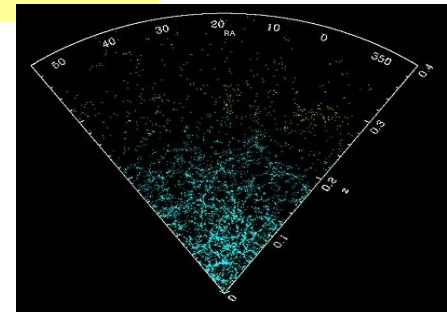
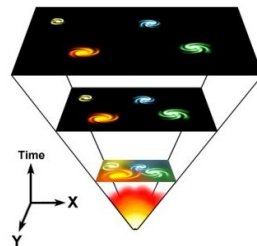


Σύγχρονη Κοσμολογία:

Η Δημιουργία και η Εξέλιξη του Σύμπαντος

Λέανδρος Περιβολαρόπουλος
Καθηγητής Παν/μίου Ιωαννίνων

<http://cosmology.physics.uoi.gr>



Βασικά Θέματα

Κλίμακες της Φύσης – Βασικά Ερωτήματα Κοσμολογίας

Ορισμός Κοσμολογίας – Βασική Θεωρία

Κοσμικές Παρατηρήσεις: Κοσμικό Υπόβαθρο Ακτινοβολίας – Σκοτεινή Ύλη

Διαστολή Σύμπαντος – Νόμος Hubble

Επιταχυνόμενη Διαστολή – Κοσμολογική Σταθερά

Συστατικά του Σύμπαντος - Σύνοψη - Βιβλιογραφία

Οι κλίμακες της Φύσης

Απόσταση
Γαλαξιών

Απόσταση
Αστέρων

Ηλιακό
Σύστημα

Γή

Κύτταρα

Ατομα

Πρωτόνια-
quarks

$> 10^{22} m \sim 1 Mpc$

$10^{16} m$

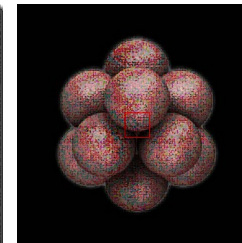
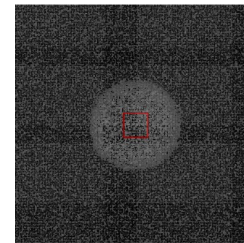
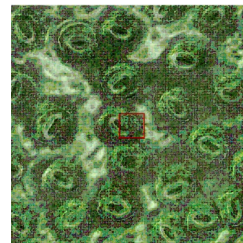
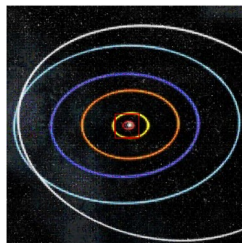
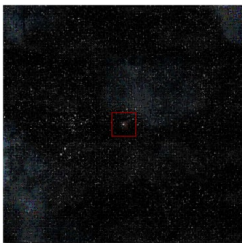
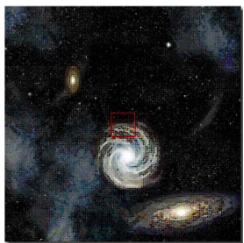
$10^{13} m$

$10^7 m$

$10^{-5} m$

$10^{-11} m$

$10^{-16} m$



Αστροφυσική

Βιολογία

Πυρηνική
Φυσική

Κοσμολογία

Γεωλογία-
Φυσική
Περιβάλλοντος

Φυσική Στερεάς-
Ατομική
Μοριακή Φυσική

Φυσική
Στοιχειωδών
Σωματιδίων

Γνωστοί Φυσικοί Νόμοι: Νέες Εφαρμογές

Σύνορα της Γνώσης: Νέοι Φυσικοί Νόμοι

Βασικά Ερωτήματα Κοσμολογίας

Ποια είναι τα συστατικά του Σύμπαντος?

Υπήρξε 'Αρχή' στον Χώρο και στον Χρόνο?

Γιατί το Σύμπαν είναι Ομογενές και Ισοτροπικό σε μεγάλες κλίμακες?

Θα υπάρξει 'Τέλος' στην ύπαρξη του Σύμπαντος?

Τι προκάλεσε την δημιουργία 'Δομών' στο Σύμπαν?

Πως δημιουργήθηκαν οι πυρήνες των ελαφρών στοιχείων από τα πρωτογενή πρωτόνια?

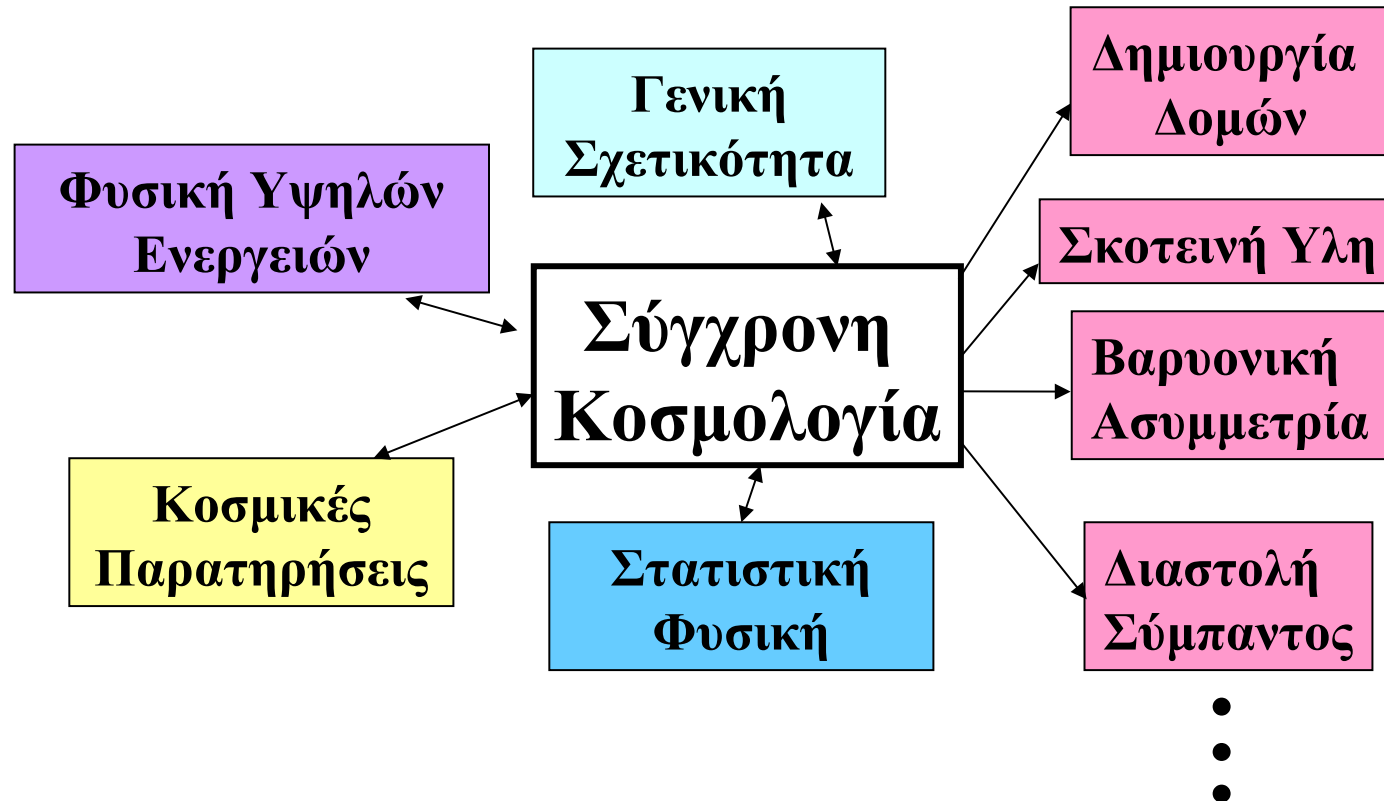
Γιατί ο Χώρος σε μεγάλες κλίμακες διαστέλλεται?

Γιατί η διαστολή αυτή επιταχύνεται αντί να επιβραδύνεται από την βαρυτική έλξη μεταξύ των κοσμικών σωμάτων?

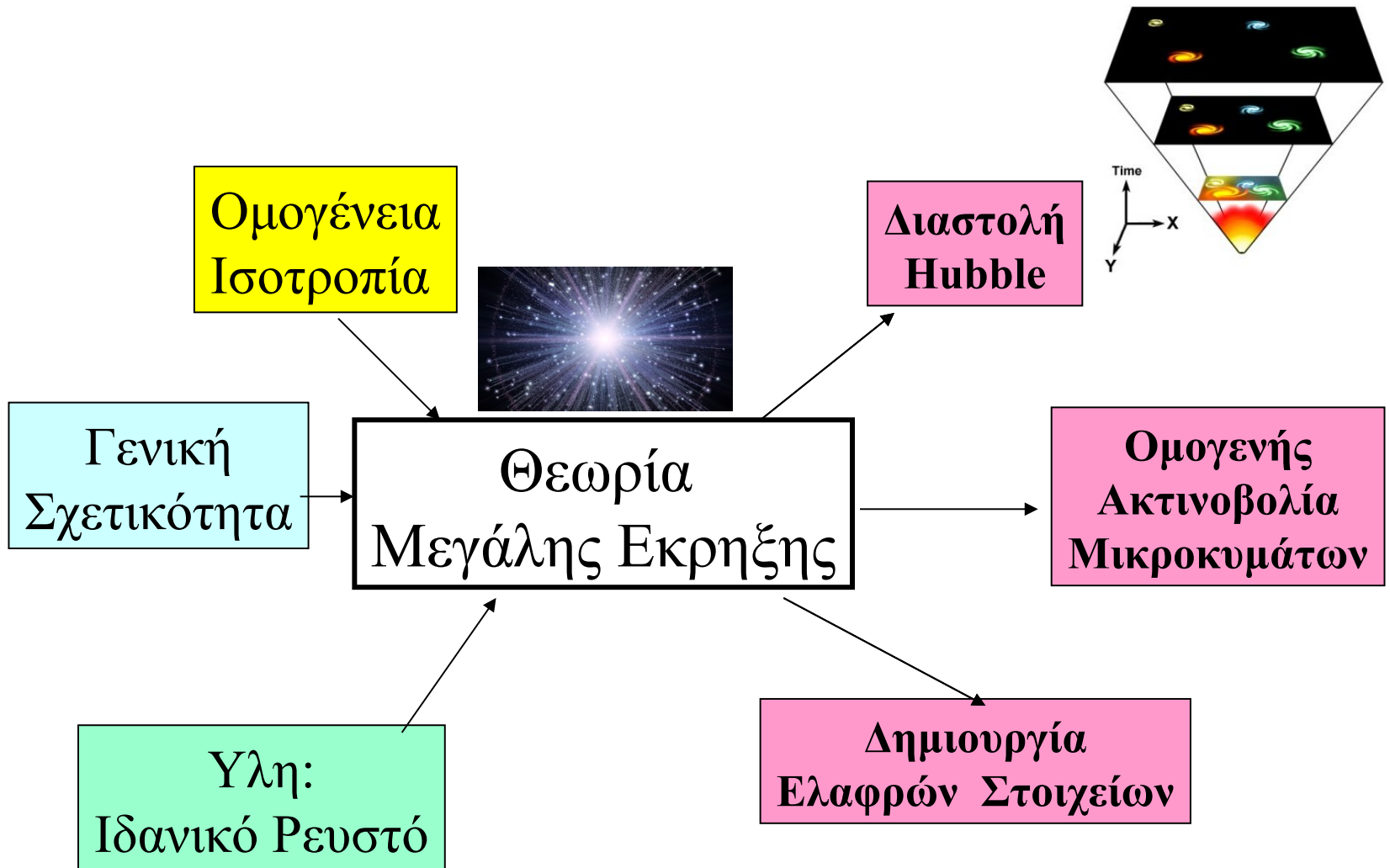
Τι είναι 'Κοσμολογία';

Σύγχρονη Κοσμολογία:

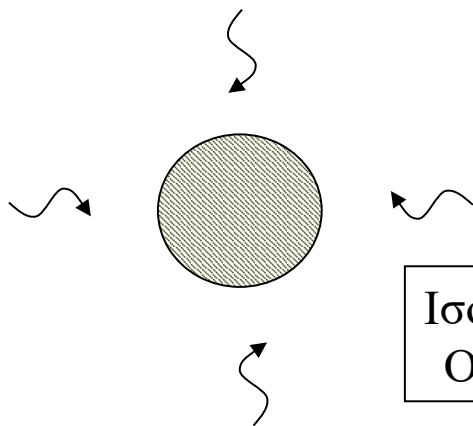
Ο τομέας της Φυσικής που έχει σαν στόχο την κατανόηση της Εξέλιξης και της Δημιουργίας του Σύμπαντος στα πλαίσια Φυσικών Νόμων.



Βασική Θεωρία

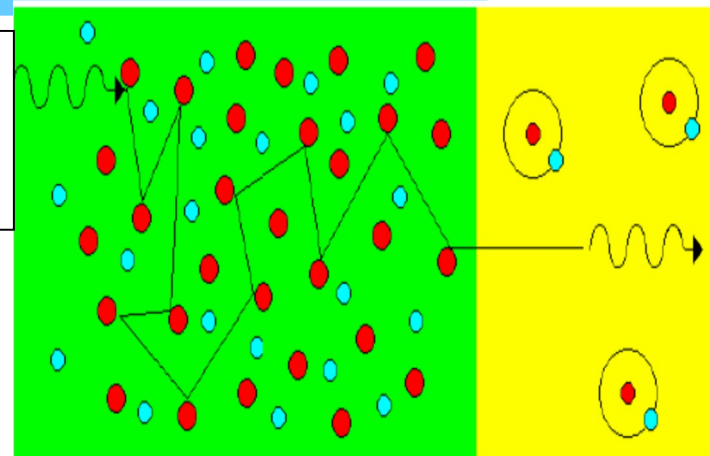


Κοσμικές Παρατηρήσεις Ι: Κοσμικό Υπόβαθρο Μικροκυμάτων

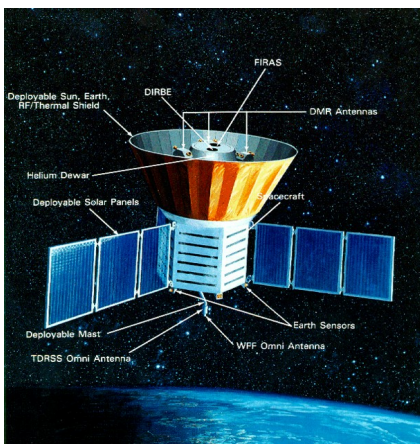


Ισοτροπία και
Ομοιογένεια

Προέλευση Υποβάθρου
Μικροκυμάτων:
Αποσύζευξη φωτονίων
μετά την δημιουργία ατόμων

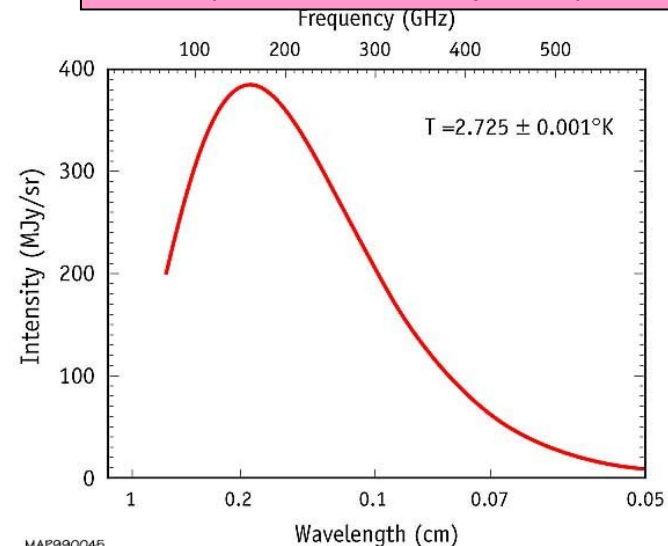


Δορυφόρος COBE

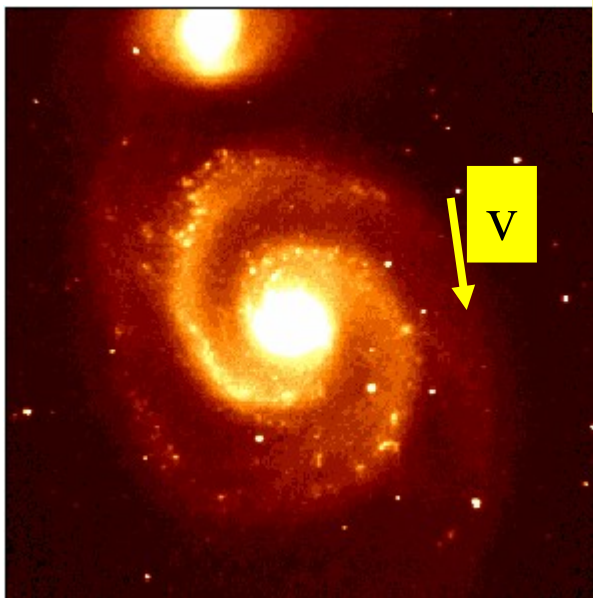


$$\frac{\delta T}{T} \approx O(1)$$

Φάσμα Μέλανος Σώματος



Κοσμικές Παρατηρήσεις II: Σκοτεινή Ύλη



Στο Σύμπαν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες ύλης που δεν ακτινοβολεί σε κανένα μήκος κύματος

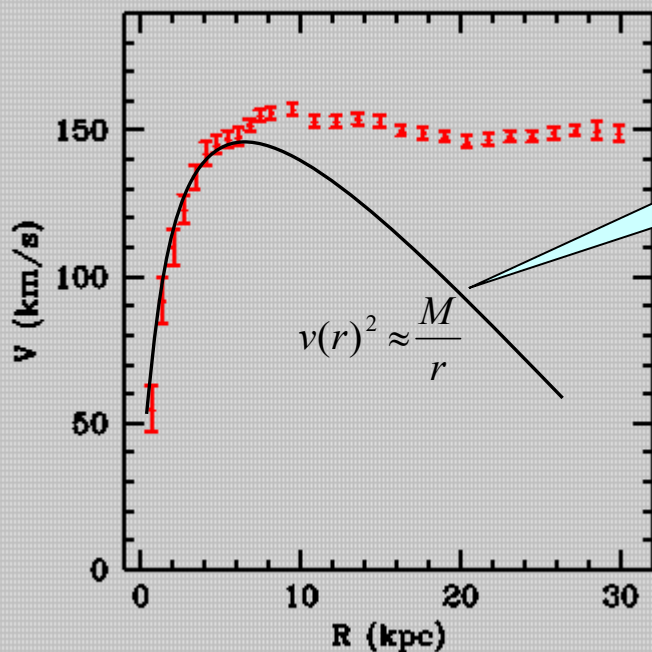
$$\frac{GM(r)}{r^2} = \frac{v^2}{r} \Rightarrow M(r) \sim v^2 r \Rightarrow v^2 \sim \frac{M}{r}$$

Παρατηρήσεις:

$$v(r) = \text{σταθ} \Rightarrow M(r) \approx r$$

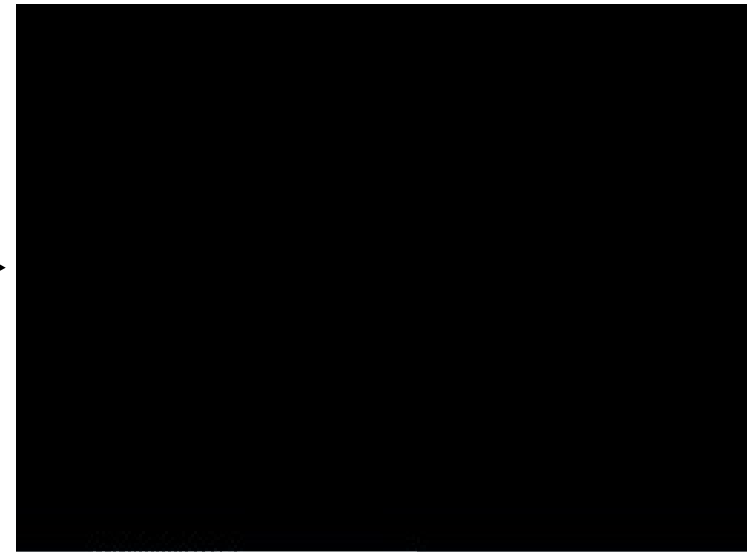
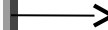
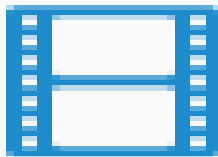
Υπάρχει μή ορατή ύλη

Μετρήσεις Κινηματικής:
Τουλάχιστον 90% της ύλης του Σύμπαντος είναι Σκοτεινή Ύλη άγνωστης μορφής.



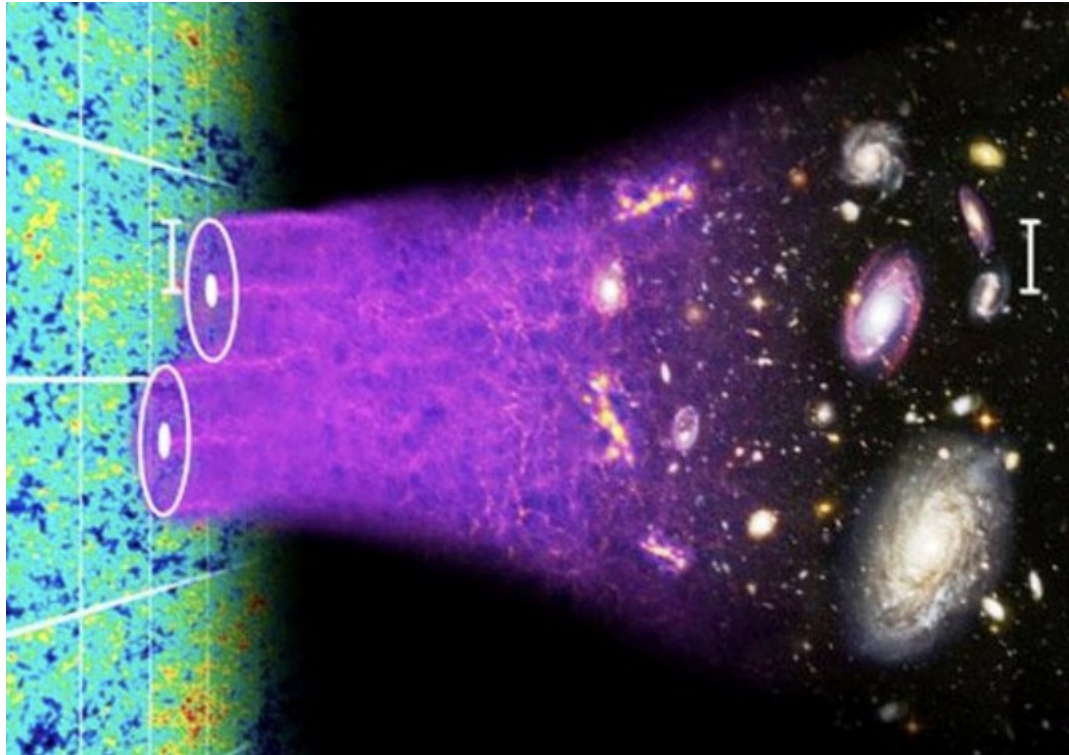
Αναμενόμενη Καμπύλη
αν δεν υπήρχε
Σκοτεινή Ύλη

Κοσμικές Παρατηρήσεις: Ο χάρτης των κοσμικών διαταραχών από τον δορυφόρο WMAP



**Η δημιουργία δομών στο Σύμπαν προήλθε από τις
πρωτογενείς διαταραχές που φαίνονται στο
Κοσμικό Υπόβαθρο Μικροκυμάτων**

Κοσμικές Παρατηρήσεις: Ο χάρτης των κοσμικών διαταραχών από τον δορυφόρο WMAP

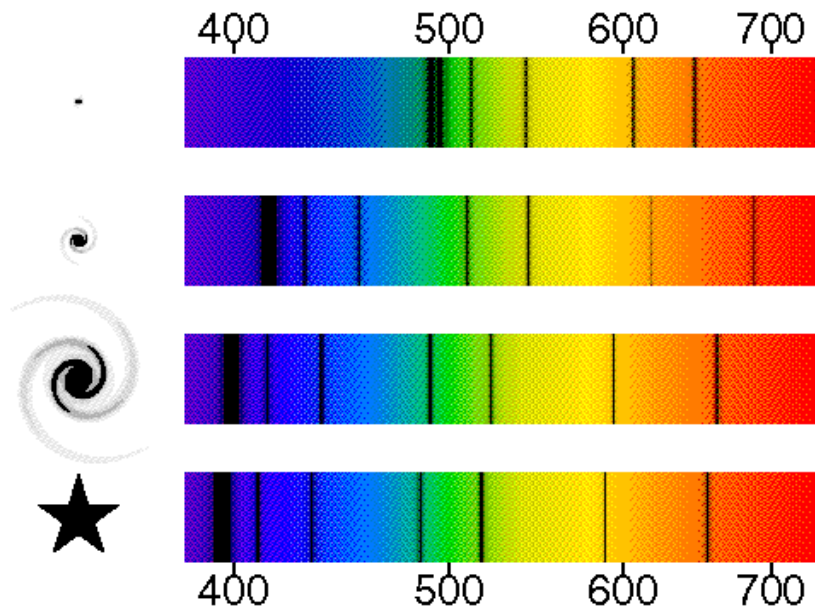


**Η δημιουργία δομών στο Σύμπαν προήλθε από τις
πρωτογενείς διαταραχές που φαίνονται στο
Κοσμικό Υπόβαθρο Μικροκυμάτων**

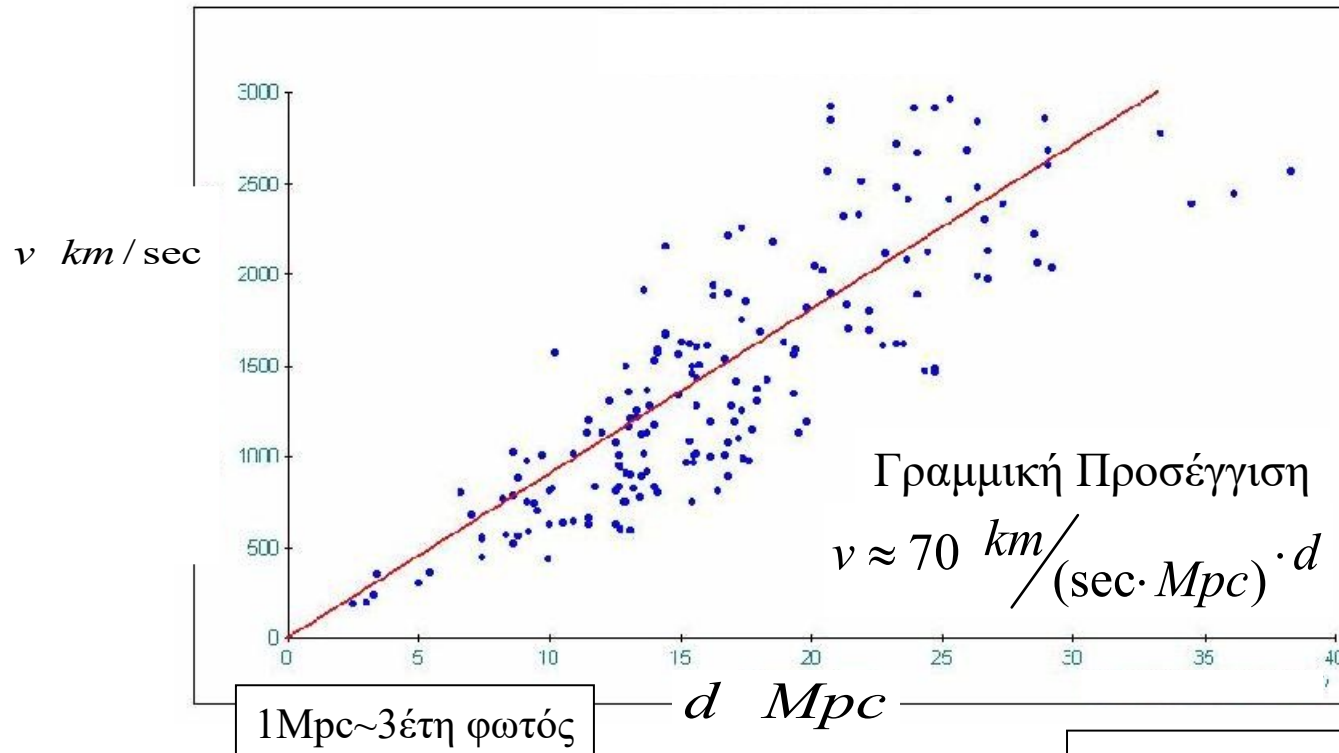
Κοσμικές Παρατηρήσεις III: Η Διαστολή Hubble



Edwin Hubble (1929):
Οι Γαλαξίες Απομακρύνονται με
ταχύτητες Ανάλογες της Απόστασης
τους από την Γή.



Νόμος του Hubble



$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c} = \frac{H_0}{c} d \rightarrow v = H_0 d$$

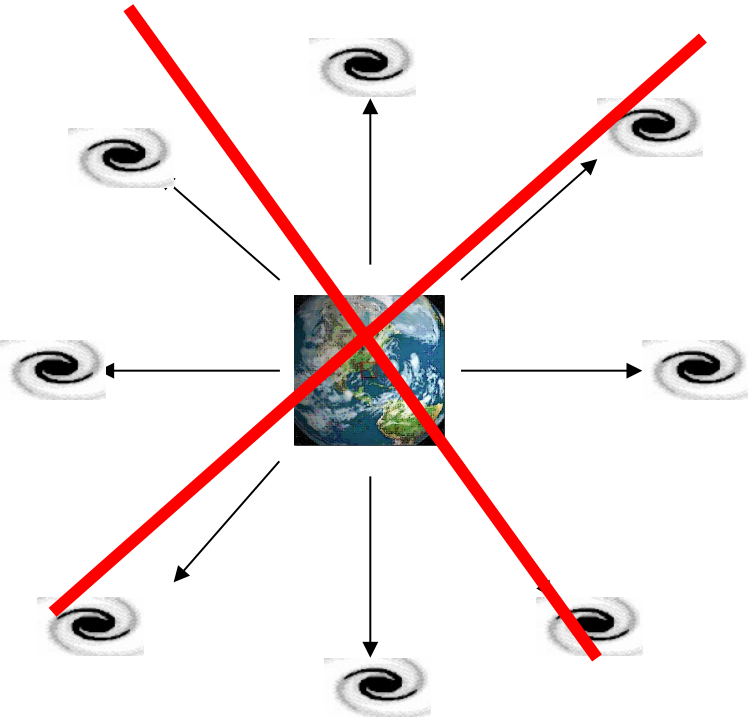
Σταθερά του Hubble

$$H_0 = 100h \text{ km}/(\text{sec Mpc}) \quad \text{όπου } h \in [0.6, 0.8]$$

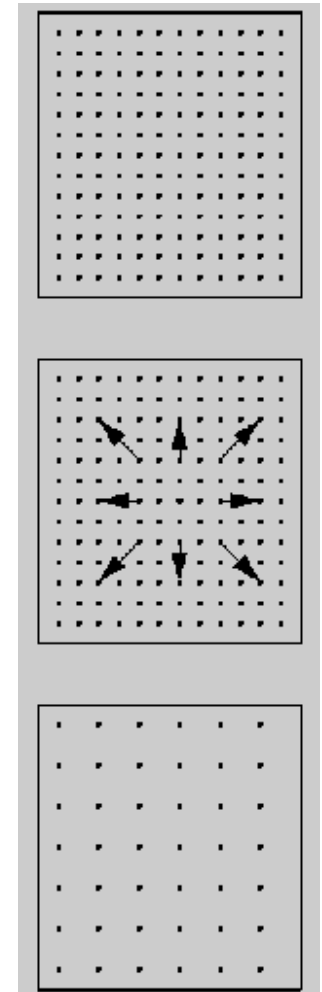
$$H_0^{-1} \approx 10^{10} h^{-1} \text{ έτη}$$

Ερμηνεία της Διαστολής Hubble

A. Γεωκεντρική

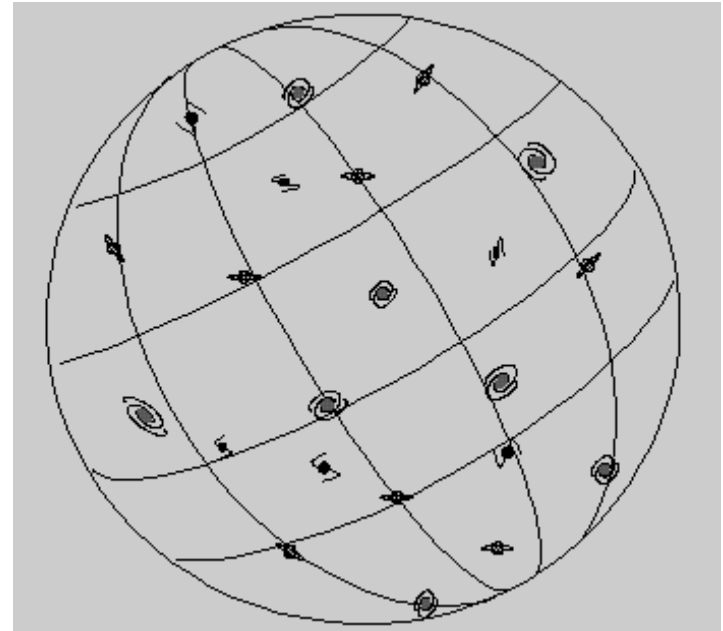
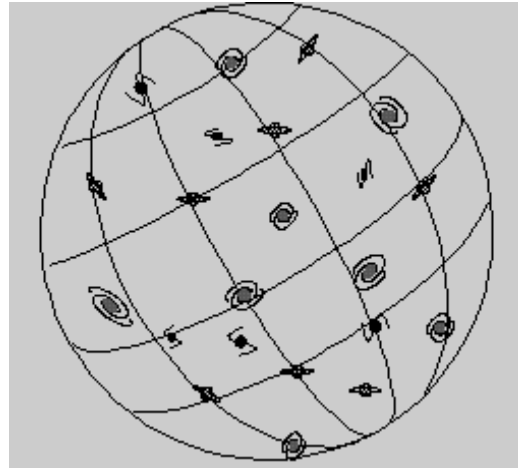
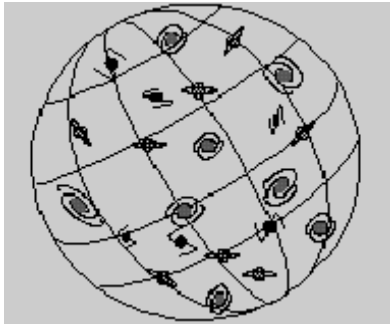


B. Διαστολή Χώρου

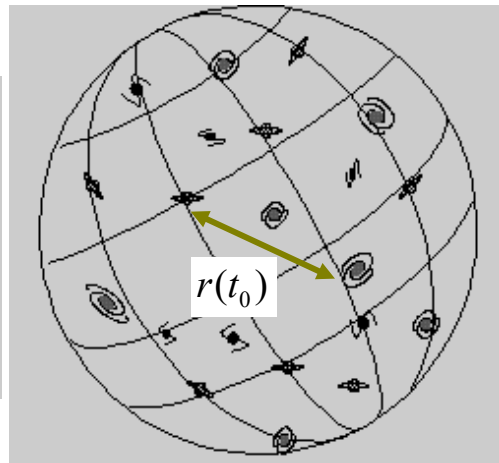
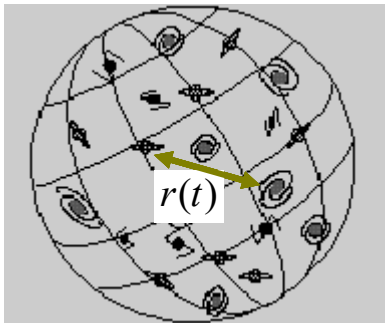


Περιγραφή Διαστολής Χώρου: Ο παράγοντας διαστολής $a(t)$

Ομοιότητα με Διαστελόμενο Μπαλόνι:



Ποσοτική Περιγραφή Διαστολής:



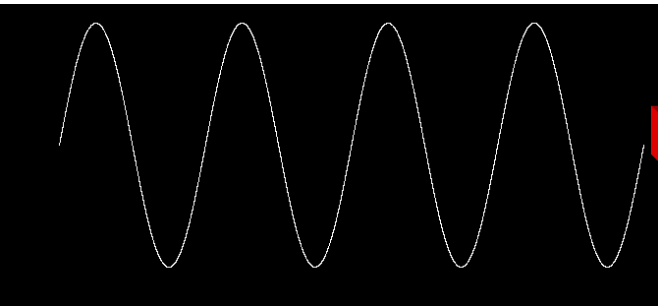
Φυσική Απόσταση

$$r(t) = a(t) r(t_0)$$

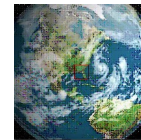
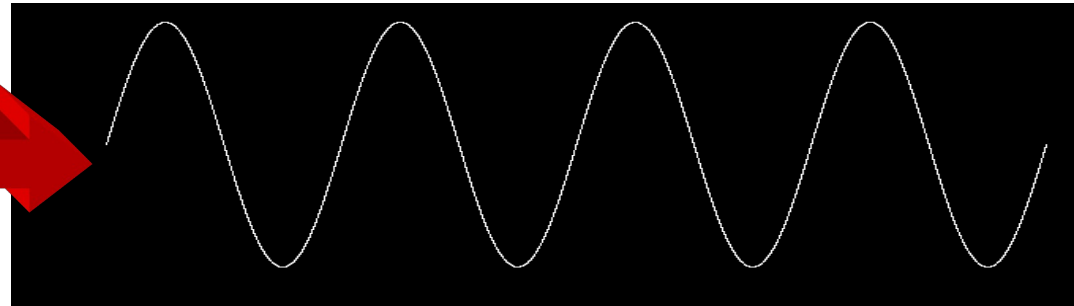
Παράγοντας Διαστολής
(γεωμετρία)

Ο παράγοντας διαστολής $a(t)$ και η ερυθρά μετατόπιση

$$\lambda \sim a(t)$$



$$\lambda_0 \sim a(t_0)$$



$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{a(t_0)}{a(t)} = 1 + z$$

Νόμος Hubble

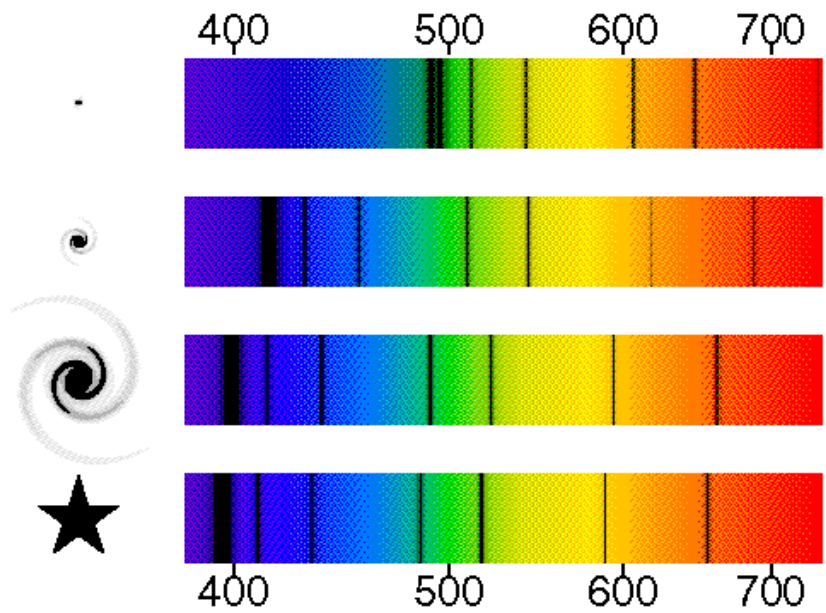
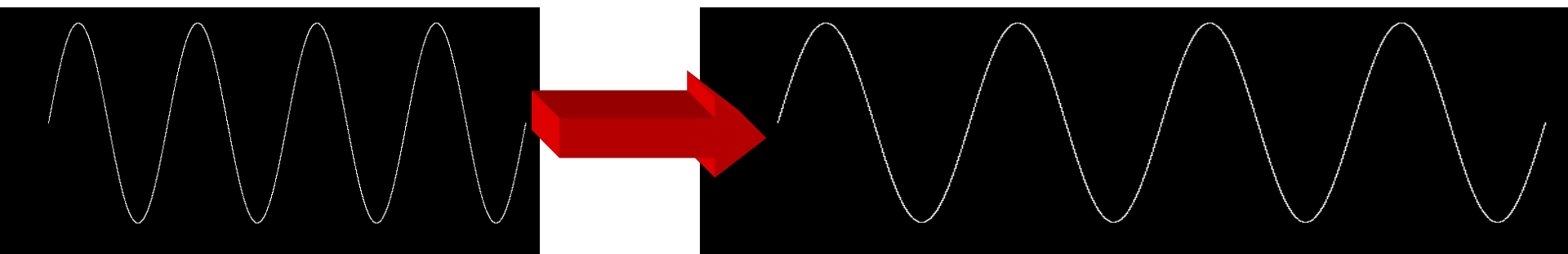
$$c z = H_0 d$$

Φωτόνια από μακρινότερους γαλαξίες έχουν μεγαλύτερη ερυθρά μετατόπιση

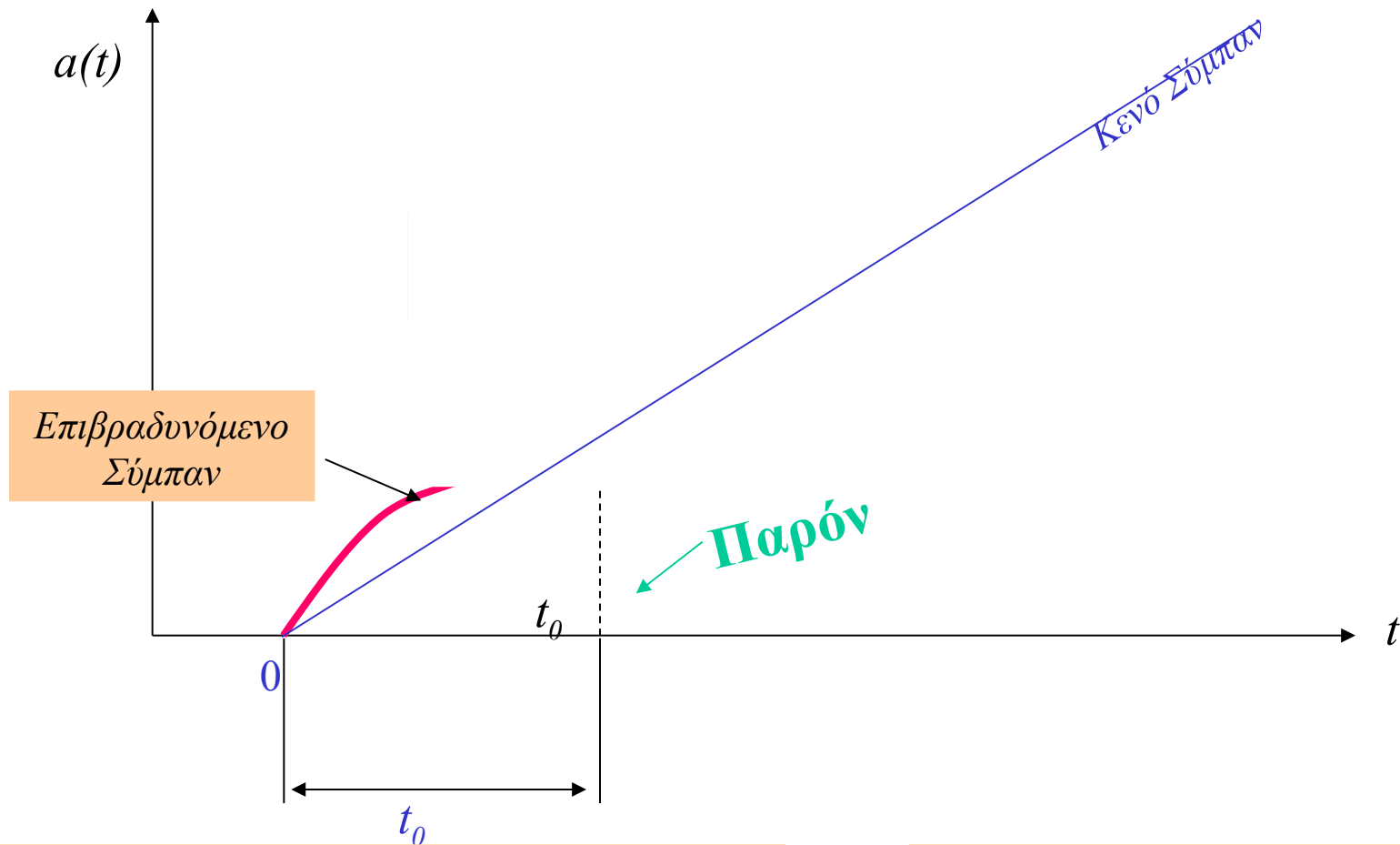
Νόμος Hubble (1929): Το Σύμπαν Διατέλλεται

$$\lambda \sim a(t)$$

$$\lambda_0 \sim a(t_0)$$



Η παρατηρούμενη εξέλιξη του $a(t)$

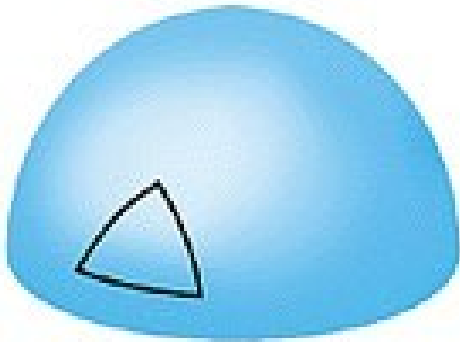


Επιβραδυνόμενη διαστολή λόγω ελκτικής βαρύτητας ύλης

Επιταχυνόμενη διαστολή λόγω ???

Γιατί η διαστολή του σύμπαντος επιταχύνεται?

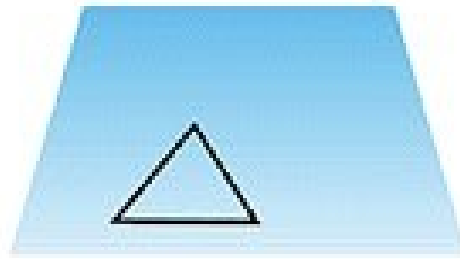
Η έννοια της καμπυλότητας του χώρου



Θετική Καμπυλότητα
(σφαίρα)

$k=+1$

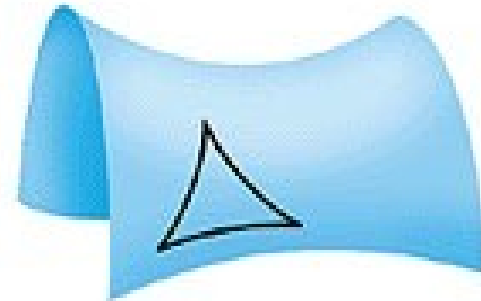
Κλειστό Σύμπαν



Μηδενική Καμπυλότητα
(επίπεδο)

$k=0$

Επίπεδο Σύμπαν

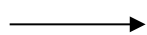


Αρνητική Καμπυλότητα
(υπερβολοειδές)

$k=-1$

Ανοικτό Σύμπαν

$(a(t), k)$



Γεωμετρία Ομογενούς-Ισοτροπικού Χώρου
πλήρως καθορισμένη!

Εξέλιξη του Παράγοντα Διαστολής: Θεωρητικές Προβλέψεις

Εξίσωση Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

+

Ομοιογένεια, Ισοτροπία ($\kappa, a(t)$)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

\dot{a} ρυθμός αύξησης του a

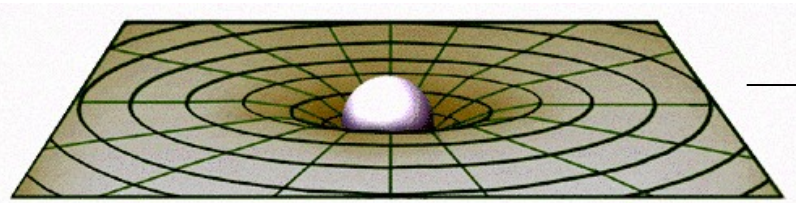
\ddot{a} → επιτάχυνση αύξησης του a

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{\kappa c^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

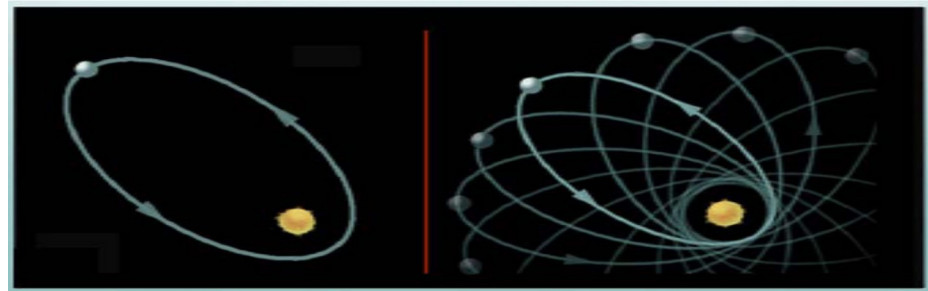
Εξισώσεις Friedman

Γεωμετρία

Ενέργεια-Ύλη



Καμπύλωση χώρου



Newton: Ελλειπτικές τροχιές πλανητών

Einstein: Μετάπτωση περιηλίου πλανητών

Το αίνιγμα της Σκοτεινής Ενέργειας

Εξίσωση Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

+

Ομοιογένεια, Ισοτροπία ($k, a(t)$)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

\dot{a} → χρονική παράγωγος του a

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\kappa c^2}{a^2}$$

Εξισώσεις Friedman

Γεωμετρία

Ενέργεια-Ύλη

Επιταχυνόμενη Διαστολή:

$$\frac{\ddot{a}}{a} > 0$$

$\rho < 0$ είτε $p < 0$ → Σκοτεινή Ενέργεια

Δεν ισχύει η Γενική Σχετικότητα σε μεγάλες αποστάσεις και η βαρύτητα γίνεται απωστική (αντιβαρύτητα)!

Και οι δύο πιθανότητες ανοίγουν συναρπαστικές προοπτικές για ανακάλυψη νέων θεμελιωδών νόμων

Κοσμολογική Σταθερά: Η απλούστερη προσέγγιση

- Einstein (1915) Γενική Σχετικότητα: $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

Επιτάχυνση παράγοντα διαστολής

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

- Κοσμολογική Σταθερά + Ύλη:

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$$V(r) = -\frac{GM}{r} - \frac{\Lambda r^2}{6}$$

Κοσμολογική Σταθερά

κοσμική άπωση ($p=-\rho$)

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho_m + \frac{3p_m}{c^2} \right) - \frac{4\pi G}{3} \left(\rho_\Lambda - \frac{3\rho_\Lambda}{c^2} \right) = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho_m + \frac{3p_m}{c^2} \right) + \frac{4\pi G}{3} (2\rho_\Lambda)$$

Κοσμολογική Σταθερά: Η απλούστερη προσέγγιση

- Einstein (1915) Γενική Σχετικότητα: $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

- Einstein (1917) Γ.Σ. + Στατικό Σύμπαν + Ύλη:

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$$V(r) = -\frac{GM}{r} + \frac{\Lambda r^2}{6}$$

Κοσμολογική Σταθερά

κοσμική άπωση ($p=-\rho$)

Μετά ήρθε:

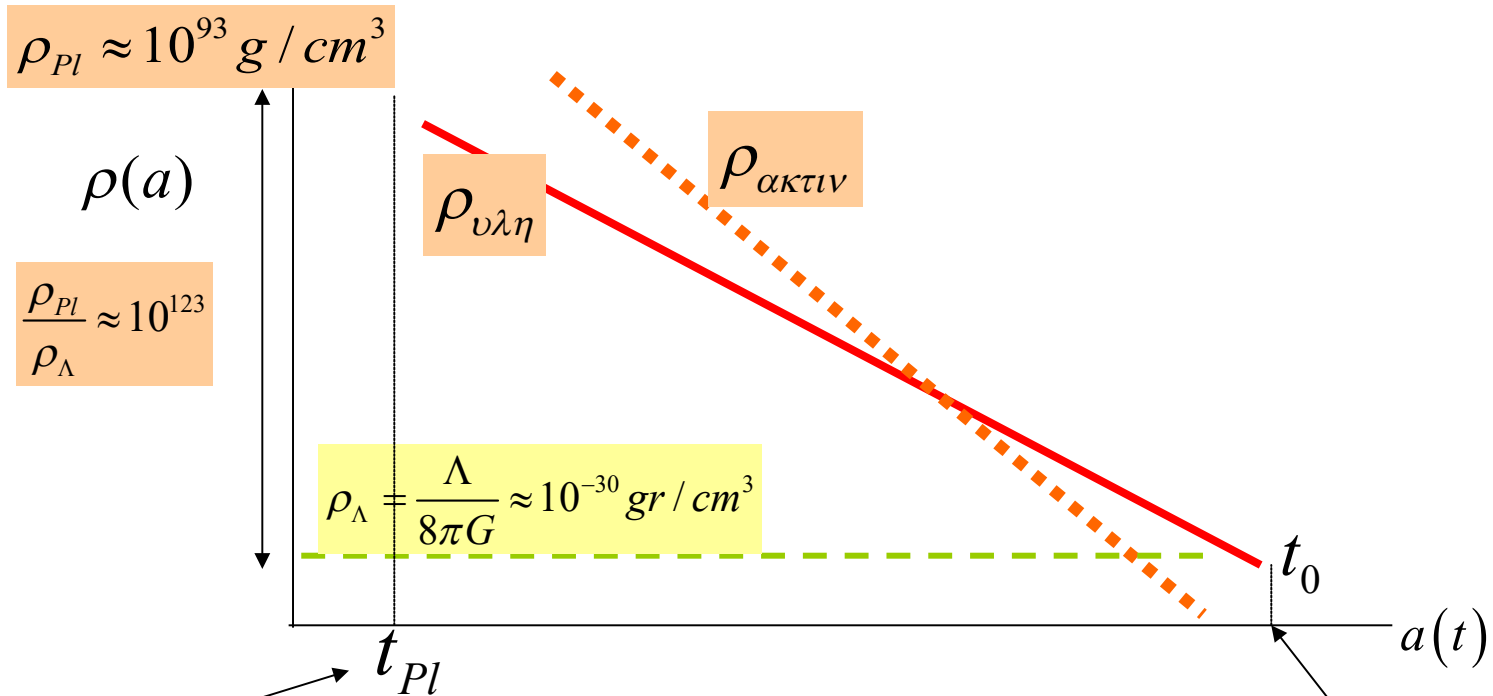
Η ανακάλυψη του Hubble (1929)

Το μεγαλύτερο λάθος της ζωής μου

Einstein

Πρόβλημα της Κοσμολογικής Σταθεράς

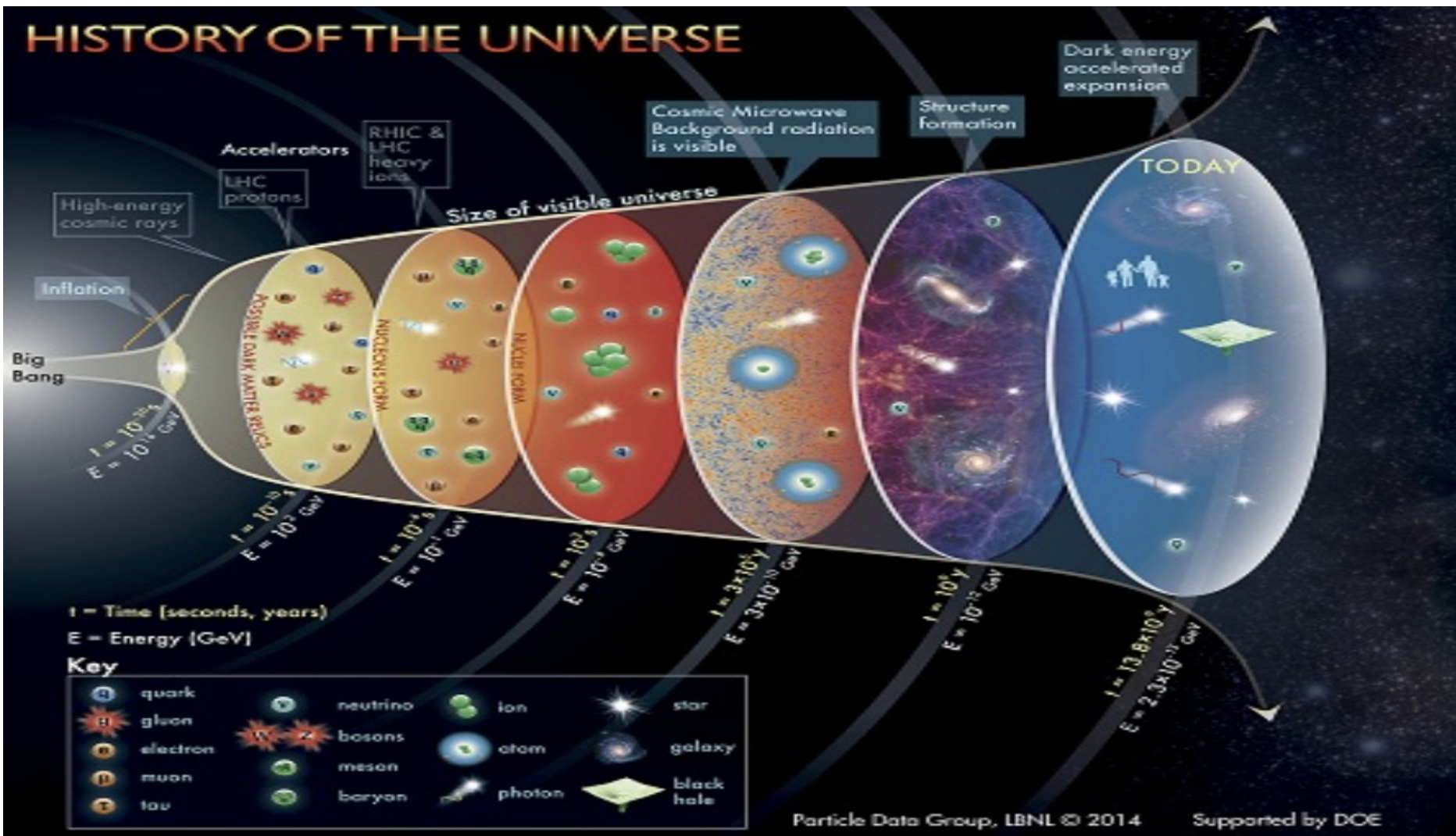
Δεν υπάρχει κανένα γνωστό θεωρητικό μοντέλο που να προβλέπει κατά φυσικό τρόπο την ύπαρξη τόσο μικρής κοσμολογικής σταθεράς!



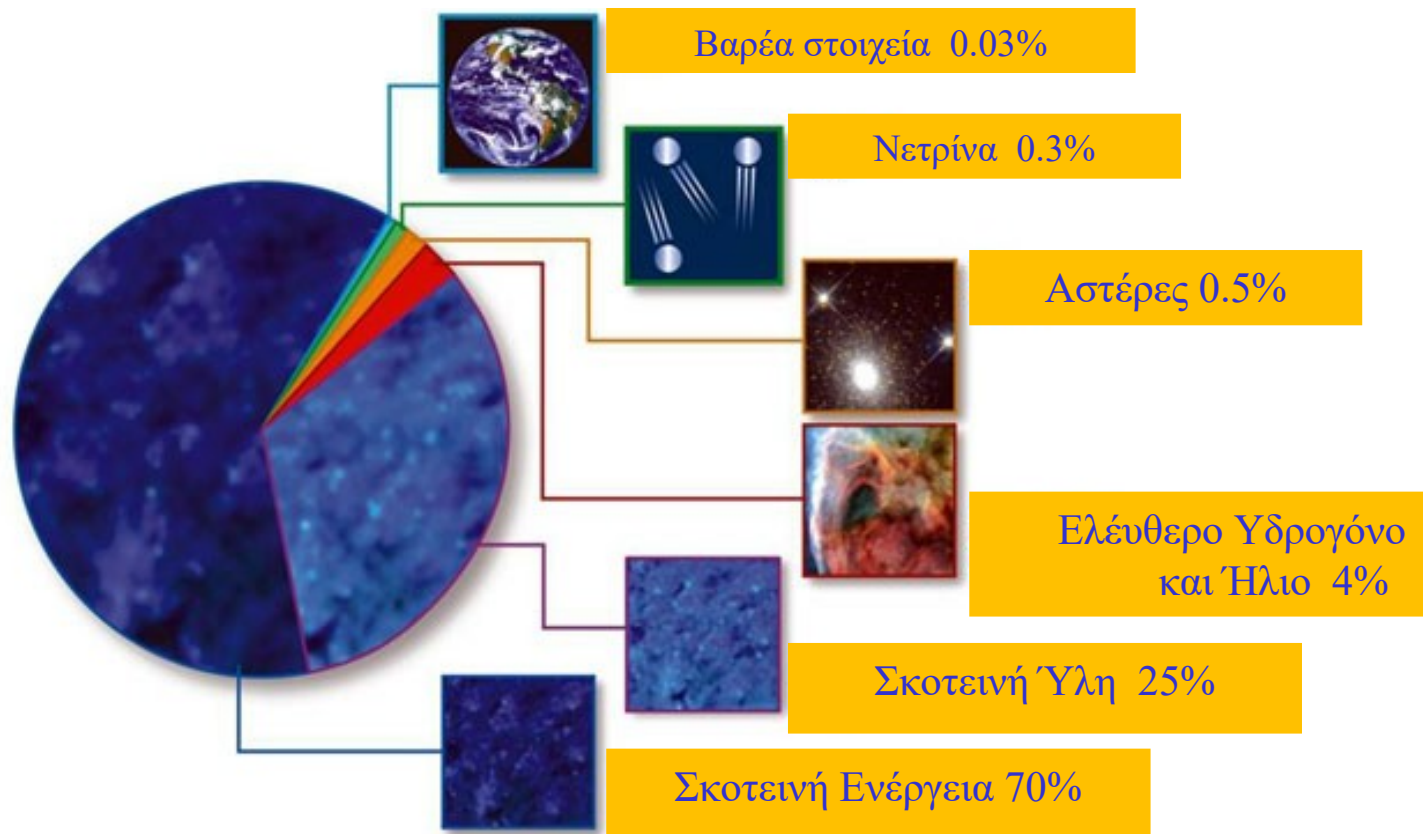
Αρχή κλασσικής εξέλιξης του Σύμπαντος

Παρόν

Η εξέλιξη του Σύμπαντος



Τα συστατικά του σύμπαντος



Σύνοψη

Η Σύγχρονη Κοσμολογία είναι ένας από τους δύο θεμελιώδεις τομείς της φυσικής που ερευνούν στα όρια της ανθρώπινης γνώσης και στοχεύουν στην ανακάλυψη νέων θεμελιωδών νόμων της Φύσης

Η ανακάλυψη της επιταχυνόμενης διαστολής του Σύμπαντος το 1998 ανέτρεψε ριζικά την κατανόηση μας σχετικά με το ενεργειακό περιεχόμενο του Σύμπαντος και ίσως ανατρέψει και την κατανόηση που έχουμε για τους νόμους που διέπουν την βαρυτική αλληλεπίδραση.

Βιβλιογραφία

A. Liddle: An Introduction to Modern Cosmology, Willey 2003

B. Ryden: Introduction to Cosmology, Ad. Wesley 2003