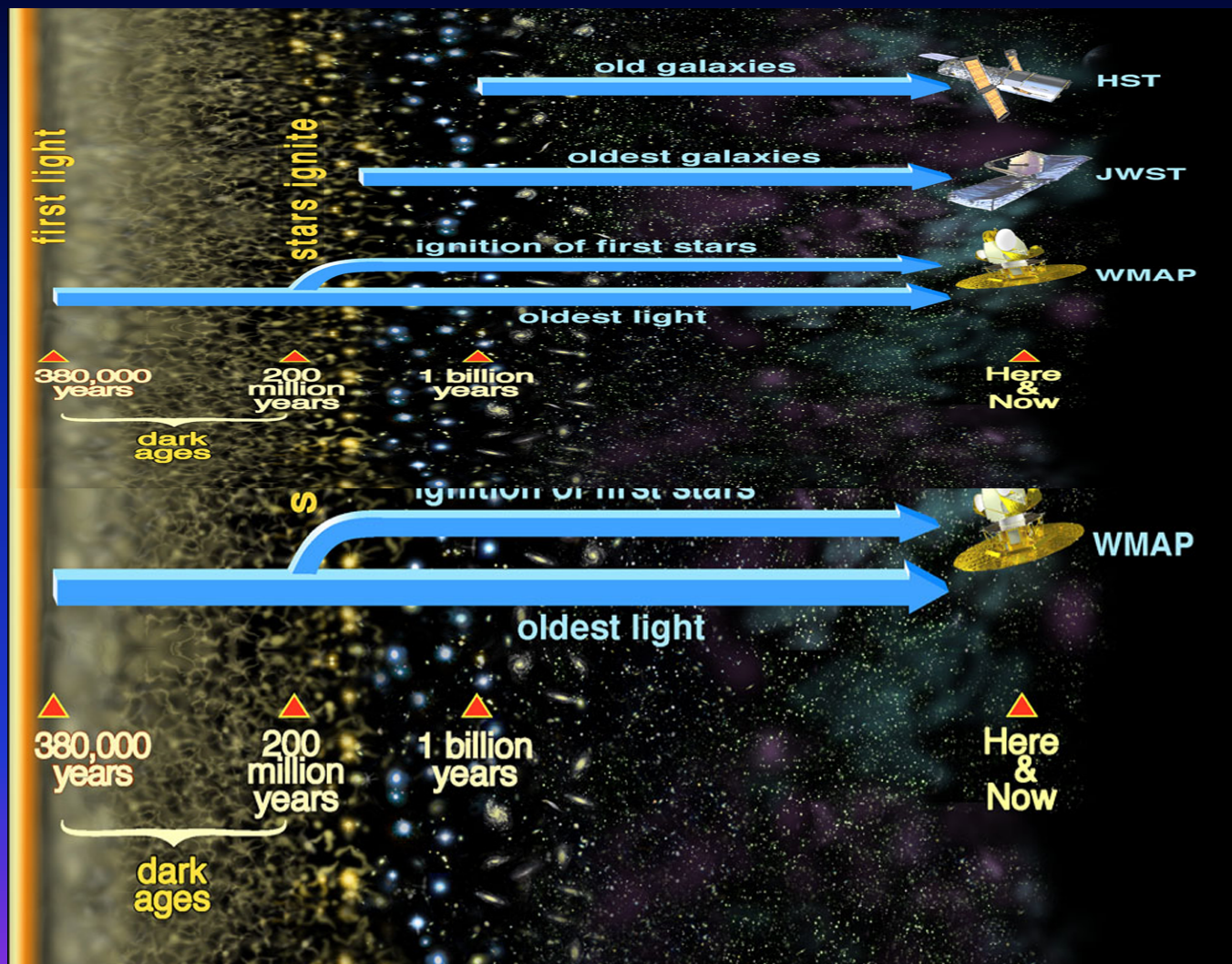




Το μέλλον ?

Παράλληλα με την γνώση από τους επιταχυντές θα αποκομίσουμε νέα γνώση για την Σωματιδιακή Φυσική από την εξερεύνηση του Σύμπαντος και θα χρησιμοποιήσουμε την Σωματιδιακή Φυσική για να κατανοήσουμε το Σύμπαν





Hands-on Universe: Αστρονομία στην τάξη
www.euhou.net

Ευρωπαϊκό Δίκτυο Πλανητολόγων
www.europlanet-eu.org

Πληροφορίες:
echatz@space.noa.gr