

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by Vincent van Gogh. It depicts a swirling, turbulent night sky filled with stars and a crescent moon, viewed from a hill overlooking a small village with a prominent church spire. A dark, jagged cypress tree stands in the foreground on the left.

Εισαγωγή στην Κοσμολογία II

Μιχάλης Κορατζίнос

CERN

Θέματα συζήτησης

Σε αυτή τη διάλεξη θα αναφερθώ σε ένα μικρό αριθμό από επιλεγμένα θέματα από την κοσμολογία:

- Το big bang
- Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB)
- Σκοτεινή ενέργεια
- Σκοτεινή ύλη

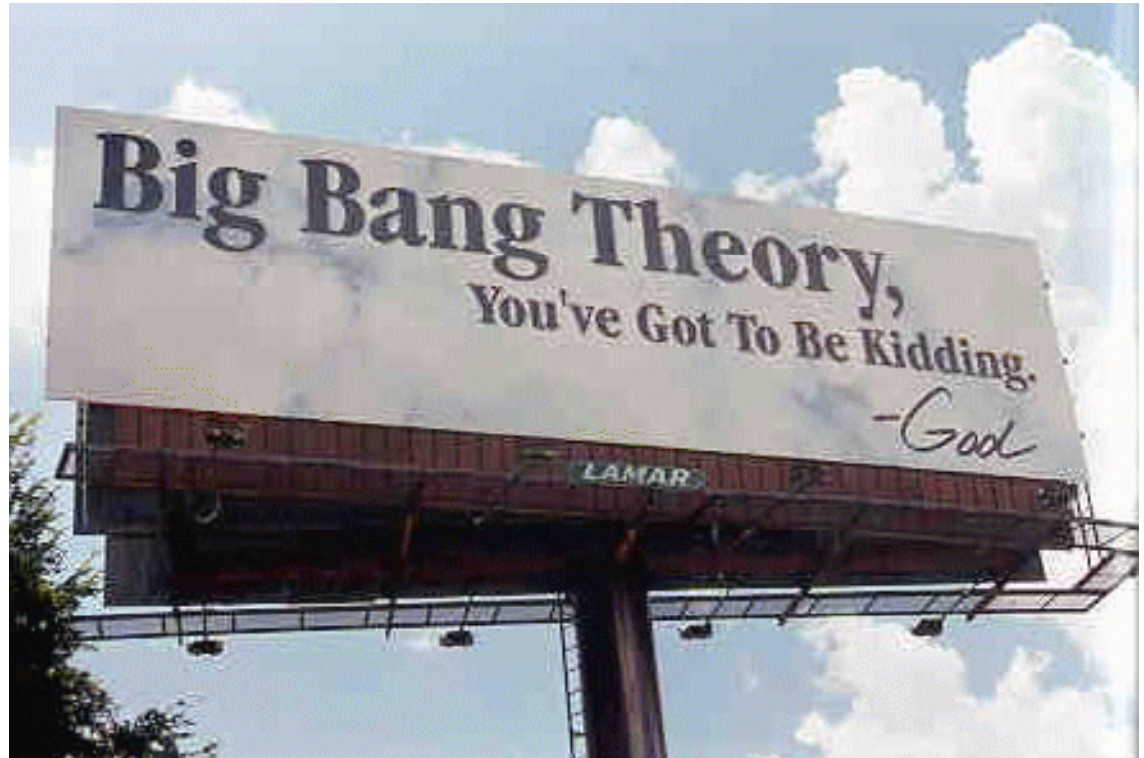
Κοσμολογία

- Η κοσμολογία είναι η επιστήμη που προσπαθεί να εξηγήσει το σύμπαν στο οποίο ζούμε.
 - Πώς ξεκίνησε (αν ξεκίνησε)
 - Πώς εξελίχτηκε
 - Πώς θα τελειώσει

To Big Bang

To Big Bang

- Η κοσμολογία έχει, όπως και η σωματιδιακή φυσική, το 'καθιερωμένο πρότυπο' της.
- Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, μετά την ανάπτυξη της γενικής θεωρίας της σχετικότητας (1919).
- Η θεωρία του Big Bang δεν είναι μια ακόμη θεωρία που προσπαθεί να εξηγήσει το σύμπαν και την εξέλιξη του, είναι Η θεωρία.



To Big Bang

- Είναι ενδιαφέρον πώς η θεωρία του Big Bang δεν ήταν πάντα 'της μόδας'
- Όταν ο Αϊνστάιν διετύπωσε την γενική θεωρία της σχετικότητας, είδε ότι οι εξισώσεις έδειχναν πώς το σύμπαν δεν μπορεί να είναι 'στατικό' όπως ήταν η επικρατούσα θεωρία εκείνη την εποχή.
- Έβαλε λοιπόν 'με το χέρι' μια ακόμη παράμετρο στην εξίσωση του που έκανε το σύμπαν «με το ζόρι» στατικό.
- Αυτή η παράμετρος ήταν η 'κοσμολογική σταθερά' του Αϊνστάιν, που αργότερα παραδέχτηκε πώς ήταν 'το μεγαλύτερο ολίσθημα' της καριέρας του.

To Big Bang

- Η επικρατούσα θεωρία στις αρχές του αιώνα θεωρούσε πώς το σύμπαν είναι αιώνιο και αμετάβλητο.
- Είχε όμως ένα μικρό πρόβλημα: δεν μπορούσε να εξηγήσει εύκολα το 'παράδοξο του μαύρου νυχτερινού ουρανού'.
- Ένας Βέλγος επιστήμονας, ο Georges LeMaitre, εξέλιξε την θεωρία πως το σύμπαν είχε αρχή.
- Ο αντίπαλος του, Fred Hoyle, βάφτισε emπαίζοντας την θεωρία αυτή το 'μεγάλο γδούπο' (Big Bang)
- Η θεωρία βασίζεται στο πλαίσιο της θεωρίας της σχετικότητας του Αϊνστάιν όπως διατυπώθηκε από τον Ρώσο μαθηματικό Alexander Friedmann



To Big Bang

- Αντίθετα με ότι ίσως περιμένετε, η θεωρία του Big Bang δεν ασχολείται (ούτε την ενδιαφέρει) τι συνέβη πριν την μεγάλη έκρηξη ή τι την προκάλεσε. Ασχολείται μόνο με το τι συνέβη **μετά** τι μεγάλη έκρηξη .
- Η θεωρία άρχισε να καθιερώνεται μετά της μετρήσεις του Hubble και εδραιώθηκε μετά την ανακάλυψη της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου.
- Η θεωρία είχε ακόμα πολλά κενά (και συγκριμένα τα προβλήματα του ορίζοντα και της επιπεδότητας) που συμπληρώθηκαν από την θεωρία του κοσμικού πληθωρισμού (A. Guth, 1980)

Ο Hubble και το τηλεσκόπιο του

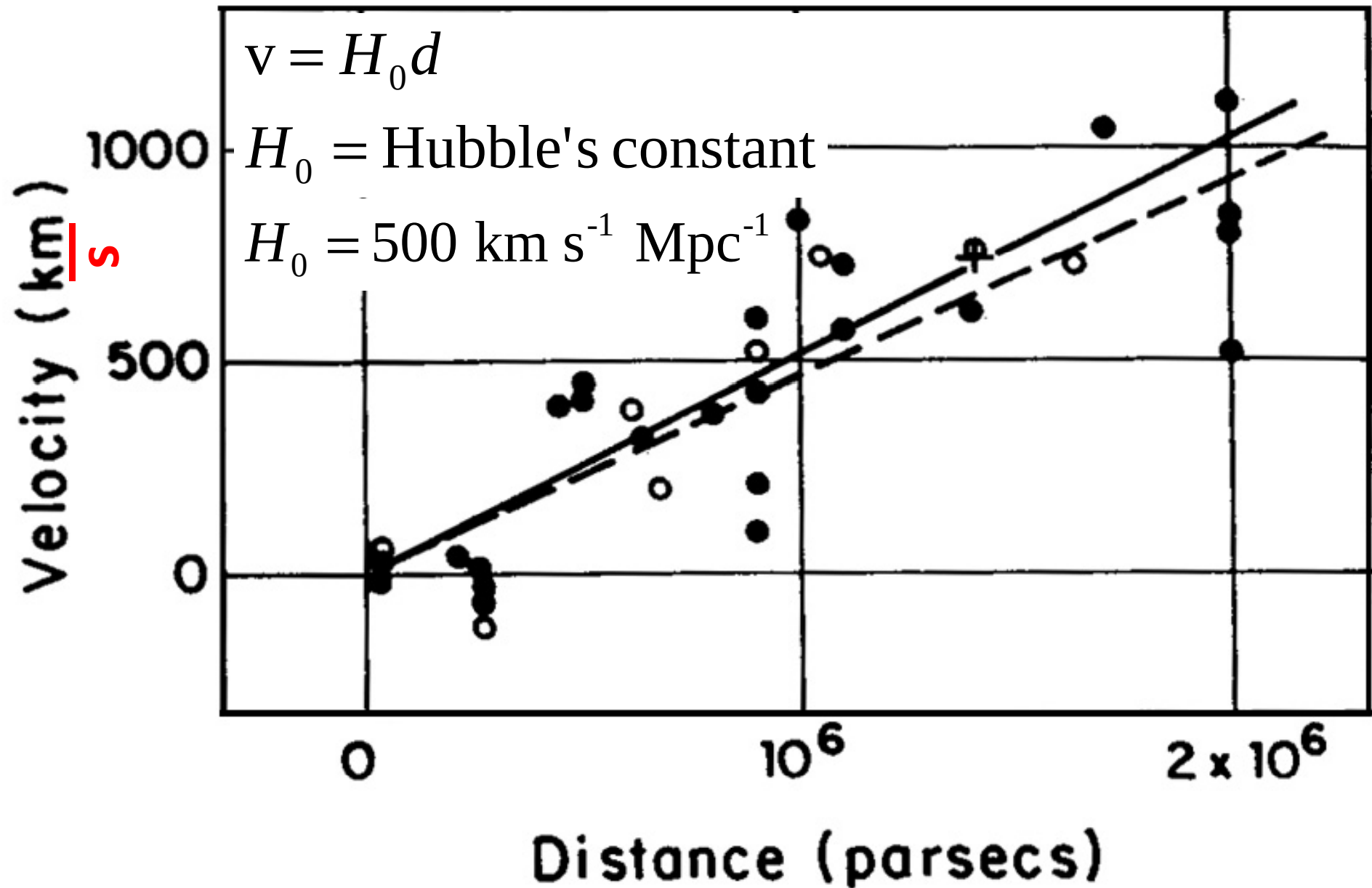
- Για πρώτη φορά καλέστη τεχνικά δυνατόν να μετρήσει κάποιος την σχετική ταχύτητα αστεριών σε σχέση με την απόσταση τους από τη γη.
- Η ταχύτητα μετριέται με την αρχή του Doppler shift
- Ο Hubble περίμενε να μετρήσει τα μισά αστέρια να απομακρύνονται από τη γη (red shifted) και τα άλλα μισά να πλησιάζουν (blue shifted)
- Αυτό που μέτρησε ήταν πως όλα τα αστέρια απομακρύνονταν από τη γη.



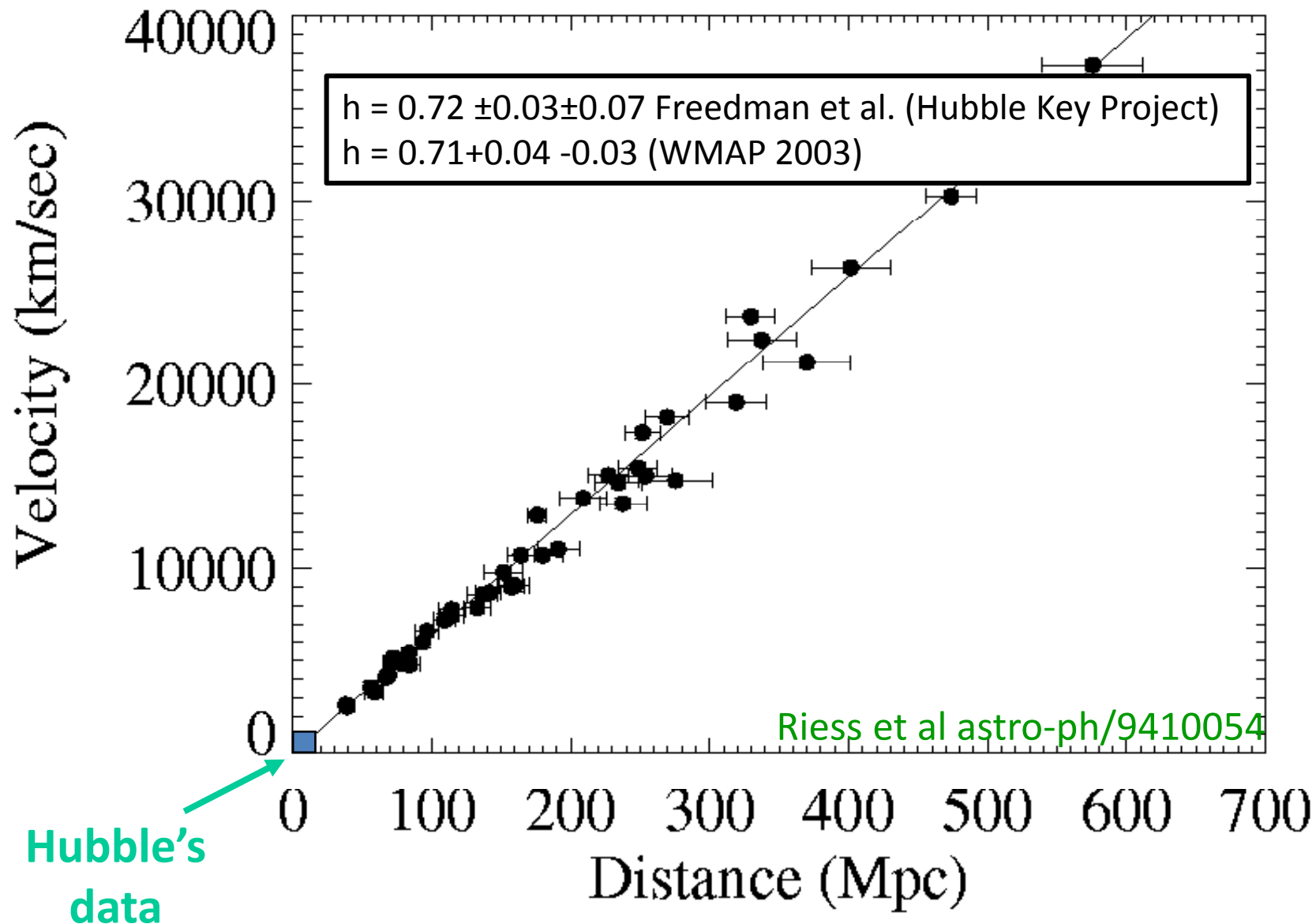
University of Chicago 1909 National Champions



Hubble's Discovery Paper - 1929

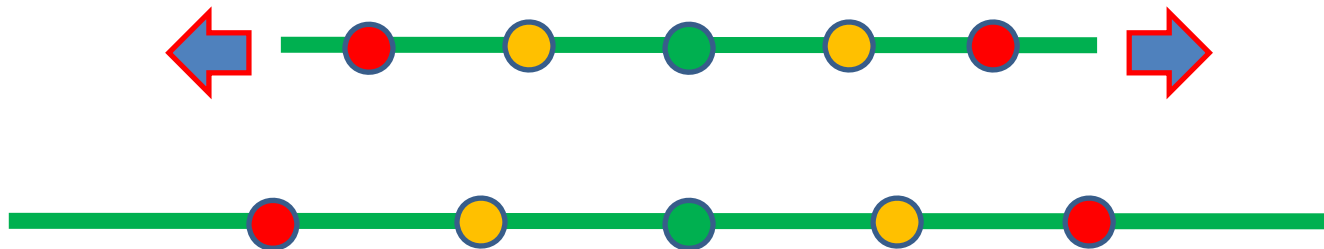


Μερικές δεκαετίες αργότερα...



Οι μετρήσεις του Hubble

- Η σχετική ταχύτητα δυο σημείων στο σύμπαν εξαρτάται από την απόστασή τους: διπλάσια απόσταση, διπλάσια ταχύτητα
- Αυτό μας θυμίζει αυτό που συμβαίνει όταν τραβάμε ένα λαστιχάκι



Η σχετική ταχύτητα των κόκκινων χανδρών ως προς την πράσινη χάνδρα είναι διπλάσια από ότι αυτή των κίτρινων

Οι μετρήσεις του Hubble

- Η σταθερά του Hubble είναι περίπου 70 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο ανά μεγαπαρσεκ (η αλλιώς περίπου 4×10^{-5} Angstrom την ώρα ανά χιλιόμετρο η αλλιώς 0.1 Angstrom τον αιώνα ανά χιλιόμετρο)
- 1 παρσεκ = 3.26 έτη φωτός
- Διευκρίνιση: Η σχέση αυτή ισχύει για σώματα που δεν έχουν στενή (βαρυδιακή ή ηλεκτρομαγνητική) σχέση (tightly bound). Δεν ισχύει για ένα στερεό σώμα, π.χ., ούτε για την απόσταση γης – Ηλίου
- Είναι η ταχύτητα με την οποία ο χώρος αυτός καθαυτός διαστέλλεται.
- [αν δυο σημεία που απέχουν σήμερα 1 μεγαπαρσεκ απομακρύνονται κατά 70 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, πριν πόσα χρόνια ήταν δίπλα- δίπλα; Πριν από $1 \text{ Mpc} / 70 \text{ Kms} \approx 1.4 \times 10^{10} \text{ y}$ (Hubble time)

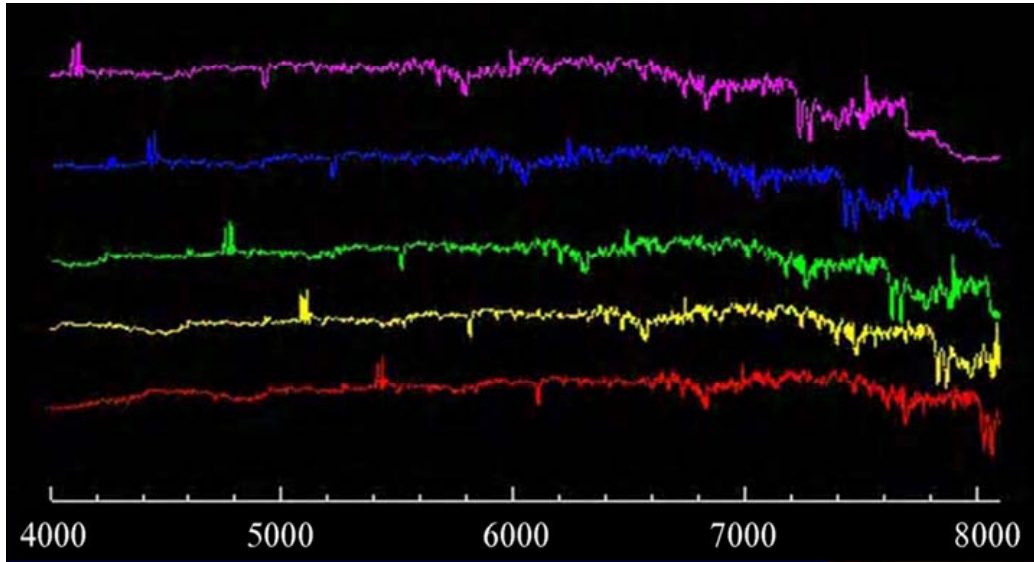
Η σταθερά Ω

- Στο σύμπαν σε μεγάλες αποστάσεις επιδρά η βαρύτητα και το σύμπαν εξελίσσεται ακολουθώντας τις εξισώσεις του Friedmann
- Ω ορίζεται ως το κλάσμα ρ/ρ_c όπου ρ είναι η πραγματική (μετρήσιμη) πυκνότητα του σύμπαντος σήμερα και ρ_c είναι η κρίσιμη πυκνότητα
- Η κρίσιμη πυκνότητα είναι η πυκνότητα που θα έπρεπε να έχει το σύμπαν για να είναι επίπεδο (και με την έλλειψη άλλων παραγόντων αυτή η πυκνότητα είναι ικανή μόλις να σταματήσει τελείως την διαστολή του σύμπαντος)

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}.$$

- $\Omega = 1$ σημαίνει πως το σύμπαν έχει πυκνότητα ίση με την κρίσιμη πυκνότητα

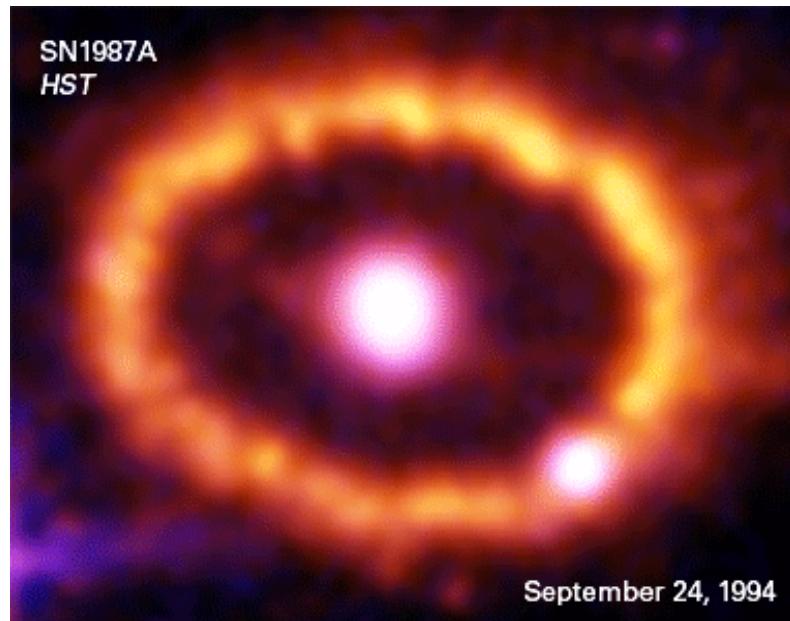
Πως γίνεται η μέτρηση



1. Μετράμε την μετακίνηση προς το ερυθρό των γραμμών γνωστών χημικών στοιχείων. Έτσι έχουμε την ταχύτητα της πηγής ως προς τη γη.

2. Χρειαζόμαστε ένα σώμα με γνωστή φωτεινότητα, ούτως ώστε να μπορέσουμε να μετρήσουμε την απόσταση του από την γη μετρώντας την φαινομενική φωτεινότητα του. Αυτά τα σώματα στην αστρονομία λέγονται 'Standard candles'. Ένα καλό standard candle είναι ένας ειδικός τύπος υπέρ-καινοφαινών αστέρων (τύπος 1α)

Υπέρ-καινοφανείς αστέρες

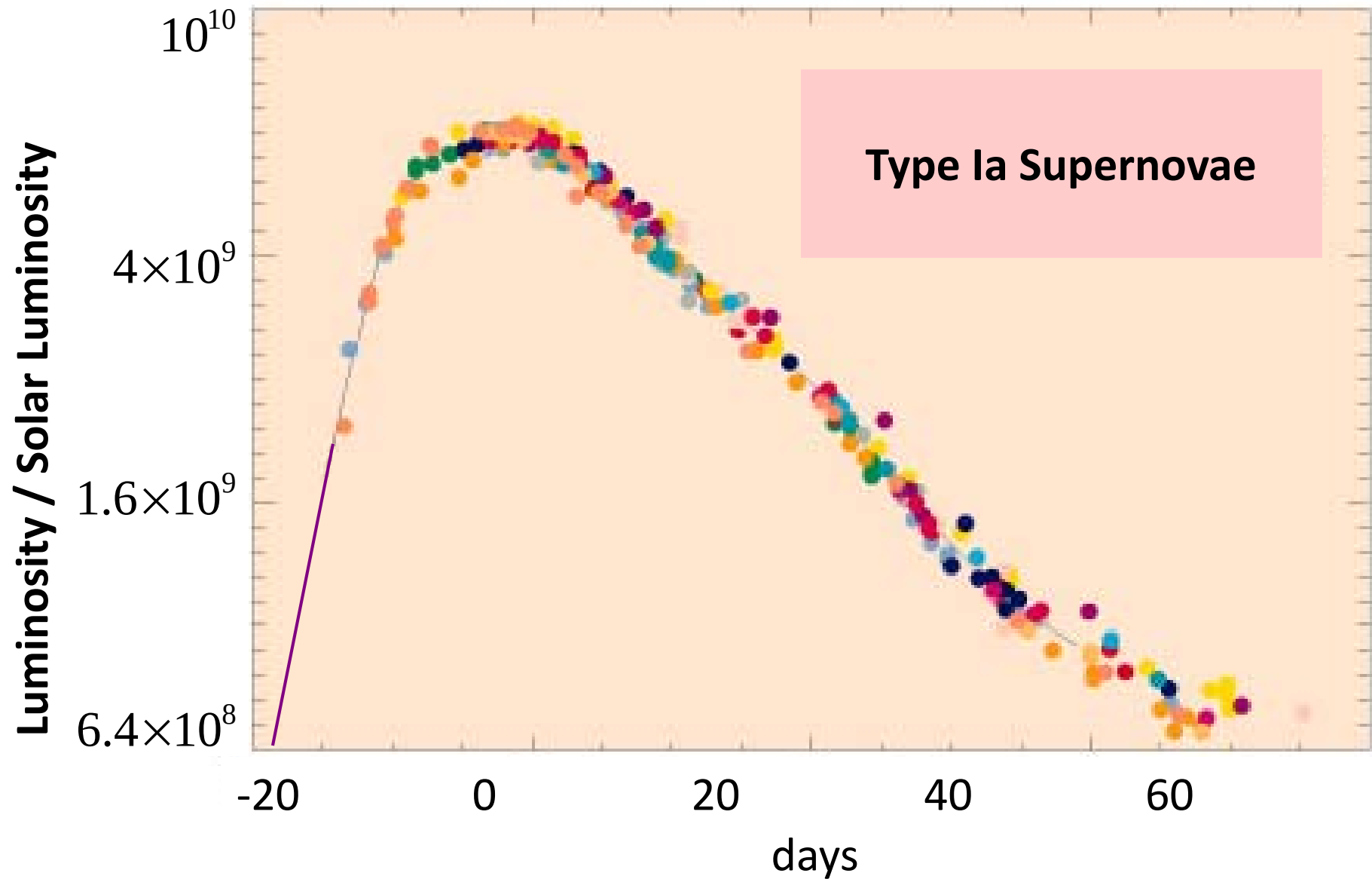


Η πιο γνωστή έκρηξη σουπερνοβα
(Type II P)

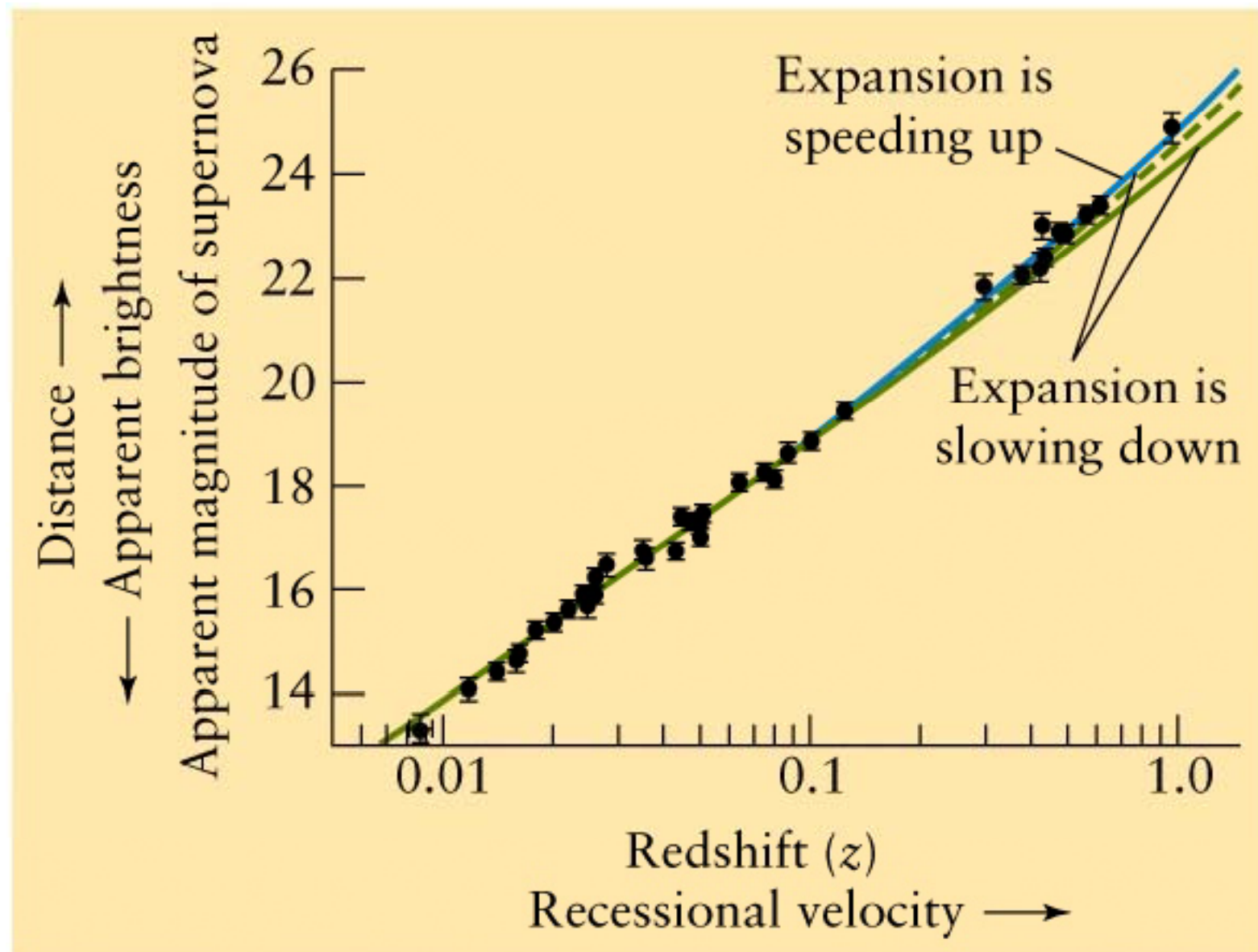
- Ένα σουπερνόβα είναι μια αστρική έκρηξη
- Τεράστια ποσά ενέργειας εκλύονται για χρονικά διαστήματα εβδομάδων ή μηνών
- Έχουμε περίπου δυο τέτοιες εκρήξεις τον αιώνα σε ένα γαλαξία σαν τον δικό μας
- Έχουμε διάφορα είδη σουπερνόβα ανάλογα με τον μηχανισμό της έκρηξης.

Για αυτή την παρουσίαση ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα σουπερνόβα τύπου 1A που πάντα εκρήγνυνται με την ίδια φωτεινότητα (η έκρηξη έχει να κάνει με φαινόμενο κατωτάτου ορίου)

SN1a είναι καλά standard candles

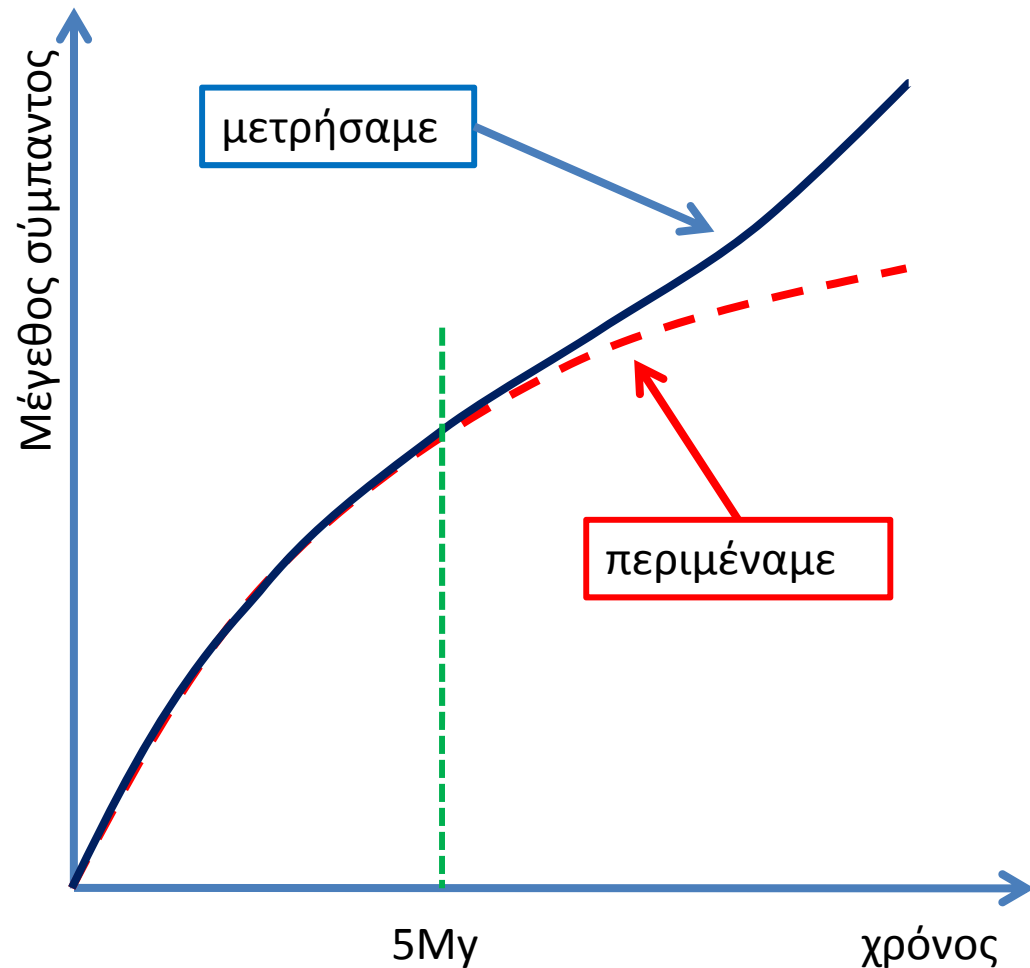


Αποτελέσματα μετρήσεων SN1a



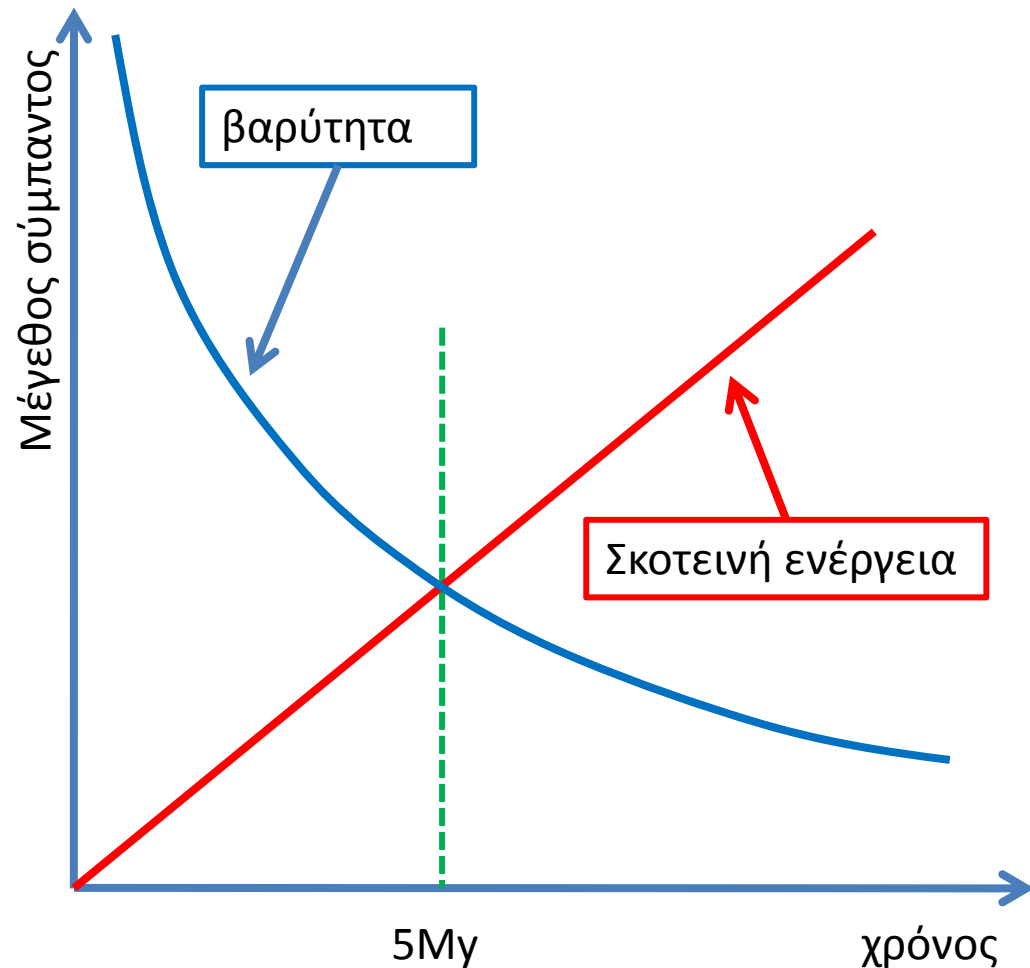
Έκπληξη!

- Αντίθετα με ότι ξέρουμε μέχρι σήμερα, η διαστολή του σύμπαντος σήμερα είναι επιταχυνόμενη!
- Η διαστολή του σύμπαντος ήταν όντως επιβραδυνόμενη τα πρώτα 5 δισεκατομμύρια χρόνια από την αρχή του σύμπαντος, αλλά μετά αυτή η διαστολή έγινε επιταχυνόμενη
- Αυτή ήταν η μεγαλύτερη έκπληξη στη φυσική τα τελευταία χρόνια



Έκπληξη!

- Ξέρουμε πως σε μεγάλες αποστάσεις η μόνη δύναμη που επιδρά είναι η βαρύτητα, η οποία είναι πάντα ελκτική και μειώνεται με το $1/r^2$
- Αυτό σημαίνει πως υπάρχει μια άλλη δύναμη εκτός από τη βαρύτητα, απωθητική, που επικρατεί της βαρύτητας σε χρόνους μετά τα 5 δισεκατομμύρια χρόνια
- Αυτή η δύναμη έχει τη μορφή 'αρνητικής πίεσης' και αυξάνεται με το r
- Αυτό ονομάζεται **Σκοτεινή Ενέργεια**

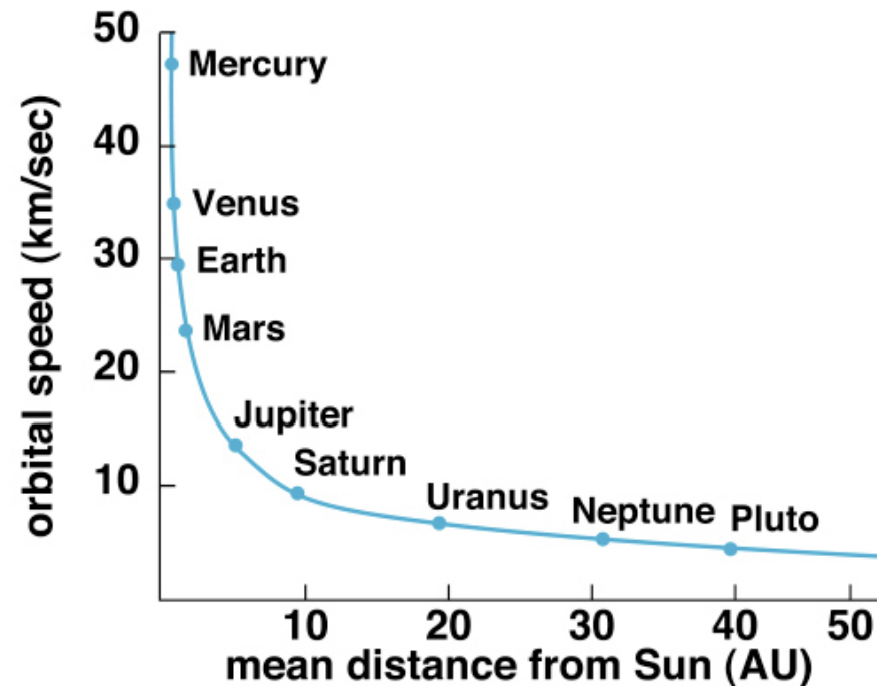


Σκοτεινή ύλη

Σκοτεινή υλη

- Πολύ πριν μάθουμε οτιδήποτε για την σκοτεινή ενέργεια, υπήρχε ένα άλλο πρόβλημα σχετικά με το πόση υλη υπάρχει στο σύμπαν, το πρόβλημα της 'σκοτεινής Ύλης'

- Το πρόβλημα είναι το εξής: ένας γαλαξίας είναι αρκετά παρόμοιος με το ηλιακό μας σύστημα από την άποψη πως η περισσότερη μάζα που βλέπουμε είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του (όπως στο ηλιακό μας σύστημα που είναι συγκεντρωμένη στον Ήλιο).
- Ξέρουμε πως οι μακρινοί πλανήτες περιστρέφονται πιο αργά από τους κοντινούς πλανήτες (ένας χρόνος στον Κρόνο είναι 29.5 χρόνια)
- Αυτό όμως δεν συμβαίνει και στους γαλαξίες!



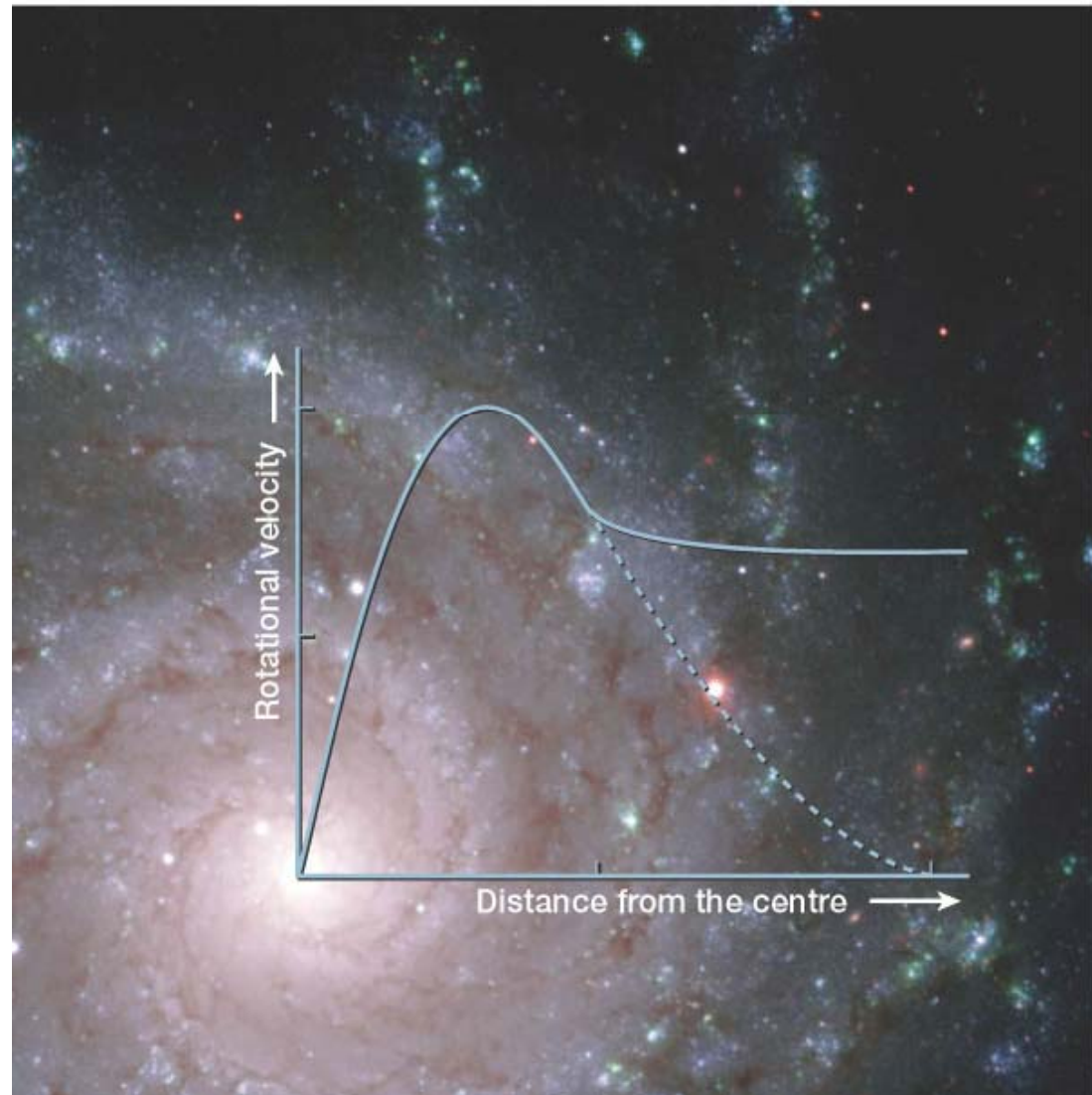
(b)

Copyright © Addison Wesley

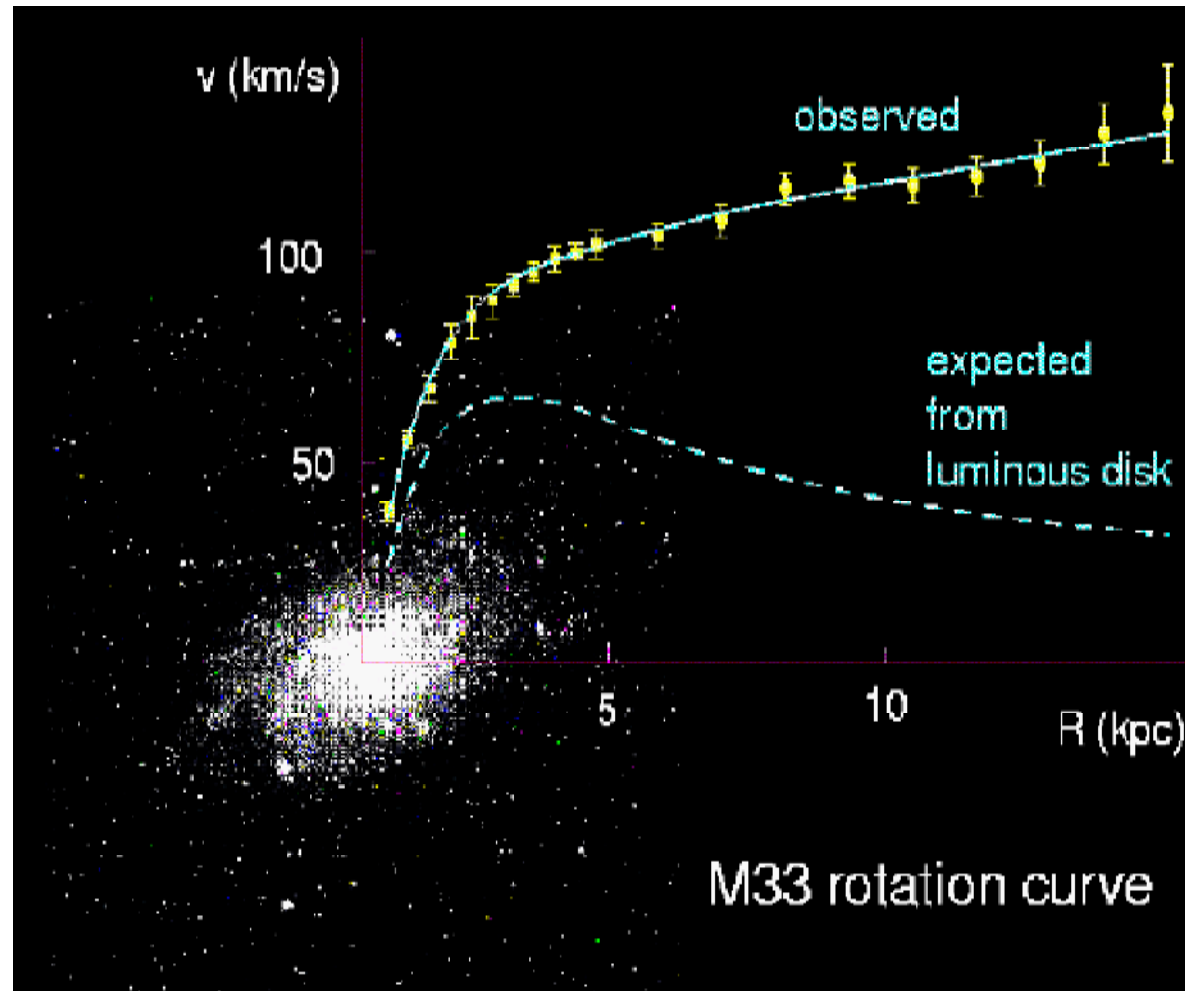
Υπάρχει υλη που δρα βαρυδιακά, αλλά που δεν την βλέπουμε → **Σκοτεινή Ύλη**

Σκοτεινή ύλη

- Το 1975, μπροστά σε ένα άφωνο κοινό, η Vera Rubin ανακοίνωσε πως η καινούρια μέθοδος που είχε η ίδια αναπτύξει μέτρησης των ταχυτήτων αστεριών σε γαλαξίες έβγαλαν αποτελέσματα που δεν ακλουθούσαν αυτό που κανείς περιμένει από τους νόμους του Νεύτωνα.
- Πρωτεργάτης της σκοτεινής ύλης : ο Fritz Zwicky (1933)



Ένα παράδειγμα rotation curve



Από τι αποτελείται η σκοτεινή υλη; Δεν ξέρουμε ακόμα
Μερικές ιδέες είναι

- WIMPs (weakly interacting massive particles)
- Στείρα νετρίνα
- Τα WIMPs μπορεί επίσης να είναι σταθερά υπέρ συμμετρικά σωματίδια (neutalinos)
- Το LHC μπορεί να ανακαλύψει WIMPs

Σκοτεινή υλη - Υλη : 10 - 1

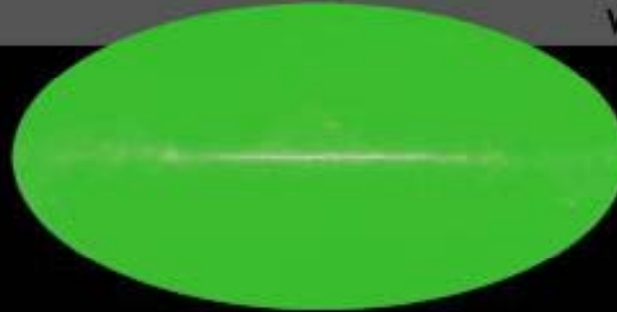
CMB

Ακτινοβολία Υποβάθρου (CMB)

1965



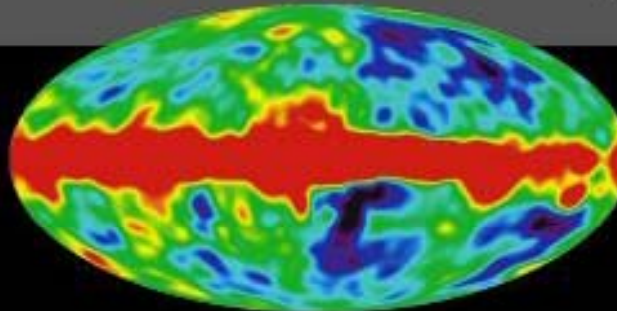
Penzias and
Wilson



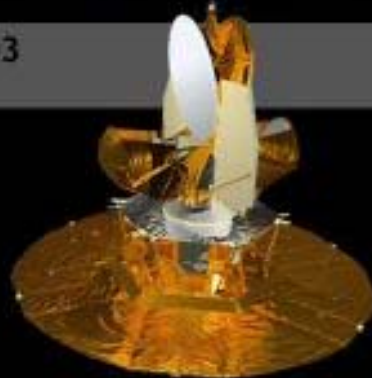
1992



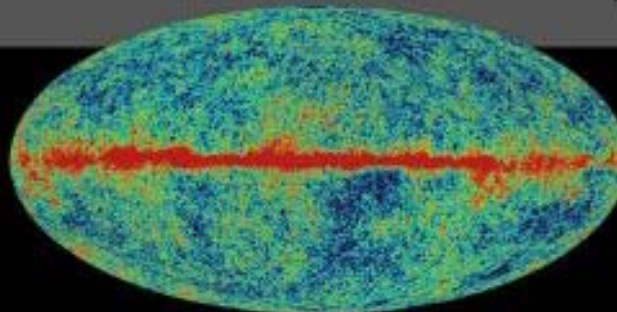
COBE



2003



WMAP



Ακτινοβολία Υποβάθρου (CMB)

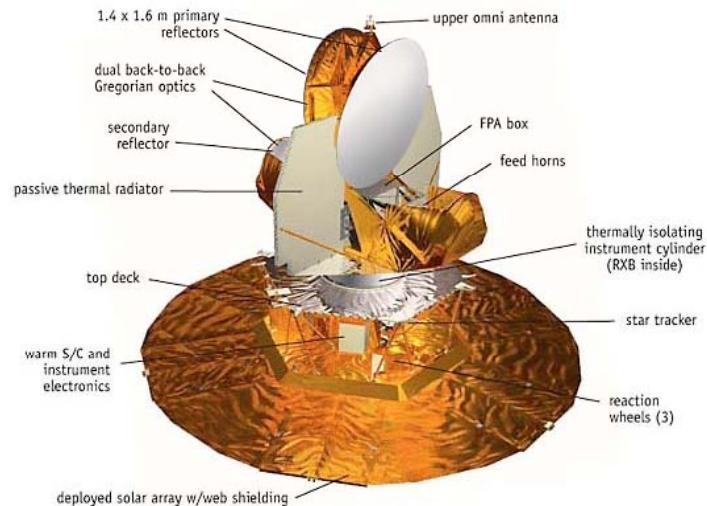
Το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1972 δόθηκε στους Penzias και Wilson

- Οι δυο μηχανικοί ανακάλυψαν τυχαία την ακτινοβολία υποβάθρου σαν μια ομοιόμορφη ακτινοβολία στον ουρανό στο ραδιοφωνικό μέρος του φάσματος, το 1965. Οι μετρήσεις έδειχναν ακτινοβολία μελανού σώματος περίπου 3000 K ($\lambda \approx 1000\text{nm}$), που είχε μετατοπιστεί προς το κόκκινο κατά ένα παράγοντα 1000 (160GHz σήμερα, μήκος κύματος 2 χιλιοστά)

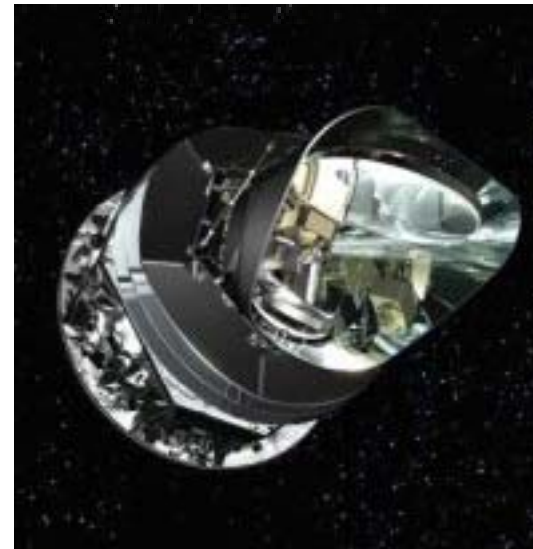


Δορυφόροι για τη μέτρηση του CMB

- COBE (NASA, εκτόξευση 18 Νοεμβρίου 1989)



- WMAP (NASA, εκτόξευση καλοκαίρι 2001)



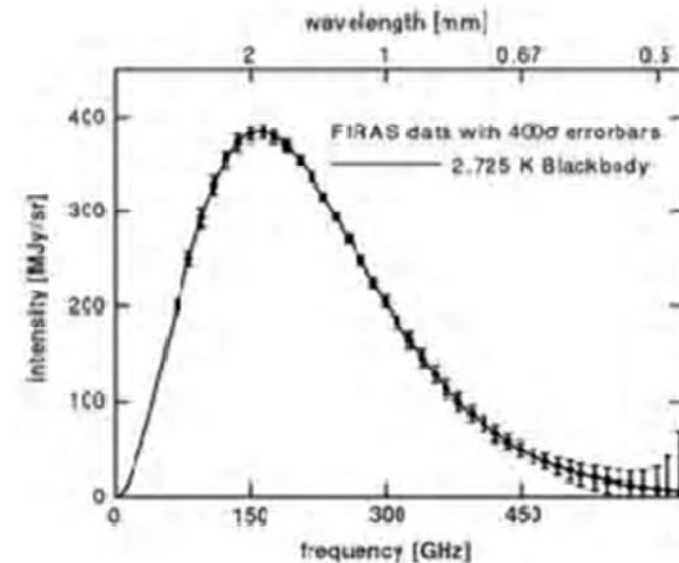
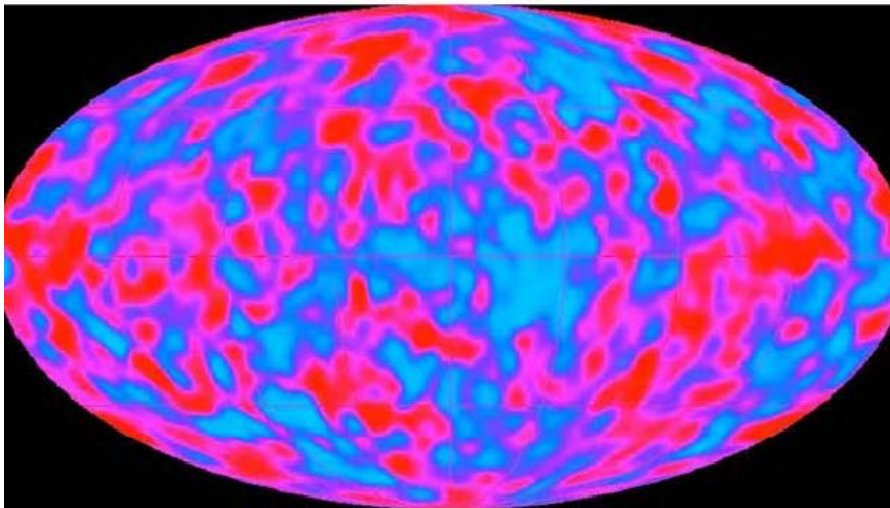
- PLANK (ESA, εκτόξευση 2009)



Ακτινοβολία Υποβάθρου (CMB)

Το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 2006 δόθηκε σε δυο από τους πρωτεργάτες του δορυφόρου COBE (NASA, 1989)

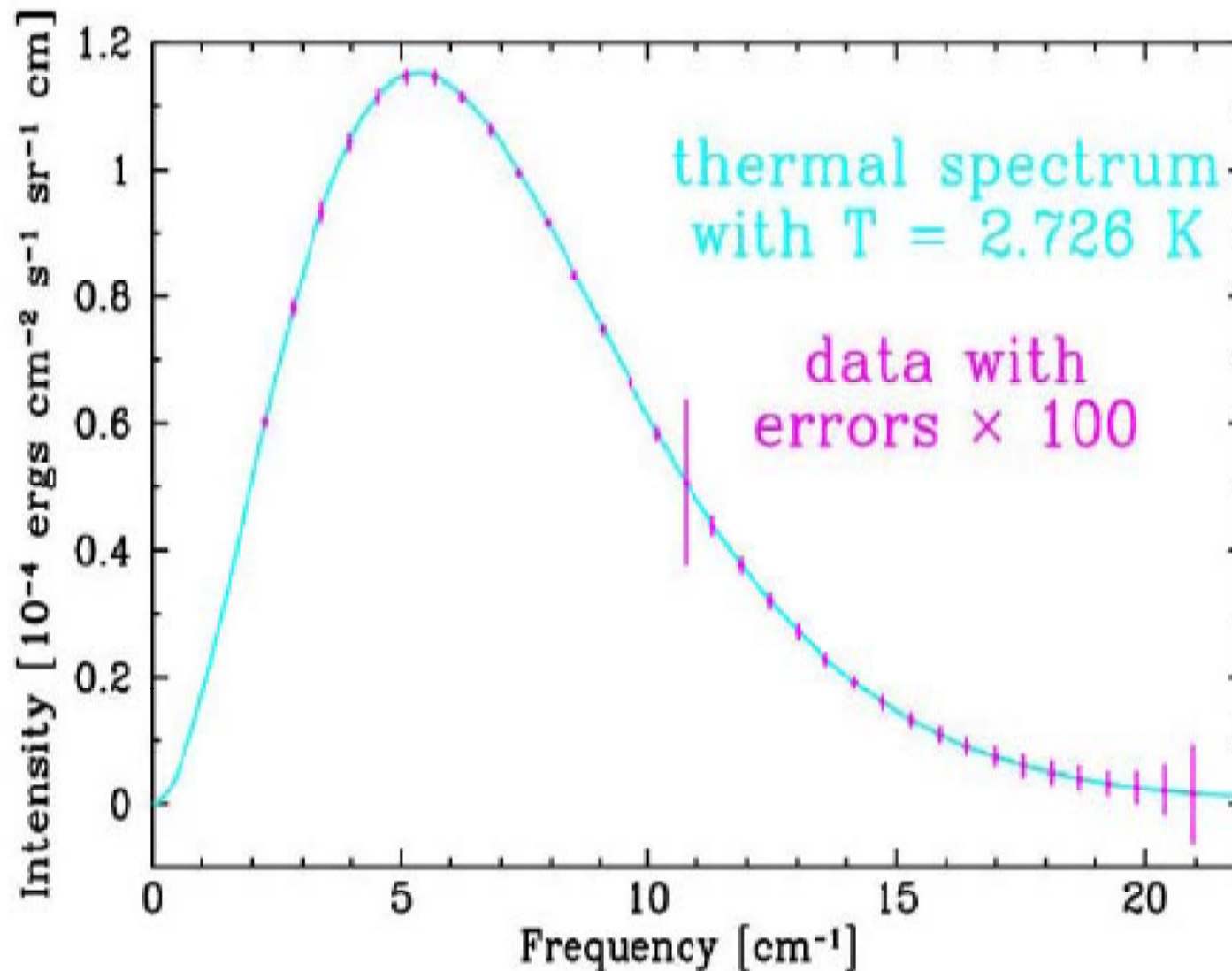
- Στον John C. Mather για την μέτρηση πως το CMB είναι ακτινοβολία μελανού σώματος



- Και στον George F. Smoot για την μέτρηση των πολύ μικρών διαφορών θερμοκρασίας

«αυτές οι μετρήσεις σηματοδοτούν την ένταξη της κοσμολογίας στις επιστήμες ακριβείας»

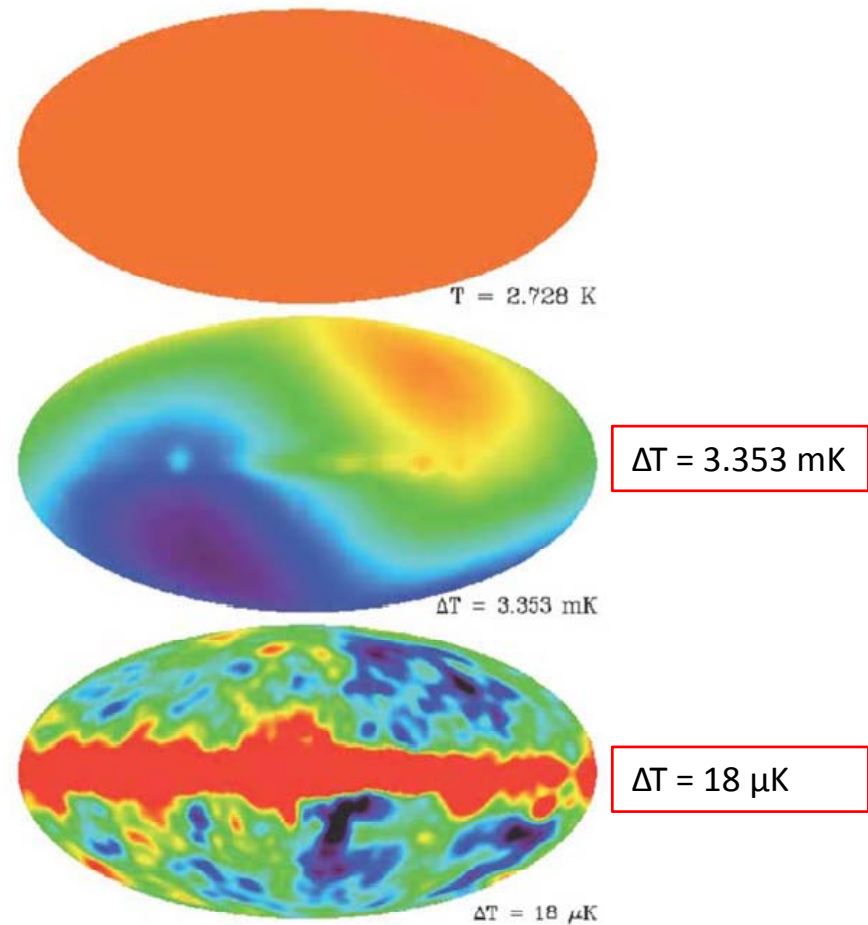
Θερμοκρασία του Σύμπαντος (COBE)



Το πιο ιδανικό
μελανό σώμα
που έχει
μετρηθεί ποτέ

Η ακτινοβολία υπόβαθρου

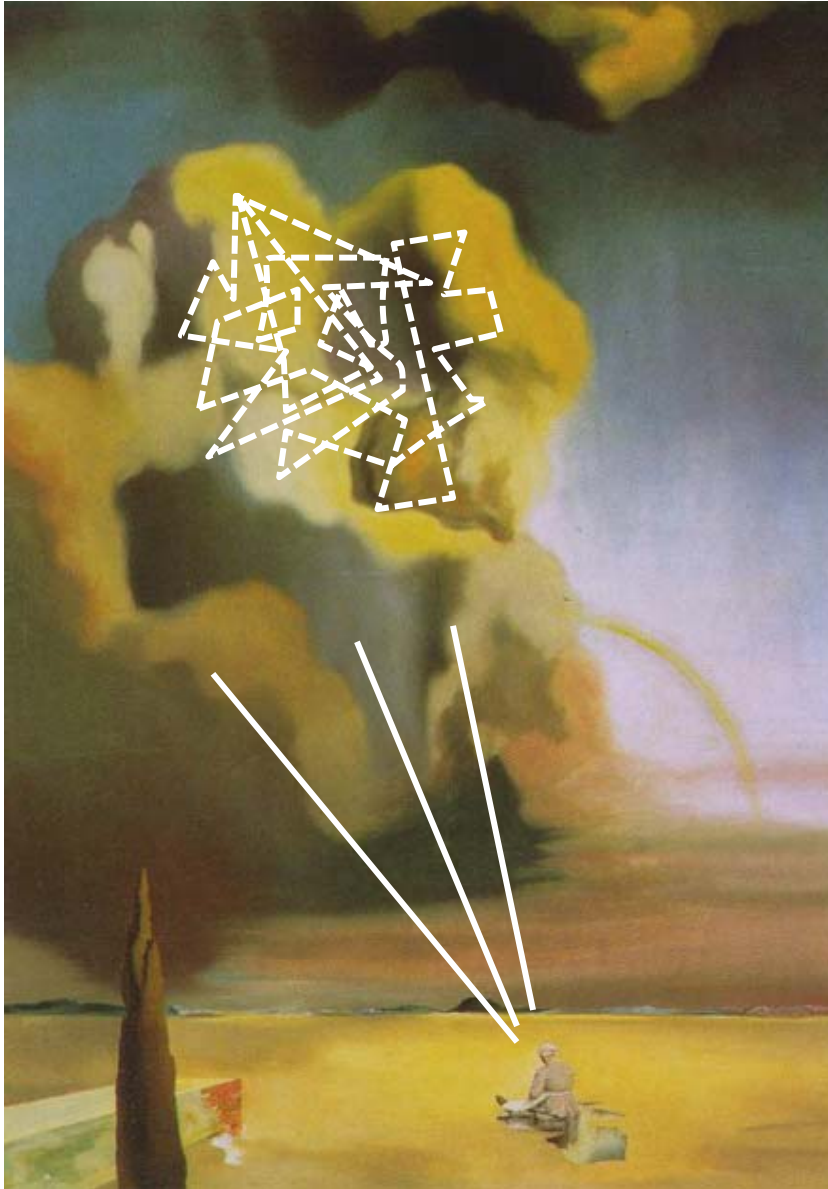
- Οι Pensias & Willson είδαν μόνο μια ομοιόμορφη ακτινοβολία
- Αργότερα, το Doppler shift της κίνησης του γαλαξία μας μετρήθηκε (κινείται προς τον αστερισμό του κενταύρου με ταχύτητα 620Km/sec)
- Μόλις το 1992 μετρήθηκε η ανομοιογένεια της ακτινοβολίας (σε επίπεδο 10^{-5})



Τι είναι η ακτινοβολία υπόβαθρου;

- Όταν το Σύμπαν ήταν πολύ νέο, δεν ήταν διαφανές στην ακτινοβολία. Ο λόγος είναι πως τα φωτόνια ήταν αρκετά ενεργητικά, ώστε να ιονίζουν άτομα που τυχόν έβρισκαν μπροστά τους.
- Μόνο όταν η θερμοκρασία του σύμπαντος έπεσε κάτω από την ελάχιστη ενεργεία ιονισμού (3000 K, η αλλιώς 0.25eV) τα φωτόνια δεν μπορούσαν πλέον να ιονίζουν άτομα, και ως εκ τούτου μπορούν να συνεχίσουν απρόσκοπτα την πορεία τους. Αυτό συνέβη όταν το σύμπαν είχε ηλικία 380000 χρόνια.
- Αυτά τα φωτόνια έχουν επιβιώσει μέχρι τις μέρες μας, αλλά μια και το σύμπαν έχει διασταλεί από τότε κατά ένα παράγοντα 1000, η θερμοκρασία τους έχει πέσει κατά ένα παράγοντα 1000 (η το μήκος κύματος τους έχει αυξηθεί κατά ένα παράγοντα 1000)

Τι είναι η ακτινοβολία υπόβαθρου;

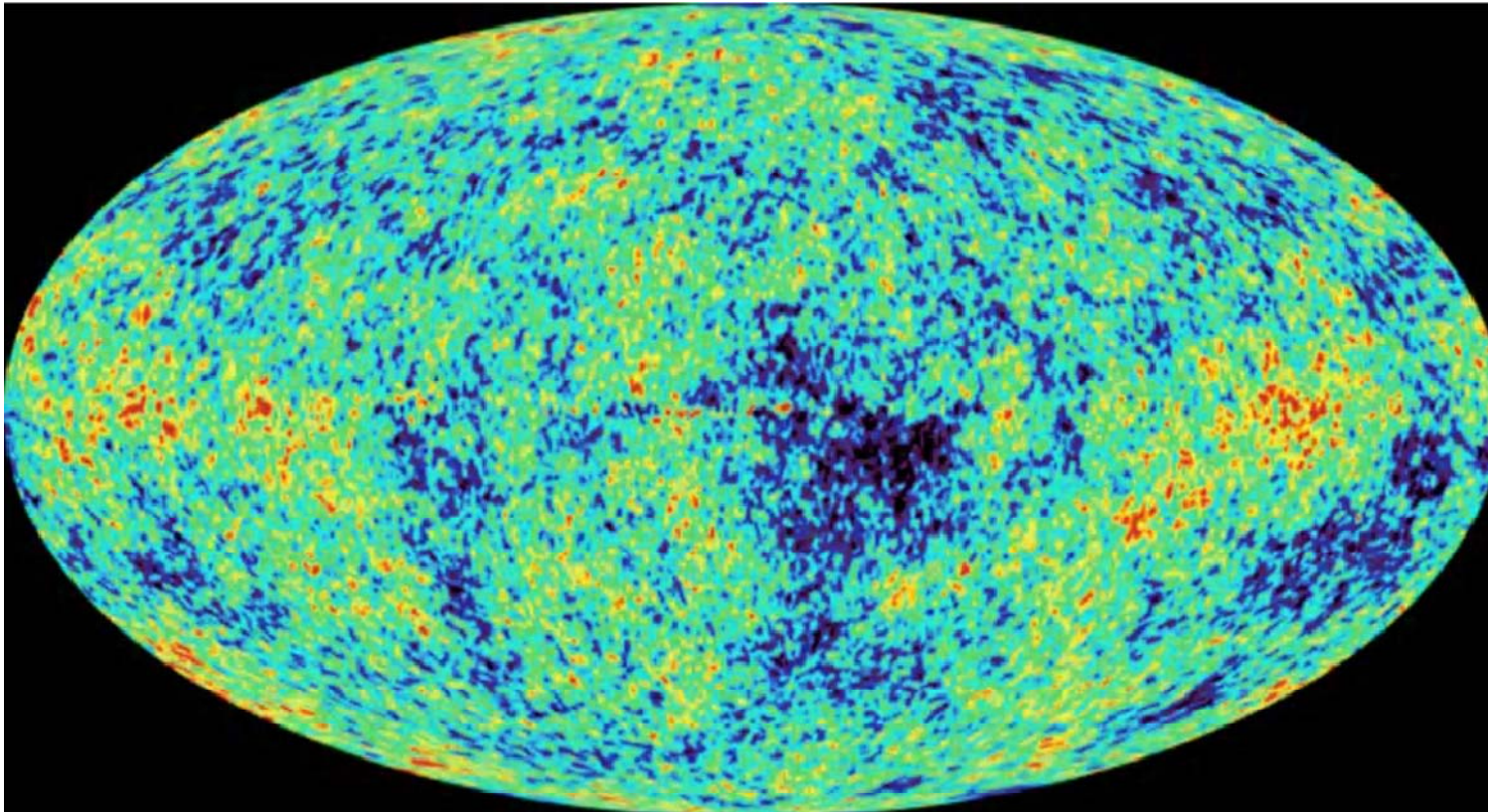


Κατ'αντιστοιχία, ο παρατηρητής βλέπει μόνο την επιφάνεια του σύννεφου (την εικόνα του σύμπαντος στα 380000 χρόνια) και όχι μέσα στο σύννεφο (πριν από τα 380000).

Τι είναι η ακτινοβολία υπόβαθρου;

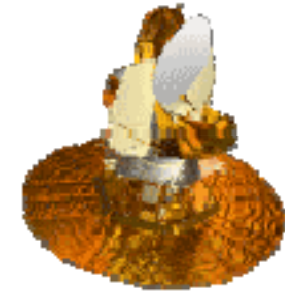
- Η ακτινοβολία υπόβαθρου έχει λοιπόν δυο σημαντικά χαρακτηριστικά:
 - Είναι ομοιόμορφη
 - Έχει διακυμάνσεις στο επίπεδο του 10^{-5} που μας διδάσκουν πολλά για το σύμπαν

Ζεστά και κρύα σημεία → μικρές διακυμάνσεις πυκνότητας → εναύσματα γαλαξιών



Λεπτομερής στατιστική ανάλυση των διακυμάνσεων μας δίνει μια πληθώρα πληροφοριών για το σύμπαν

Τι μπορούμε να καταλάβουμε από μια φωτογραφία του σύμπαντος όταν είχε ηλικία 380000 χρόνων;



Το σύμπαν τότε αποτελούνταν από ένα πολύ καυτό και πυκνό «αέριο», έτσι εξέπεμπε ακτινοβολία.

Αυτό είναι η ακτινοβολία που βλέπουμε όταν εξετάζουμε το CMB
Ομοιόμορφη, αλλά με τη μικροσκοπικούς (αντίθεση $\times 100000$) κυματισμούς πυκνότητας (και θερμοκρασίας)

Κυματισμοί σε ένα αέριο; ΚΥΜΑΤΑ ΥΧΟΥ!

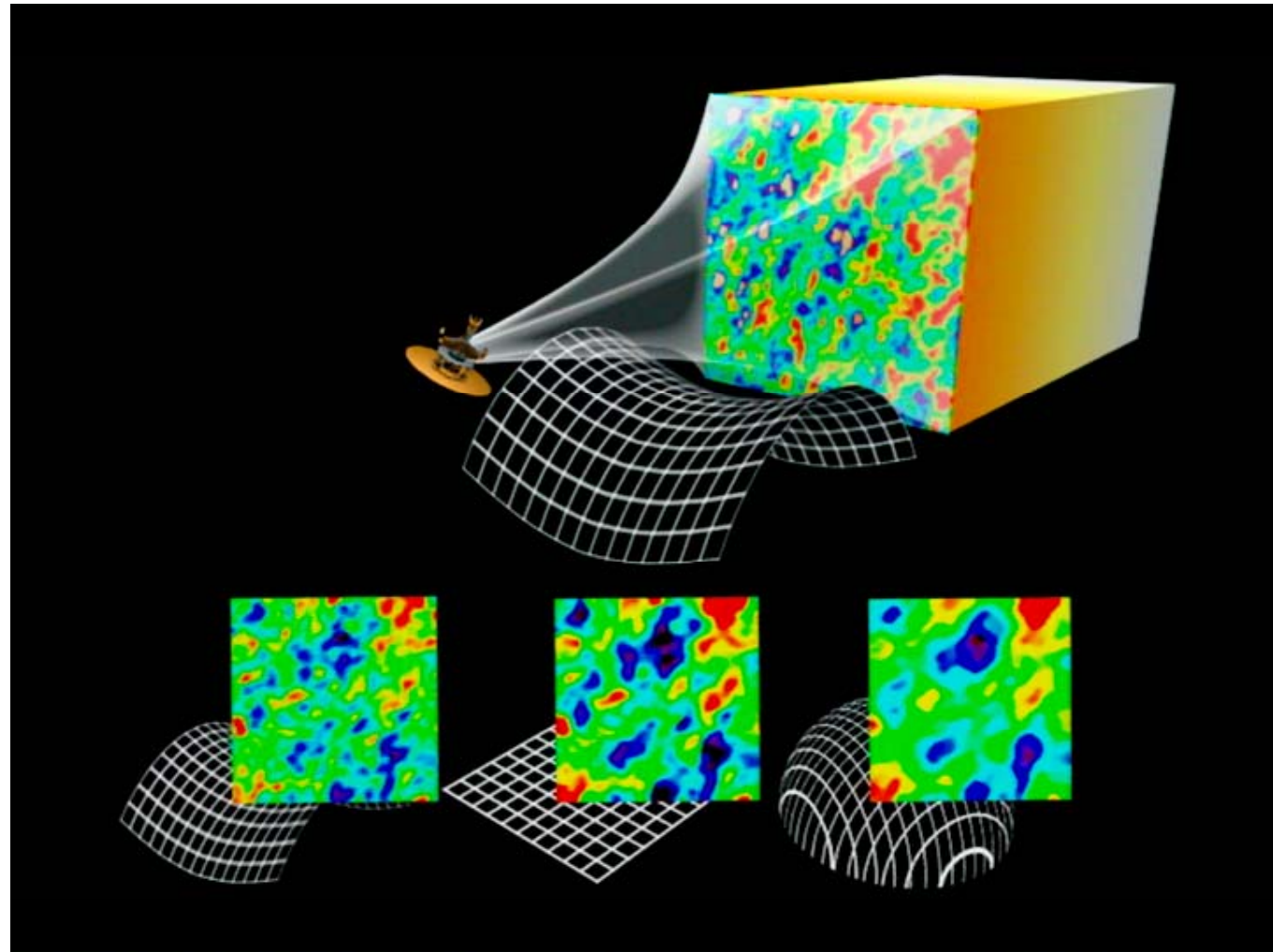
Εδώ έχουμε να κάνουμε με μια κοσμική συμφωνία... Βλέπουμε τον ήχο!

Αυτές οι μικροσκοπικές διακυμάνσεις μας δίνουν τελικά τους γαλαξίες

Θεμελιώδης κοσμική κλίμακα $\rightarrow$ Θεμελιώδης νότα και αρμονικές όπως το παίξιμο μίας φλογέρας....

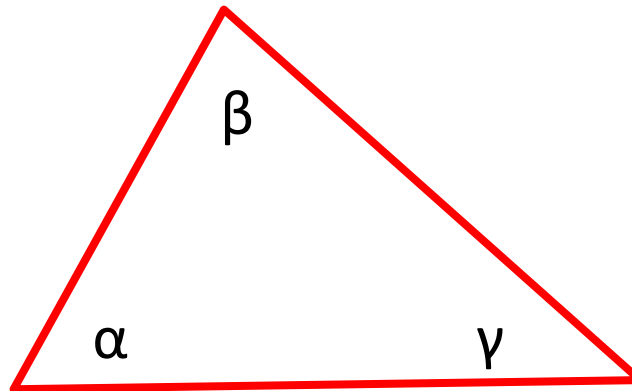
Η γεωμετρία του σύμπαντος

- Το WMAP μπορεί να μετρήσει την γεωμετρία του σύμπαντος μετρώντας το μέγεθος των περιοχών με διαφορετική θερμοκρασία και συγκρίνοντας τις με το τι περιμένουμε για ανοιχτό και κλειστό σύμπαν.
- Αυτό που μετράμε είναι ένα επίπεδο σύμπαν (όπως προβλέπεται από την θεωρία του κοσμικού πληθωρισμού).



Τι σημαίνει επίπεδο σύμπαν;

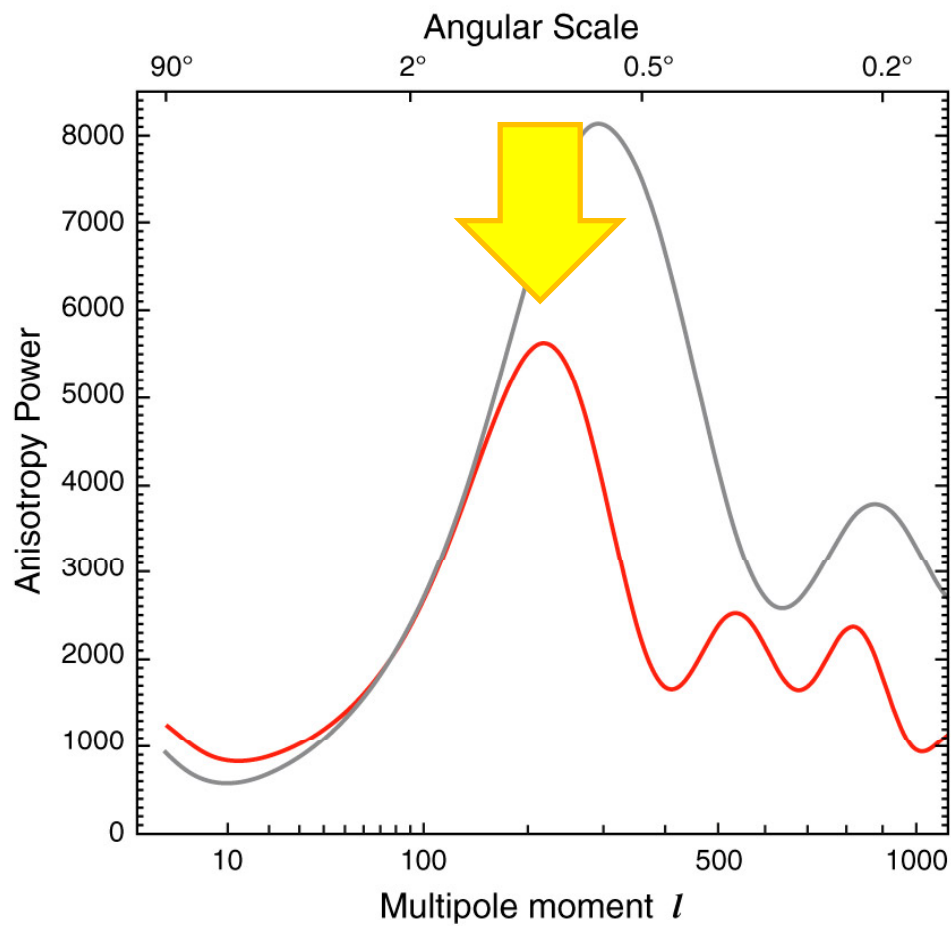
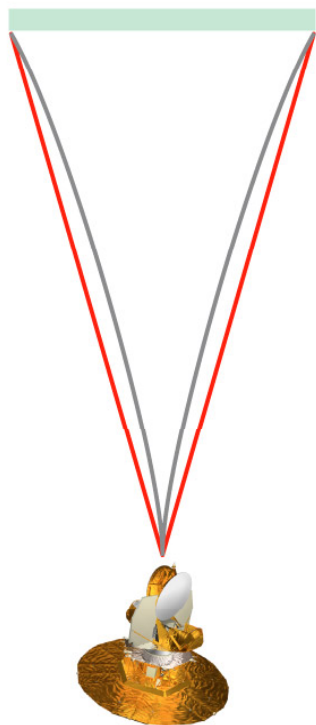
- Επίπεδο είναι το σύμπαν όταν το άθροισμα των γωνιών ενός οποιοδήποτε τριγώνου είναι $\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$



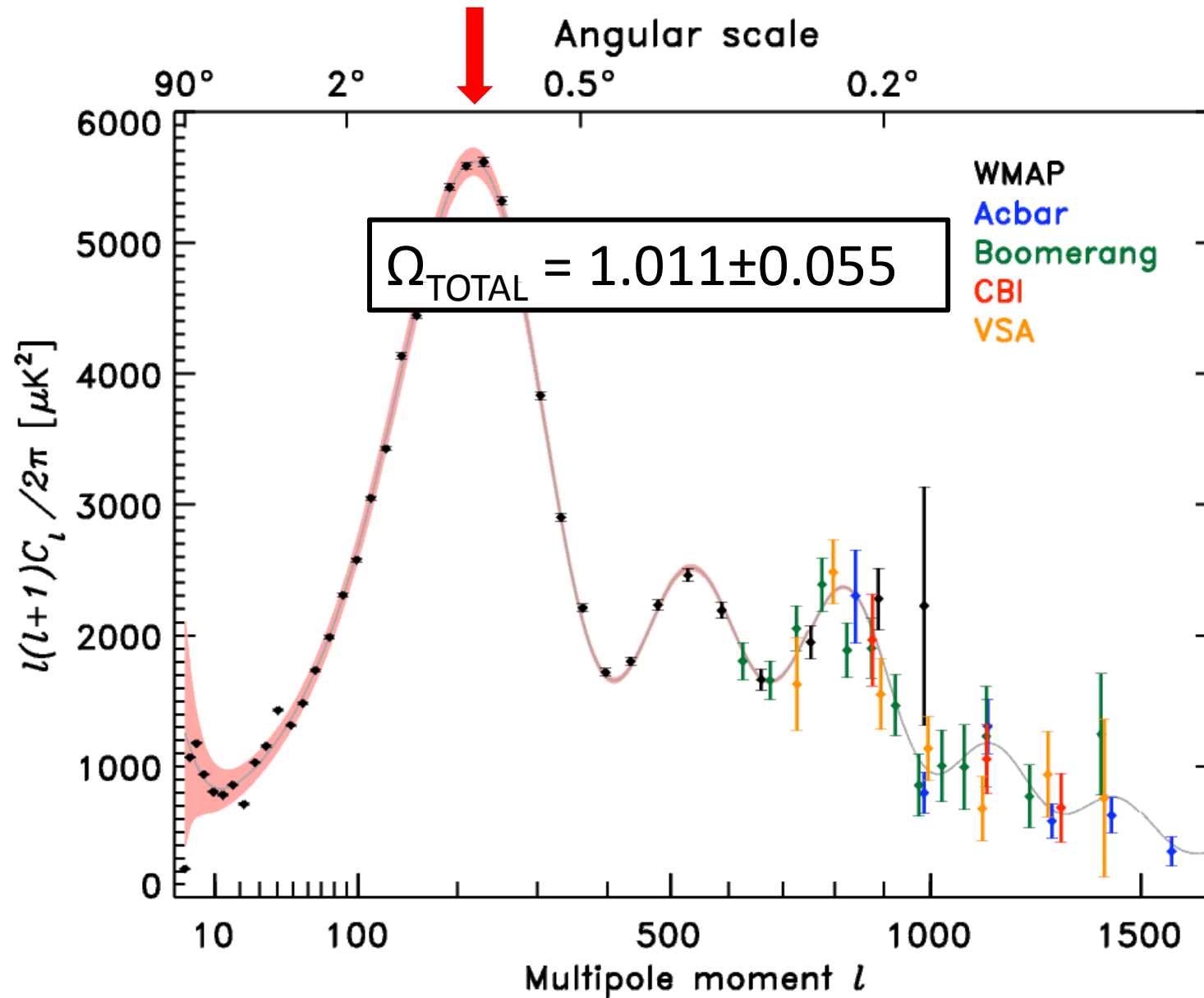
- Για να ελέγξουμε αν αυτό ισχύει στο σύμπαν μας αναλύουμε την φωτογραφία του WMAP: μετράμε το 'γωνιακό φάσμα ισχύος' – βασικά ένας μαθηματικός τρόπος να δούμε πόσο απέχουν (γωνιακά) θερμά και ψυχρά σημεία

Τι περιμένουμε;

Standard Ruler:
1° arc measurement of
dominant energy spike

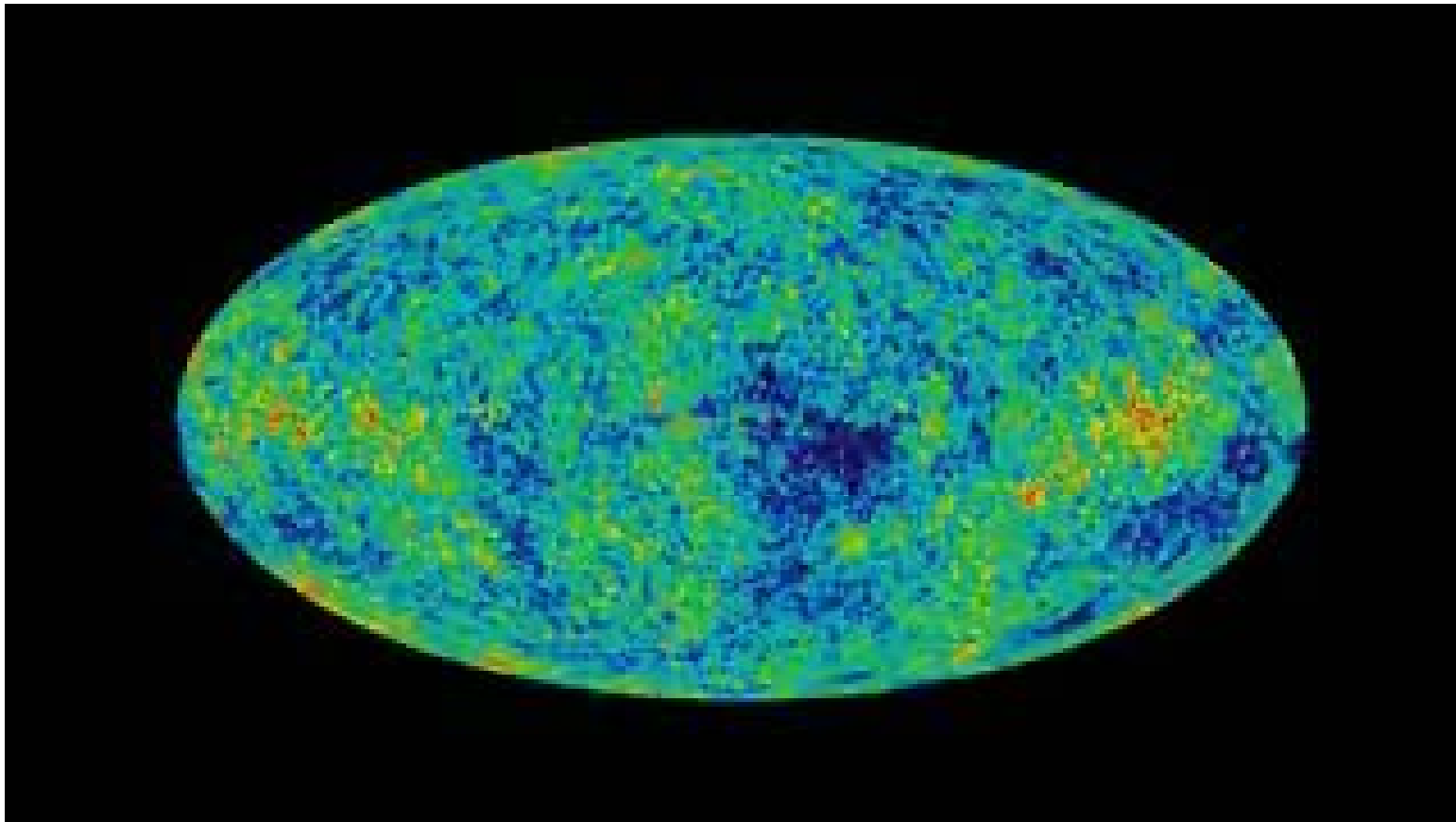


Οι τελευταίες μετρήσεις



Πως εξελίχτηκε το σύμπαν

- Οι φωτογραφίες του WMAP είναι η εικόνα του σύμπαντος σε πολύ νεαρή ηλικία (380,000 χρόνων).
- Το σύμπαν εξελίχθηκε καθώς η υλη που τυχαία βρέθηκε σε σημεία με μεγαλύτερη πυκνότητα συμπύχτηκε για να δημιουργήσει γαλαξίες και αστέρες

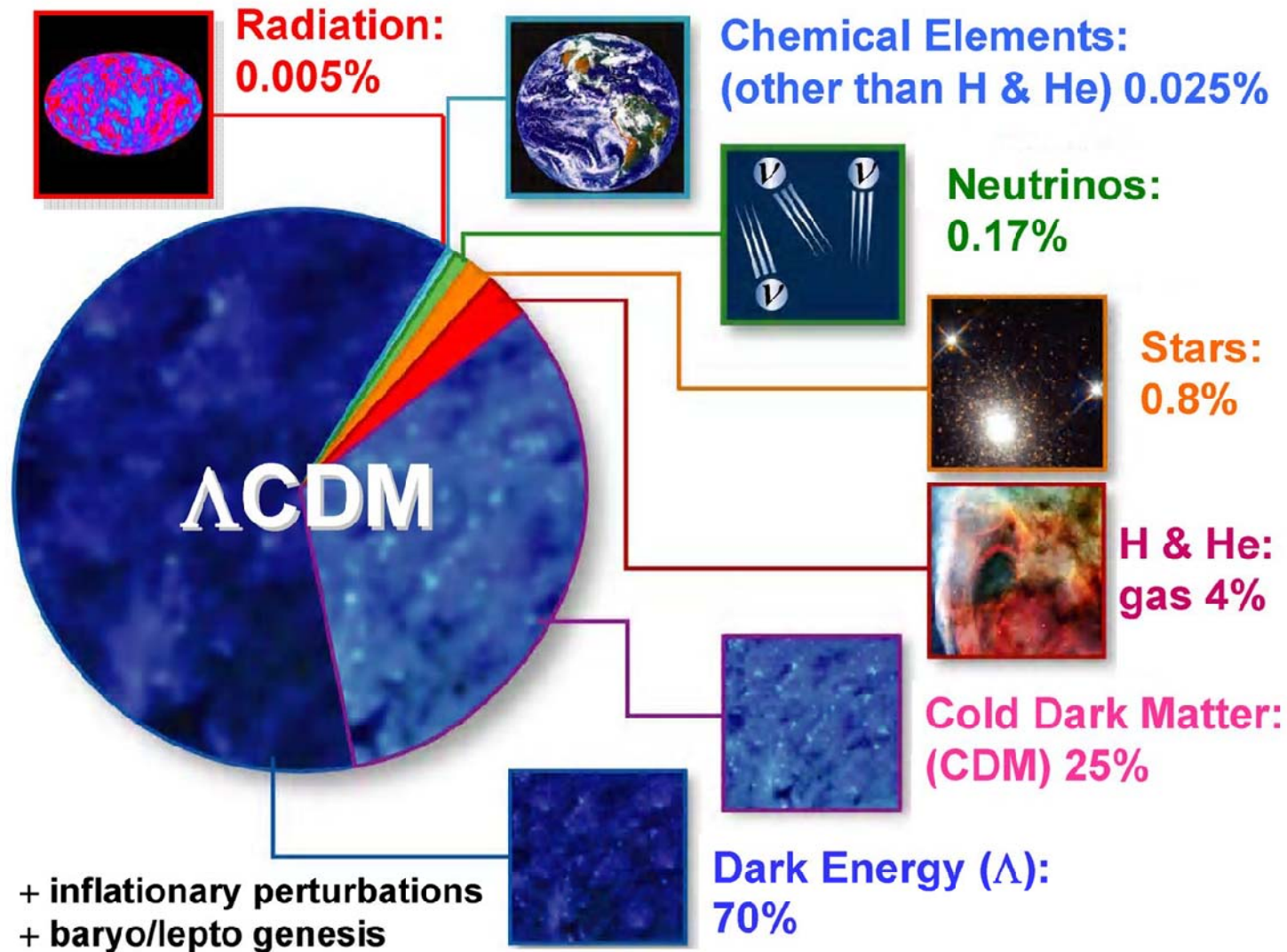


Που βρισκόμαστε λοιπόν σήμερα;

- Βάζοντας όλα τα δεδομένα μαζί (από το WMAP και από τα σουπερνοβα) καταλήγουμε στο (θλιβερό) συμπέρασμα:
 - Η σκοτεινή ενέργεια αποτελεί το 70% του σύμπαντος
 - Η σκοτεινή υλη το 26%
 - Και όλα τα υπόλοιπα (που λίγο-πολύ ξέρουμε) το 4%

...Αλλά ξέρουμε ότι δεν ξέρουμε για το 96% του σύμπαντος!

Από τι αποτελείται το Σύμπαν



Συμπέρασμα

- Η κοσμολογία έχει κάνει την μετατροπή από επιστήμη πεινασμένη για πειραματικά δεδομένα σε επιστήμη οδηγούμενη από πειραματικά δεδομένα.
- Το καθιερωμένο πρότυπο της κοσμολογίας βρίσκεται πλέον στο ίδιο επίπεδο που βρίσκονταν η σωματιδιακή φυσική πριν από 30 χρόνια: προσπαθεί να προχωρήσει πιο πέρα από απλές παραμετροποιήσεις, και είναι έτοιμη να απογειωθεί!
- Οι ακριβείς μετρήσεις του κοσμικού υποβάθρου και η πιο ακριβής μέτρηση κοσμικών αποστάσεων έχει βοηθήσει ιδιαίτερα την κοσμολογία τα τελευταία χρόνια.
- Το πρόβλημα της σκοτεινής ενέργειας είναι συναρπαστικό, αναπάντεχο και φοβερά ενδιαφέρον!

Τέλος

Συμπληρωματικό υλικό

Distance-luminosity relation

$F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ defines luminosity distance - "know" L , measure F

Conservation of energy: flux redshifted: $(1+z)^2 = \left[a(t_0)/a(t_1) \right]^2$

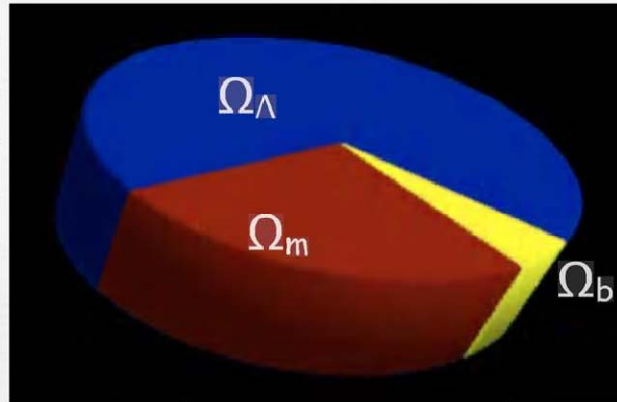
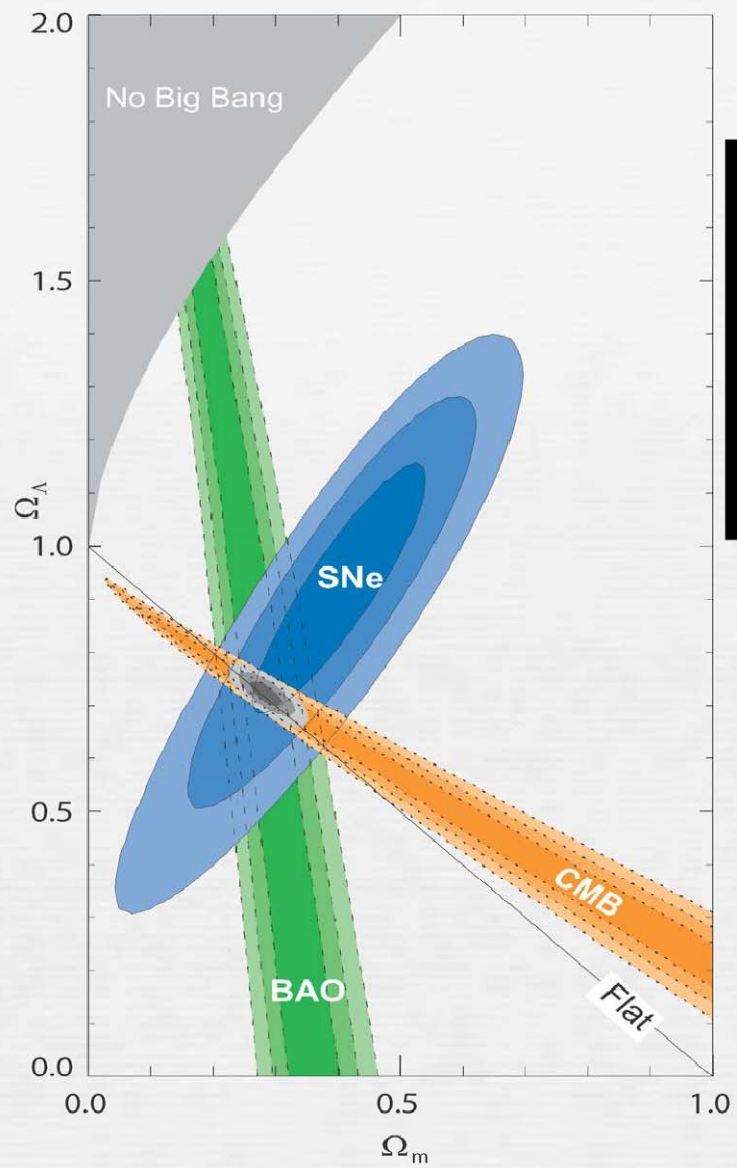
redshift of energy $\times$ redshift of time interval: $(1+z)^2$

$F = \frac{L}{A}$ A = area of 2S centered on source at time of detection, t_0

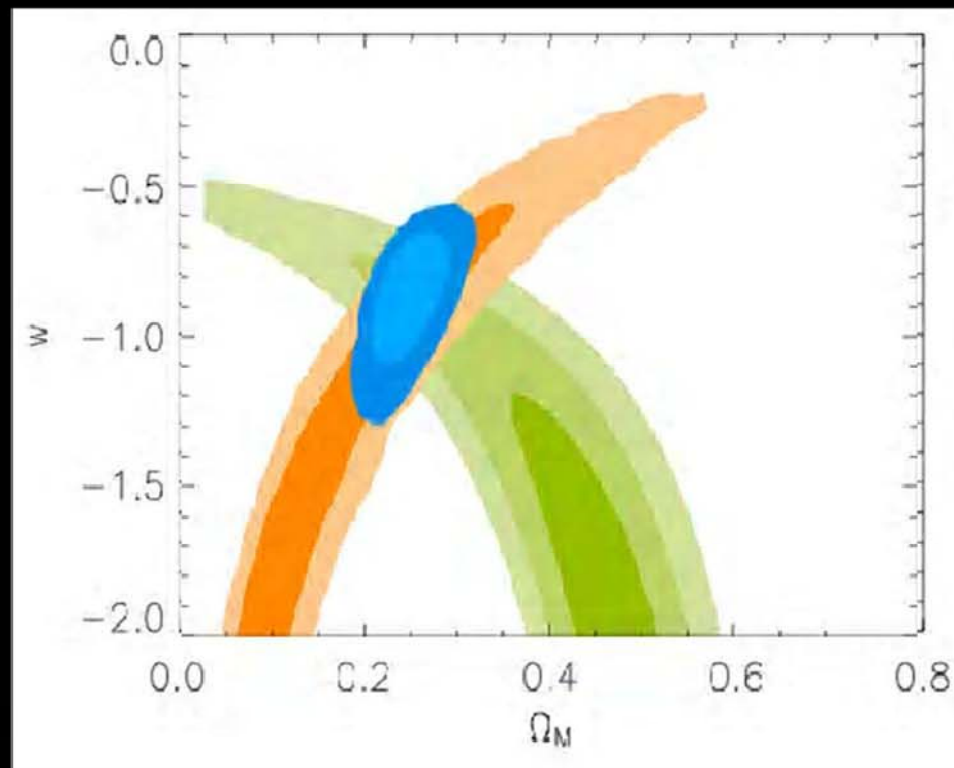
$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right) \Rightarrow A = 4\pi a^2(t_0) r^2$$

$$F = \frac{L}{4\pi a^2(t_0) r^2 (1+z)^2} \Rightarrow \boxed{d_L = a(t_0) r (1+z)}$$

light from comoving coordinate r reaches us now redshifted by an amount $(1+z)$



Dark energy



2dfGRS

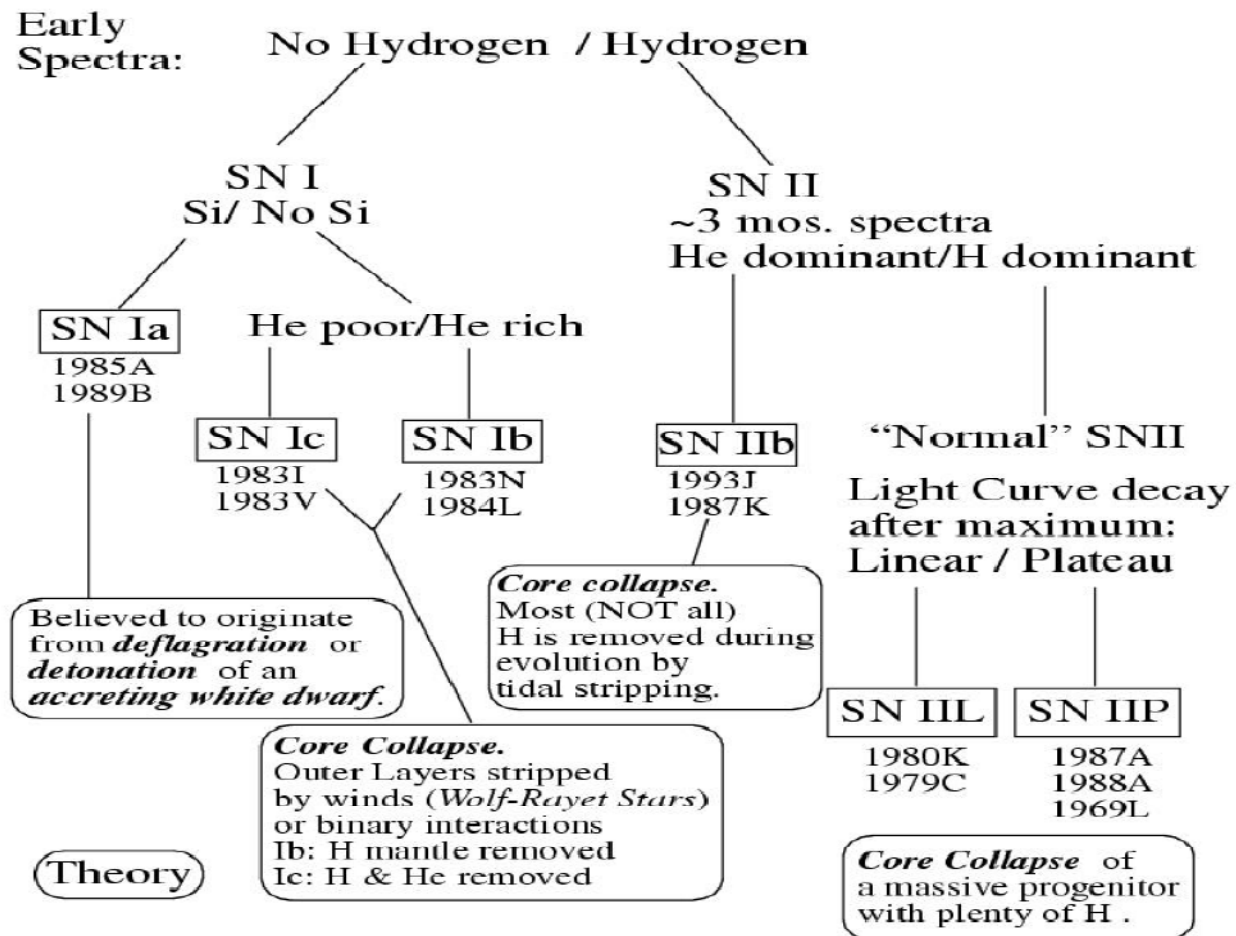
H prior

WMAPII

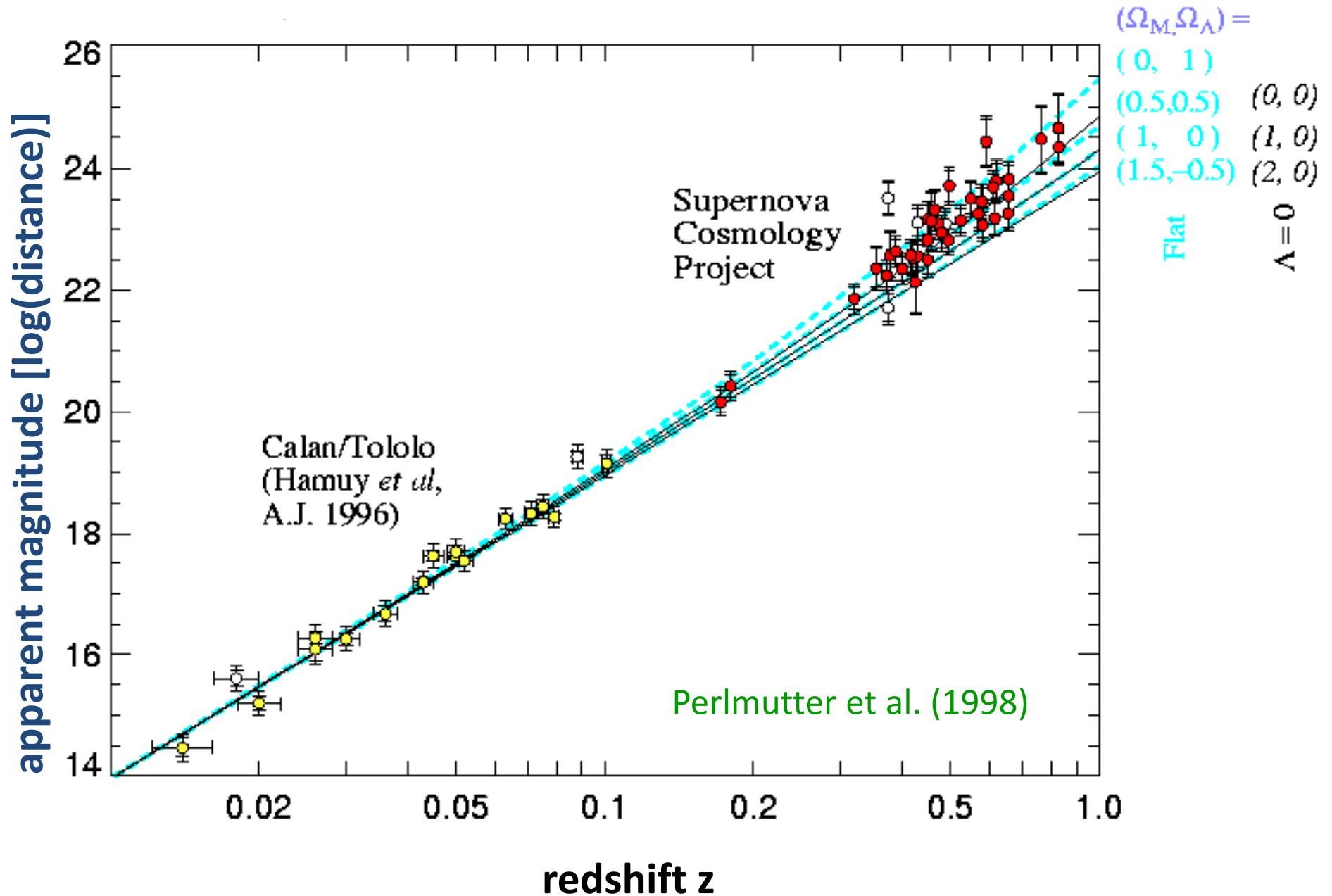
SN

With DE clustering

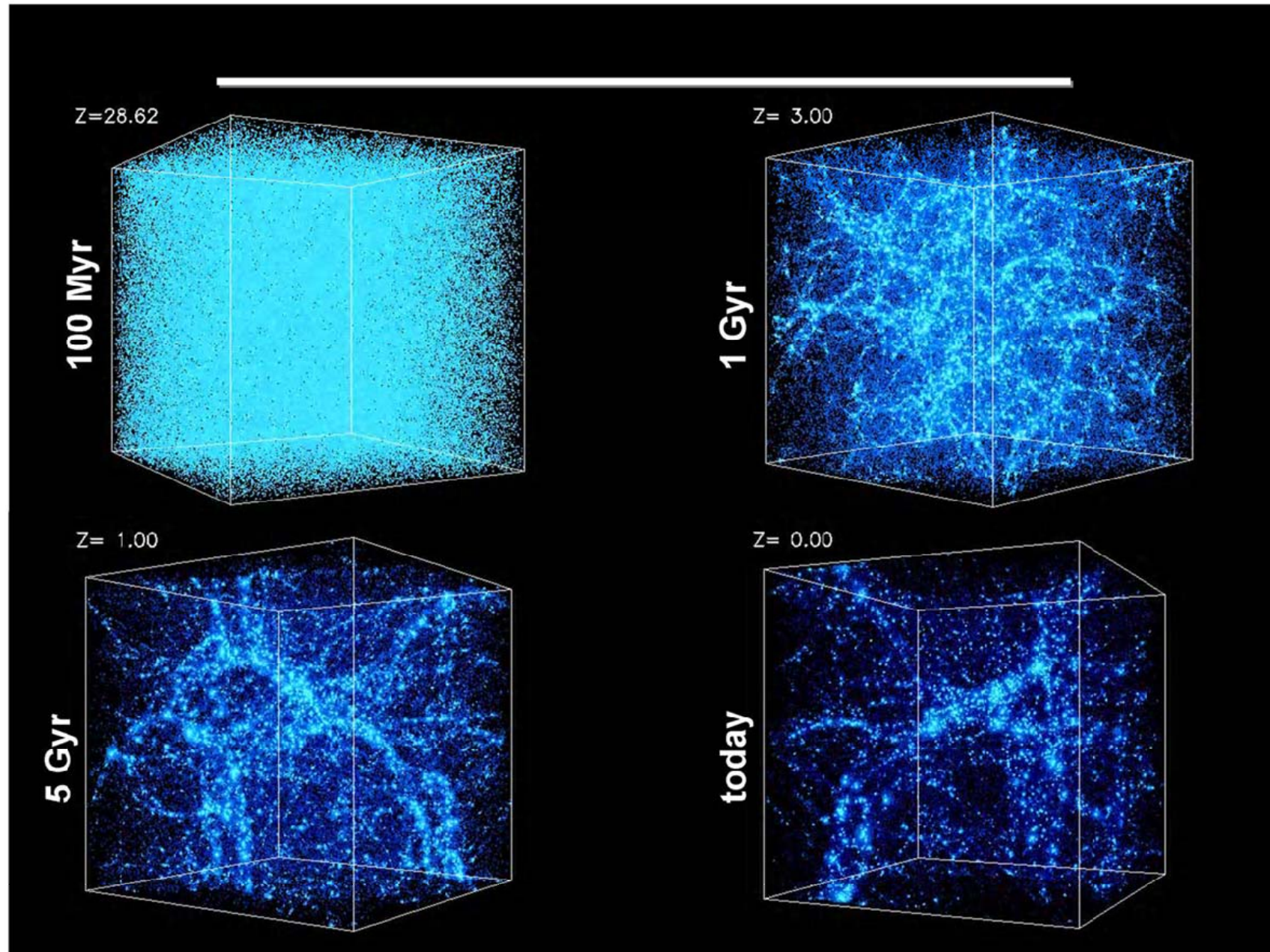
Ταξινόμηση σουπερνοβα



Type Ia supernova Hubble diagram



Large scale structure formation



Κοσμικός πληθωρισμός

- Το σύμπαν δείχνει πολύ πιο ομοιογενές από ότι επιτρέπει η αιτιότητα
- Μέρη στον ουρανό που απέχουν πάνω από 2 μοίρες, δεν είχαν δυνατότητα να αλληλοαντιδράσουν (αν δεν υπήρχε κοσμικός πληθωρισμός) γιατί έχουν απόσταση μεγαλύτερη από ότι θα μπορούσε να διανύσει το φως
- Στη θεωρία του κοσμικού πληθωρισμού το σύμπαν αυξήθηκε 100 φορές κατά ένα παράγοντα 2 σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η κάθε φορά πήρε 10^{-37} δευτερόλεπτα και το σύμπαν αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 2^{100}
- Το ορατό σύμπαν λοιπόν προήρθε από κάτι που είχε το μέγεθος μιας μπάλας του τένις πριν τον πληθωρισμό!