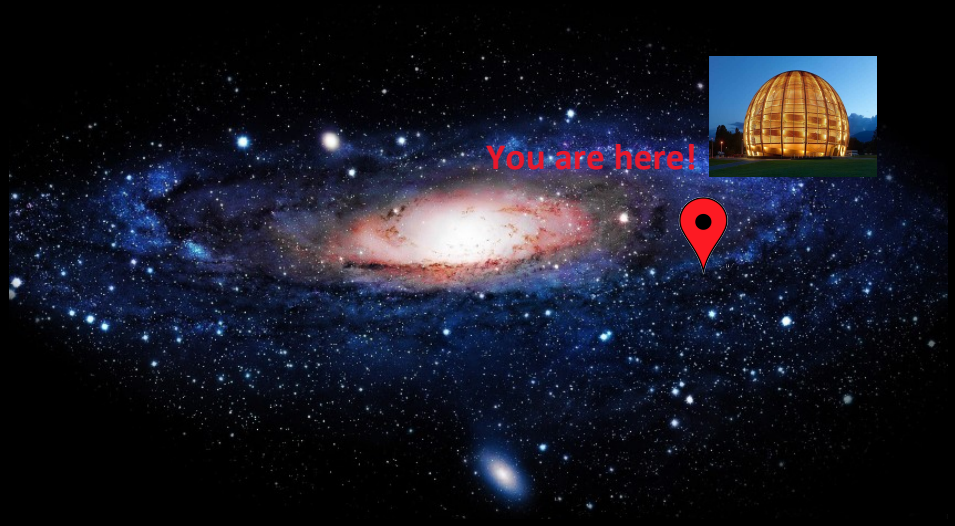
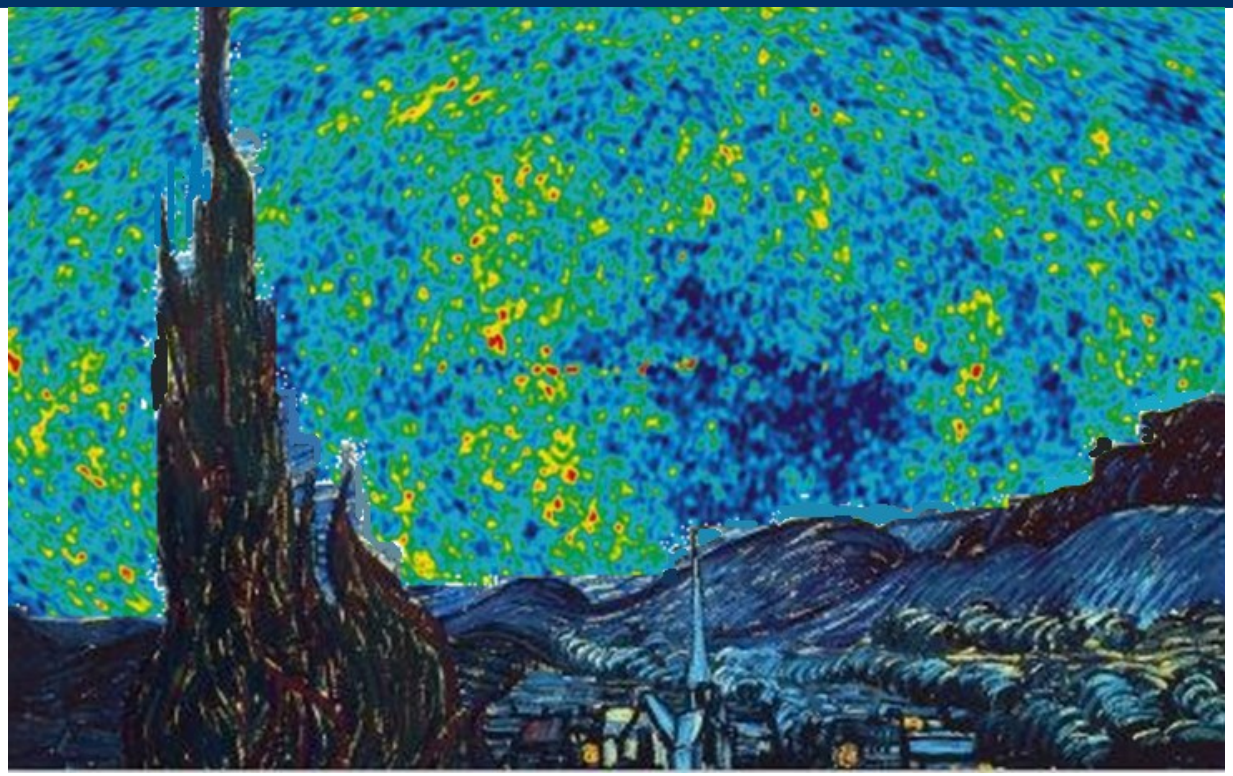
Ελένη Πετράκου - National Taiwan University

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΑΚΗ ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ

Πρόγραμμα επιμόρφωσης ελλήνων εκπαιδευτικών
CERN, 7 Νοεμβρίου 2014





PLANCK
gravitational
detectors
background
microwave
darkenergy
nonbaryonic
recombination
expansion
darkmatter
lensing
constant
harmonics
relativity
inflation
flatness
bigbang
cosmological
CDM
universe
WMAP

1929: απομάκρυνση γαλαξιών

1916: γενική σχετικότητα

θεωρία της μεγάλης έκρηξης

προβλέψεις

πειραματική επαλήθευση!

περιήλιο Ερμή
βαρυτικοί φακοί

προβλέψεις

πειραματική επαλήθευση!

αναλογίες στοιχείων
ακτινοβολία υποβάθρου

θεωρητικό εργαλείο για την περιγραφή της ιστορίας του σύμπαντος

1929: απομάκρυνση γαλαξιών

1916: γενική σχετικότητα

Σύγχρονη κοσμολογία

θεωρία της μεγάλης έκρηξης

προβλέψεις

πειραματική επαλήθευση!

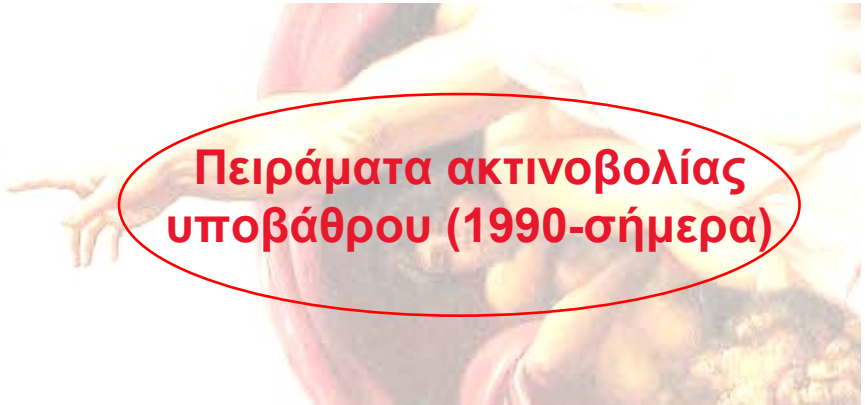
περιήλιο Ερμή
βαρυτικοί φακοί

προβλέψεις

πειραματική επαλήθευση!

αναλογίες στοιχείων
ακτινοβολία υποβάθρου

θεωρητικό εργαλείο για την περιγραφή της ιστορίας του σύμπαντος



Πειράματα ακτινοβολίας υποβάθρου (1990-σήμερα)

Ιστορία μετά τη μεγάλη έκρηξη

Διαστολή → ολοένα λιγότερο ενεργητικά σωματίδια (πτώση θερμοκρασίας)

Σχηματισμός άστρων και γαλαξιών

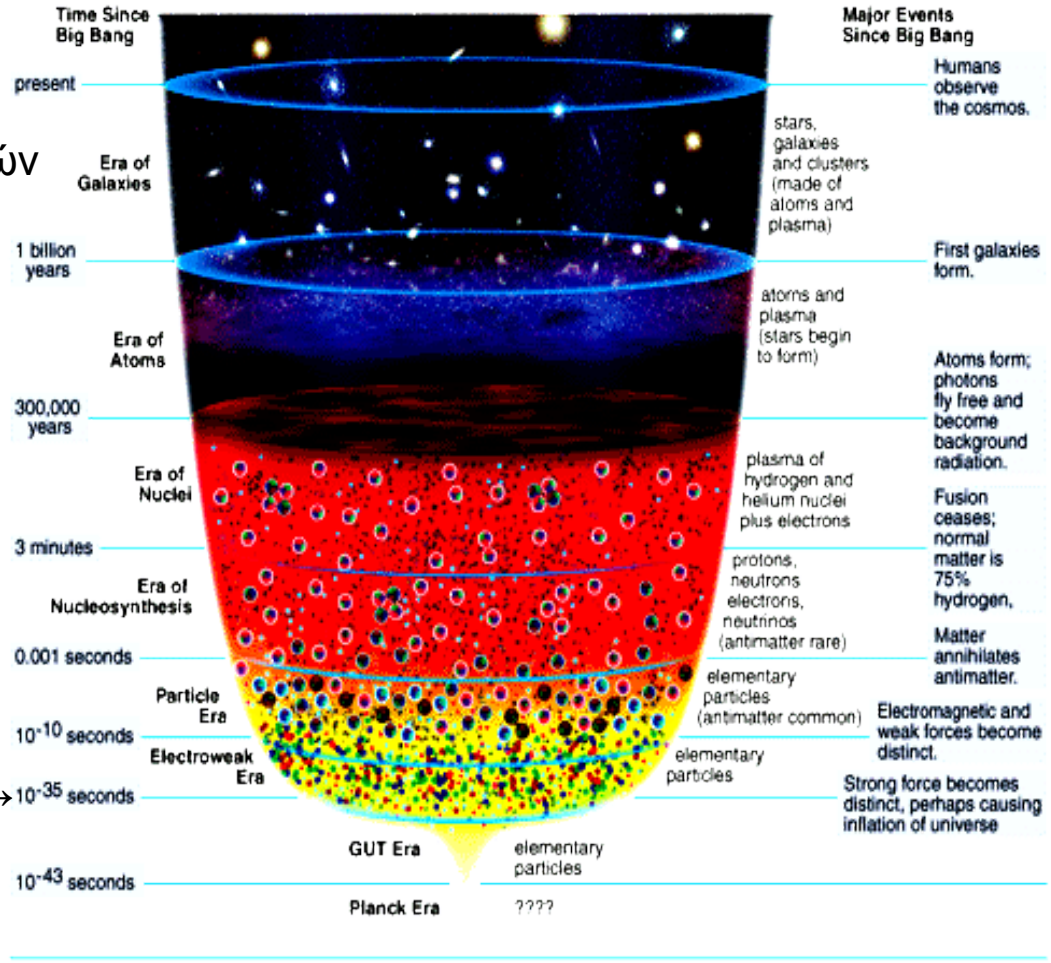
"Επανασύνδεση" →
Σχηματισμός ατόμων

Σχηματισμός πυρήνων →

Η ηλεκτρασθενής διασπάται →

Η ισχυρή δύναμη αποκόπτεται →

? Ενοποιημένες δυνάμεις



Ιστορία μετά τη μεγάλη έκρηξη

Διαστολή → ολοένα λιγότερο ενεργητικά σωματίδια (πτώση θερμοκρασίας)

Σχηματισμός άστρων και γαλαξιών

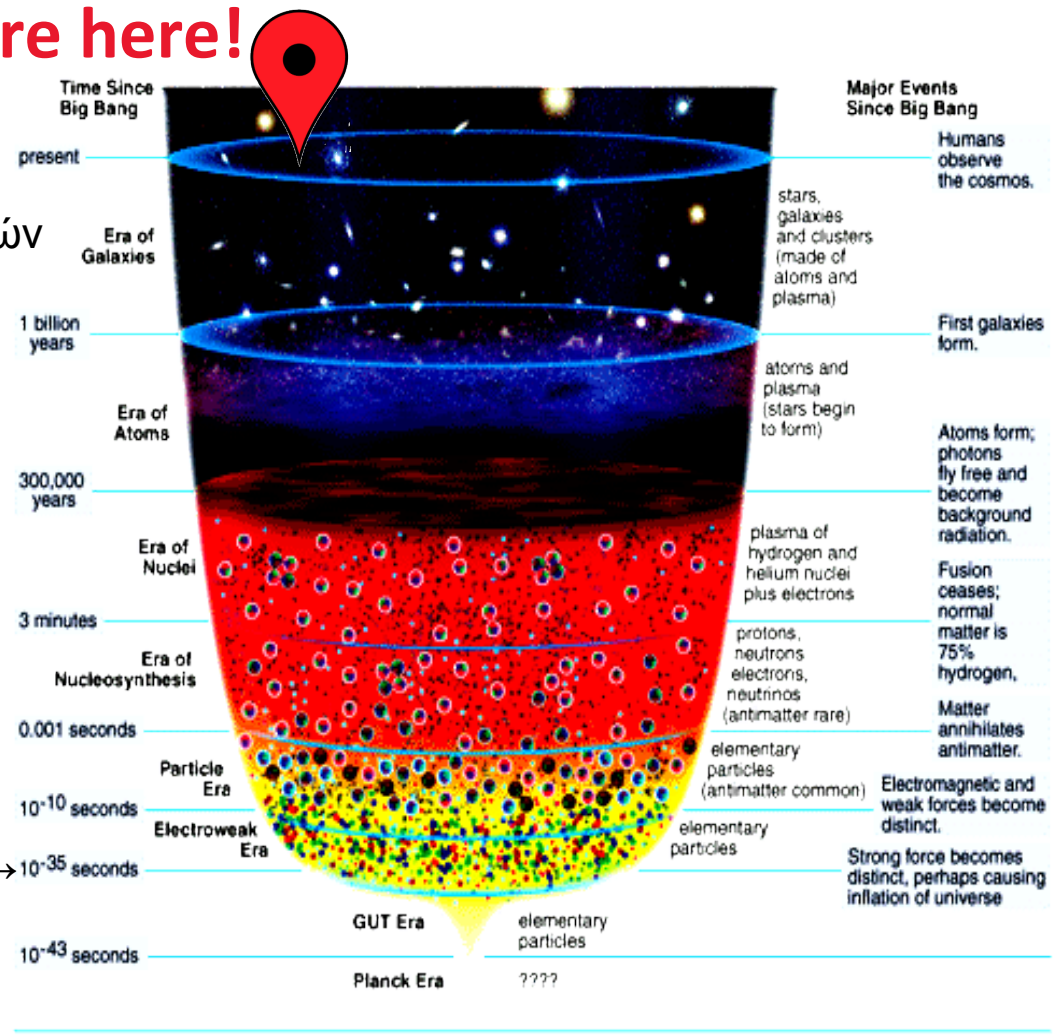
"Επανασύνδεση" → Σχηματισμός ατόμων

Σχηματισμός πυρήνων →

Η ηλεκτρασθενής διασπάται →

Η ισχυρή δύναμη αποκόπτεται →

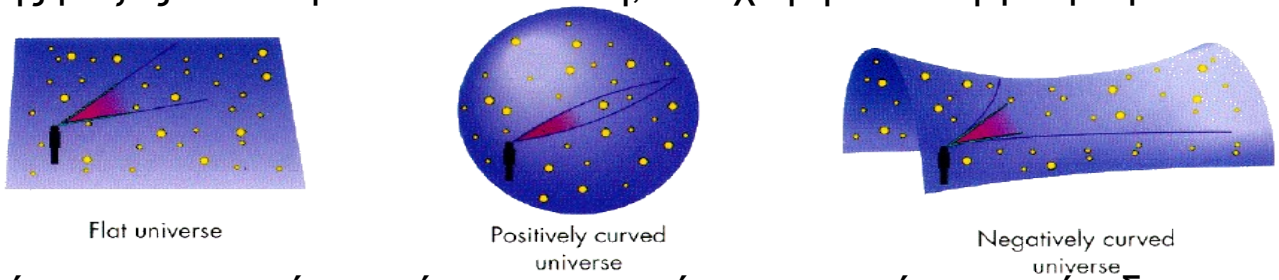
? Ενοποιημένες δυνάμεις



Γεωμετρία του σύμπαντος

Γενική σχετικότητα: η μάζα καμπυλώνει το χωρόχρονο

- Ποσό της μάζας στο σύμπαν → επίπεδη, ανοιχτή ή κλειστή γεωμετρία



Υπολογισμός της γεωμετρίας από αστροφυσικές παρατηρήσεις: επίπεδη, με πολύ μεγάλη ακρίβεια.
Υπολογισμός της μάζας από παρατηρήσεις γαλαξιών: πολύ μικρότερη από την κρίσιμη ποσότητα!

Επιπλέον, η διαστολή δείχνει να επιταχύνεται εδώ και 5 δις χρόνια! (παρατηρήσεις σουπερνόβα σε διάφορες αποστάσεις)

Με όρους γενικής σχετικότητας, οι παρατηρήσεις "δείχνουν" την κοσμολογική σταθερά: έναν όρο στις εξισώσεις χωρίς ξεκάθαρη προέλευση αλλά υπεύθυνο για την επιτάχυνση της διαστολής.

→ **Σκοτεινή ενέργεια (dark energy)**

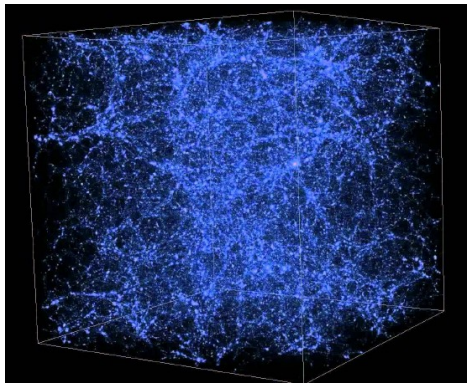
Σχηματισμός δομών

Γιατί υπάρχουν άστρα, γαλαξίες, σμήνη γαλαξιών και πολύ κενός χώρος;
Αντί για το διάχυτο νέφος αερίων που άφησε πίσω της η επανασύνδεση;

→ Βαρυτική κατάρρευση περιοχών υδρογόνου, κατακερματισμός σε δομές

Επικρατέστερο κοσμολογικό μοντέλο:
ΛCDM (lambda - cold dark matter)
"Μοντέλο ψυχρής σκοτεινής ύλης με κοσμολογική σταθερά"

- κοσμολογική σταθερά = επιταχυνόμενη διαστολή
- ψυχρή ύλη = με χαμηλές ενέργειες → ο σχηματισμός δομών άρχισε από άστρα και προχώρησε σε γαλαξίες και σμήνη γαλαξιών
- **σκοτεινή ύλη**



Σκοτεινή ύλη

- Περιστροφή γαλαξιών
- Βαρυτικοί φακοί

→ Ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων μάζας στους γαλαξίες που δεν εκπέμπουν φως ή κάποιο άλλο "σήμα" (ανιχνεύσιμο από εμάς μέχρι τώρα)

- Συμβιβάζει τα μοντέλα σχηματισμού των δομών με τις παρατηρήσεις

Πιθανέστερη εξήγηση: σωματίδια με εξωτικές ιδιότητες

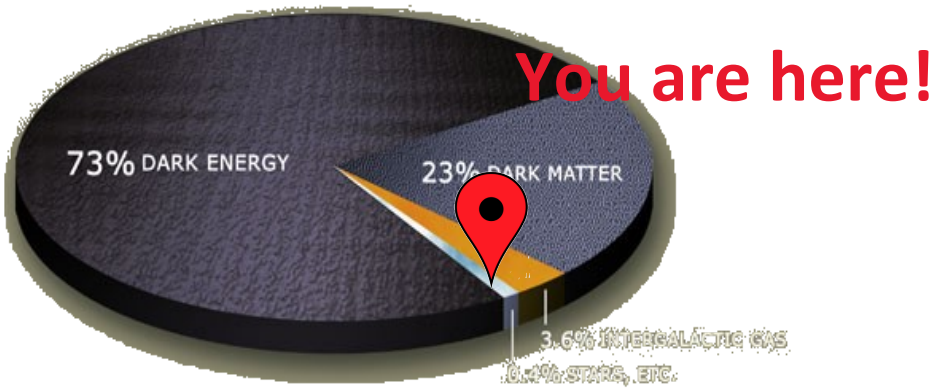
Σκοτεινή ύλη

- Περιστροφή γαλαξιών
- Βαρυτικοί φακοί

→ Ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων μάζας στους γαλαξίες που δεν εκπέμπουν φως ή κάποιο άλλο "σήμα" (ανιχνεύσιμο από εμάς μέχρι τώρα)

- Συμβιβάζει τα μοντέλα σχηματισμού των δομών με τις παρατηρήσεις

Πιθανέστερη εξήγηση: σωματίδια με εξωτικές ιδιότητες



Πληθωρισμός

Γιατί υπάρχουν άστρα, γαλαξίες, σμήνη γαλαξιών και πολύ κενός χώρος;
Αντί για το διάχυτο νέφος αερίων που άφησε πίσω της η επανασύνδεση;
→ Βαρυτική κατάρρευση περιοχών υδρογόνου, κατακερματισμός σε δομές

Πώς ένα τόσο ομοιογενές νέφος άρχισε να κατακερματίζεται;

→ Ύπαρξη "σπόρων" για τη βαρυτική κατάρρευση,
ελαφρές διακυμάνσεις στην ομοιογένεια

Πώς εμφανίστηκαν;

Πληθωρισμός

Δημοφιλέστερη θεωρία για τα γεγονότα ΠΡΙΝ τη μεγάλη έκρηξη:
Inflation
"Πληθωρισμός" (διόγκωση)

- Προσφέρει εξηγήσεις για την ύπαρξη των πρωταρχικών διακυμάνσεων, την παρατηρούμενη ισοτροπία του σύμπαντος και την επιπεδότητά του.
- Θεωρητικά δείχνει σαν "φυσική συνέπεια" της κβαντομηχανικής.
- Οι παρατηρήσεις προσφέρουν στοιχεία υπέρ του πληθωρισμού.

Πληθωρισμός

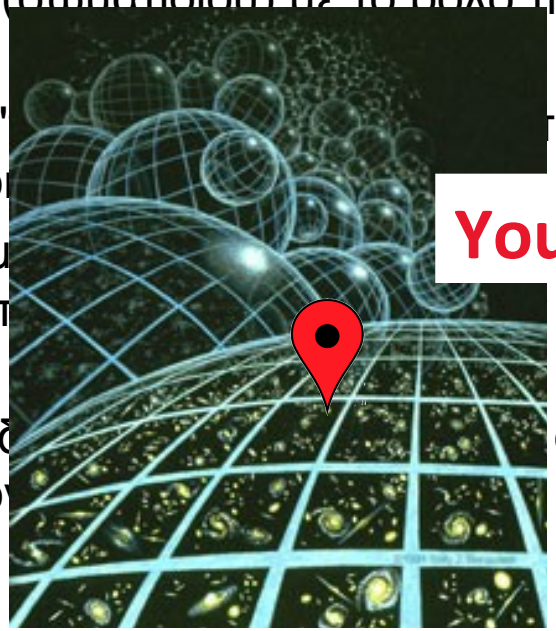
Δημοφιλέστερη θεωρία για τα γεγονότα ΠΡΙΝ τη μεγάλη έκρηξη:
Inflation
"Πληθωρισμός" (διόγκωση)

- Σε ελάχιστο χρόνο μετά την "αρχή" το συμπάν διεστάλλη κατά 10^{26} φορές!
- Αιτία: η παρουσία ενός πεδίου (σωματιδίου) με το ρόλο της κοσμολογικής σταθεράς.
- Στο τέλος αυτής της περιόδου "πληθωρισμού" αρχίζουν τα φαινόμενα της "μεγάλης έκρηξης" και η υπόλοιπη γνωστή ιστορία.
- Μία από τις συνέπειες: Το "σύμπαν" αποτελεί μία μόνο περιοχή ολόκληρου του σύμπαντος, χωρίς τη δυνατότητα επικοινωνίας με τις υπόλοιπες περιοχές.
- Προέλευση των πρωταρχικών διακυμάνσεων: Κβαντικές διακυμάνσεις οι οποίες διογκώθηκαν σε "αστρονομικές" διαστάσεις!

Πληθωρισμός

Δημοφιλέστερη θεωρία για τα γεγονότα ΠΡΙΝ τη μεγάλη έκρηξη:
Inflation
"Πληθωρισμός" (διόγκωση)

- Σε ελάχιστο χρόνο μετά την "αρχή" το συμπάν διεστάλλη κατά 10^{26} φορές!
- Αιτία: η παρουσία ενός πεδίου (σωματιδίου) με το ρόλο της κοσμολογικής σταθεράς.
- Στο τέλος αυτής της περιόδου " τα φαινόμενα της "μεγάλης έκρηξης" και η υπόλοι
- Μία από τις συνέπειες: Το "σύμ του σύμπαντος, χωρίς τη δυνατ υπόλοιπες περιοχές.
- Προέλευση των πρωταρχικών δ διακυμάνσεις οι οποίες διογκώθηκαν σε "αστρο



Κοσμολογία και στοιχειώδη σωματίδια

Αμοιβαία σχέση

- Τα φαινόμενα που εξετάζει η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων εμφανίζονται σε "κοσμολογικές" συνθήκες:

  Μεγάλες ενέργειες → εμφάνιση νέων σωματιδίων, δυνάμεων, ιδιοτήτων

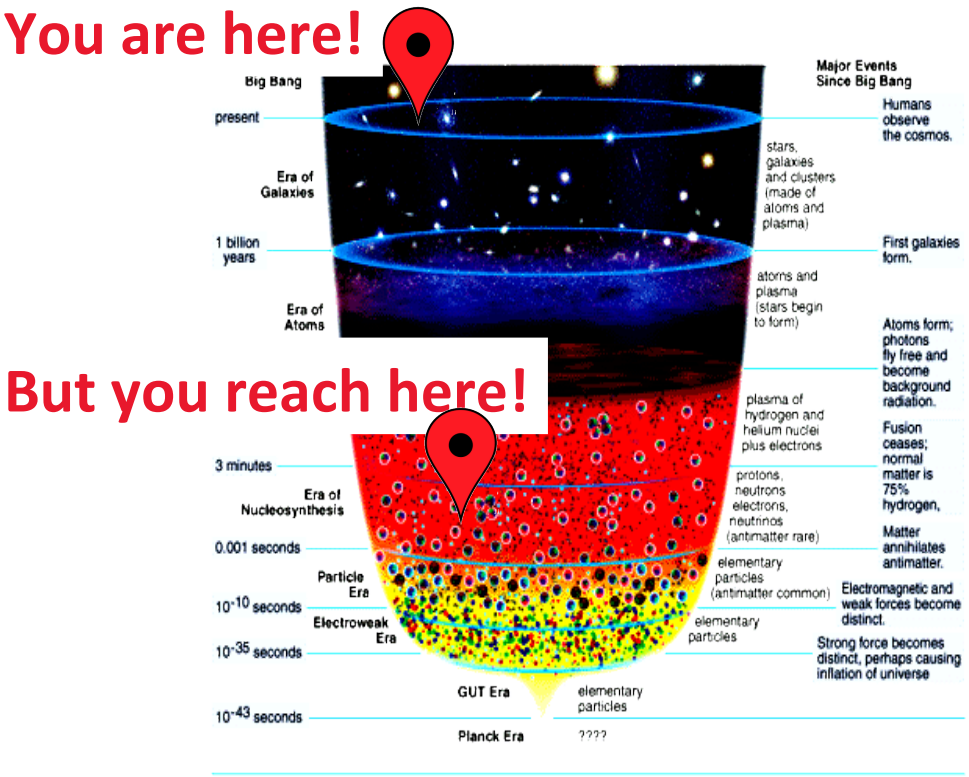
- Τα γεγονότα στην "επικράτεια" των στ. σωματιδίων διαπνέουν τα φαινόμενα κοντά στην αρχή της ιστορίας.

Αμοιβαία σχέση

- Τα φαινόμενα που εξετάζει η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων εμφανίζονται σε "κοσμολογικές" συνθήκες:

  Μεγάλες ενέργειες → εμφάνιση νέων σωματιδίων, δυνάμεων, ιδιοτήτων

- Τα γεγονότα στην "επικράτεια" των στ. σωματιδίων διαπνέουν τα φαινόμενα κοντά στην αρχή της ιστορίας.



Κοινή περιγραφή

- Με τους όρους της σύγχρονης φυσικής, η περιγραφή των στ. σωματιδίων είναι αναπόσπαστη με την περιγραφή των θεμελιωδών δυνάμεων.
- → Περιγραφή των φαινομένων στην αρχή της ιστορίας.

- Βαρυτική δύναμη: κατ'εξοχήν σημαντική για την περιγραφή της εξέλιξης του σύμπαντος.
- → Η ενιαία περιγραφή της με τις υπόλοιπες είναι το "άγιο δισκοπότηρο" της θεωρητικής φυσικής.

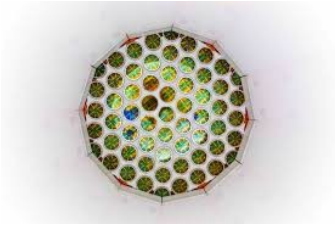
- → → → Κοινός φορμαλισμός.
- Ο όρος "θεωρητική φυσική" καλύπτει και τους δύο κλάδους.

Πειράματα κοσμολογίας

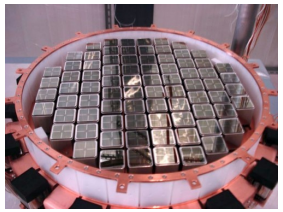
Ενδεικτικά...

Υπόγεια πειράματα σκοτεινής ύλης

LUX



XENON



CDMS

Πειράματα κοσμικών ακτίνων

AMS

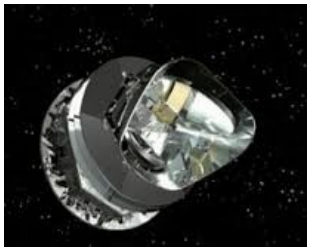
PAMELA

Πειράματα ακτινοβολίας υποβάθρου

BICEP2

POLARBEAR

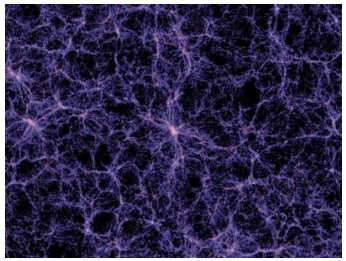
PLANCK



Υπολογιστικές προσομοιώσεις

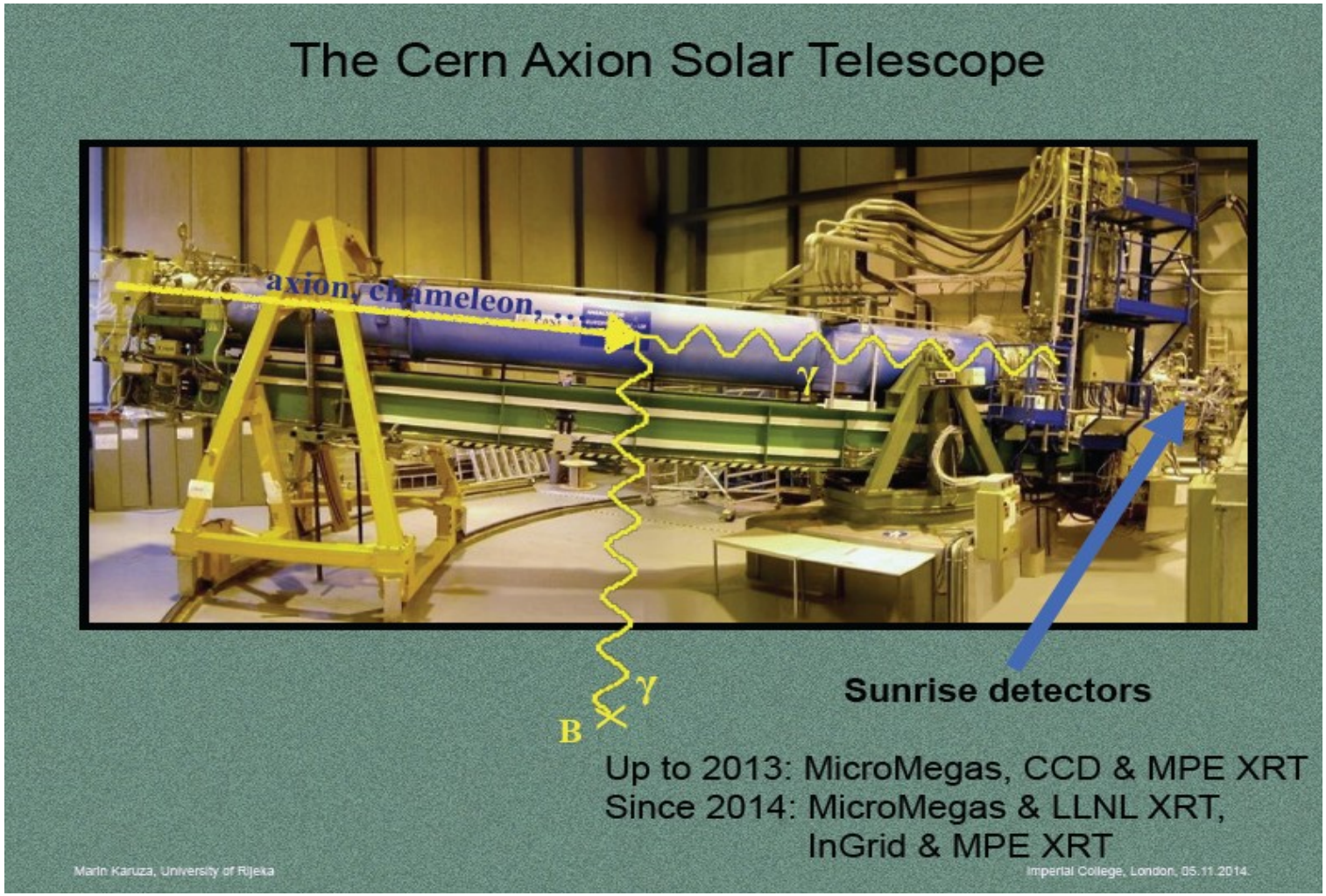
Bolshoi simulation

Millenium simulation



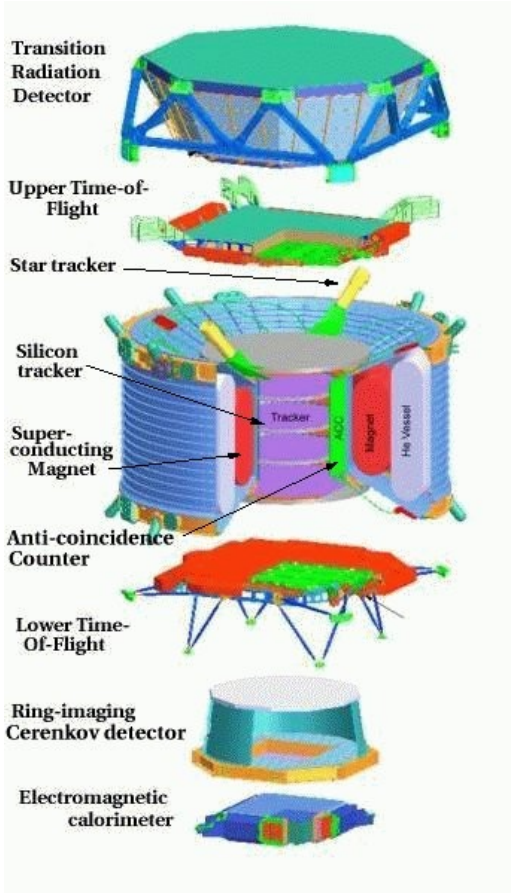
Στο CERN: πείραμα CAST

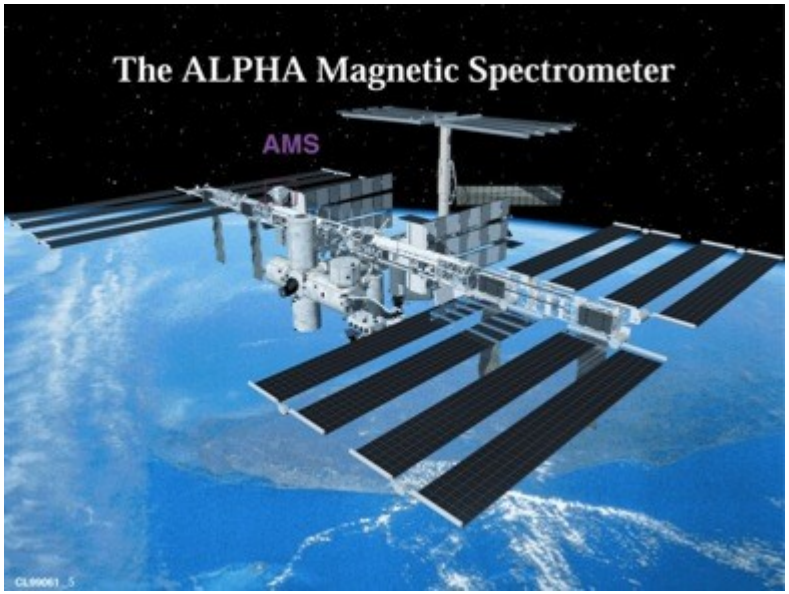
- Αξιόνιο: υποθετικό σωματίδιο για την επίλυση του προβλήματος "CP-strong".
- Καλός υποψήφιος για σκοτεινή ύλη: ουδέτερο, αδύναμη αλληλεπίδραση με τη συνηθισμένη ύλη, άφθονη ποσότητα.



Στο CERN: πείραμα AMS

- Νετραλίνο: υποθετικό σωματίδιο του υπερσυμμετρικού μοντέλου.
- Καλός υποψήφιος για σκοτεινή ύλη: ουδέτερο, αδύναμη αλληλεπίδραση με τη συνηθισμένη ύλη, σταθερότητα (απουσία διασπάσεων).
- Κοσμικές ακτίνες: αναζήτηση για εξαΰλωση σκοτεινής ύλης.





Υπόβαθρο κοσμικής ακτινοβολίας

Επανασύνδεση:
Το σύμπαν κρύωσε αρκετά ώστε
να σχηματιστούν άτομα.
Μέχρι τότε υπήρχε συνεχής ανταλλαγή
ακτινοβολίας ανάμεσα στα σωματίδια
ύλης.
~300.000 χρόνια μετά τη μεγάλη έκρηξη

Το σύμπαν έγινε διάφανο
Η ακτινοβολία που εκπέμφθηκε μόλις
πριν την επανασύνδεση ελευθερώθηκε.
Και συνεχίζει να ταξιδεύει για τα επόμενα
13 δις χρόνια.

Καθώς το σύμπαν διαστέλλεται,
η ενέργεια αυτών των φωτονίων
μειώνεται...

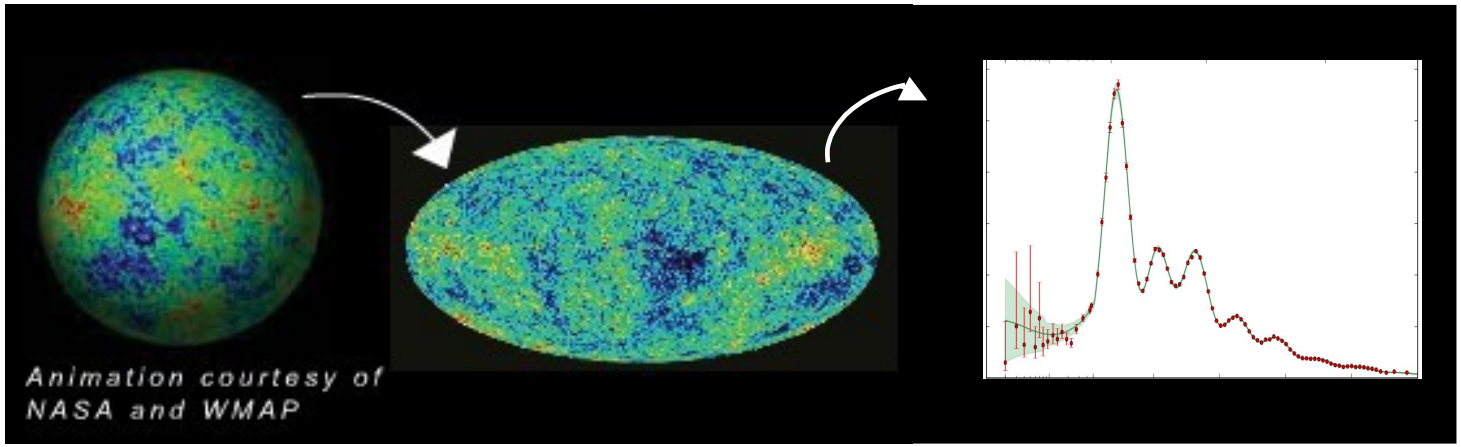
**...Και πλέον φτάνουν στα τηλεσκόπιά μας με
θερμοκρασία 2.7 βαθμών πάνω από το απόλυτο μηδέν!**

Μπορείτε να δείτε το υπόβαθρο:
Σε αναλογική τηλεόραση, ένα μικρό
ποσοστό του στατικού θορύβου
οφείλεται σε αυτό :)

Όμως το τι συνέβαινε <u>πριν την επανασύνδεση</u> άφησε τα ίχνη του!

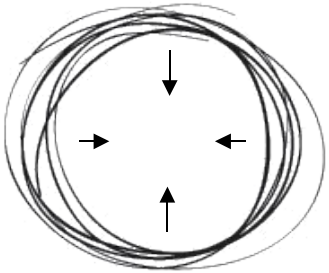
Υπόβαθρο κοσμικής ακτινοβολίας

Cosmic microwave background (CMB)
ή Cosmic microwave background radiation (CMBR)

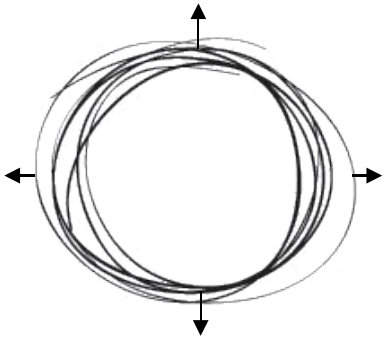


Πριν την επανασύνδεση

Βαρυτική κατάρρευση περιοχών πλάσματος:



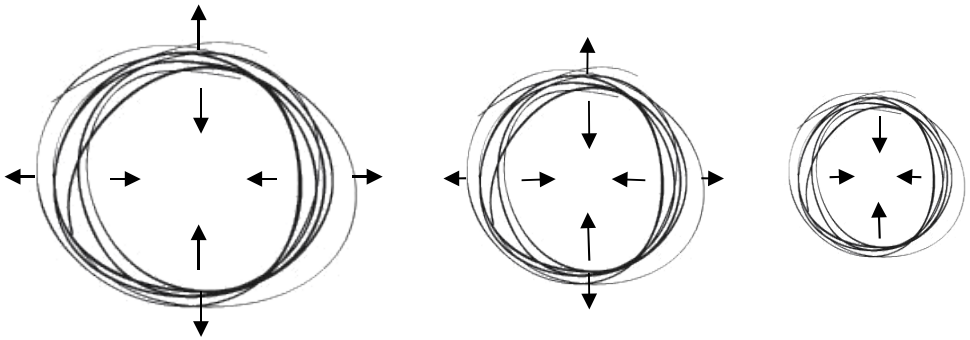
Συνεχής ανταλλαγή ακτινοβολίας! Και ώθηση προς τα έξω:



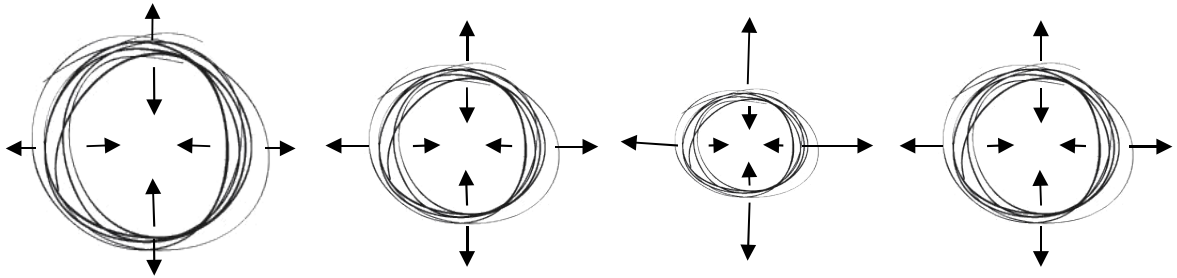
Βαρυτική συστολή → αύξηση πυκνότητας → υπερίσχυση της πίεσης ακτινοβολίας → διαστολή → μείωση πυκνότητας → ελάττωση πίεσης ακτινοβολίας → υπερίσχυση της βαρυτικής έλξης → συστολή ...

Οι κινήσεις γεννούν ακουστικά κύματα που διατρέχουν την κάθε περιοχή.

Πριν την επανασύνδεση



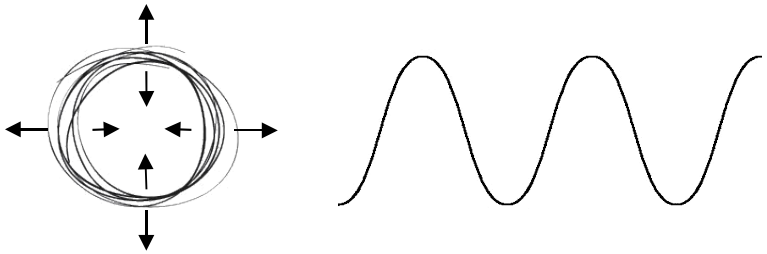
Ένα τμήμα πλάσματος αρκετά μεγάλο ώστε μόνο να συστέλλεται μέχρι την επανασύνδεση.



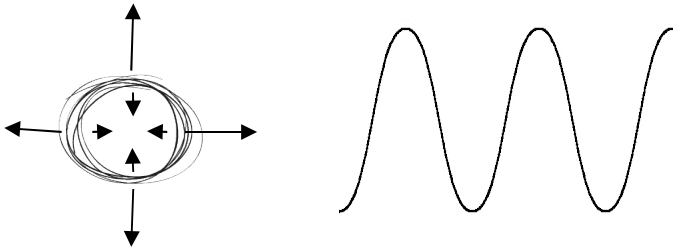
Αυτή η περιοχή πρόλαβε να διασταλλεί!

Πριν την επανασύνδεση

Περιοχές διαφορετικού μεγέθους διατρέχονται και από ακουστικά κύματα διαφορετικού μήκους κύματος,



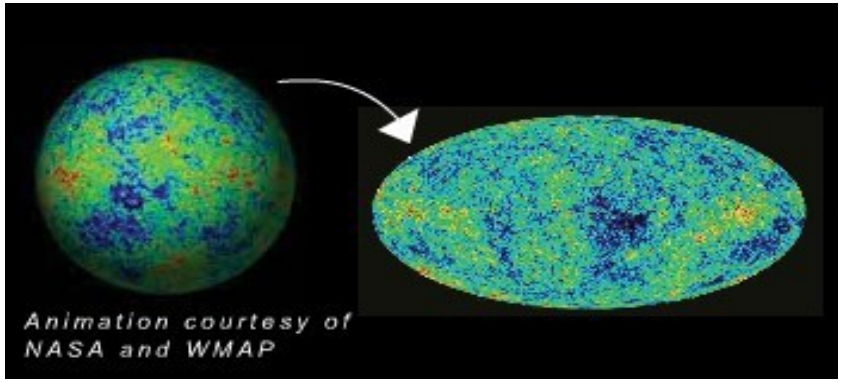
Περιοχές που βρίσκονταν σε φάση ισχυρής συστολής ή διαστολής έχουν κύματα μεγαλύτερης έντασης από εκείνες που βρίσκονταν πιο κοντά στην ισορροπία,



Τα χαρακτηριστικά των ακουστικών κυμάτων διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου φωτός (μέσω βαρυτικών αλλαγών και μετατόπισης Doppler).

Ανάλυση του CMB

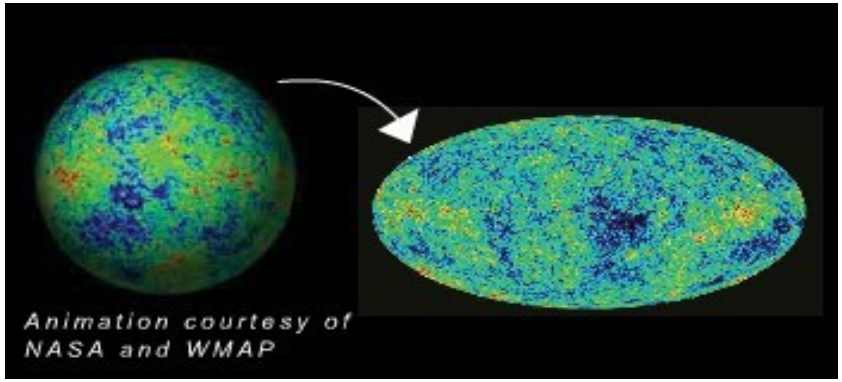
Κοιτάζοντας το χάρτη του CMB, αυτό που μετράμε είναι η ένταση του φωτός στις περιοχές διαφορετικού μεγέθους.

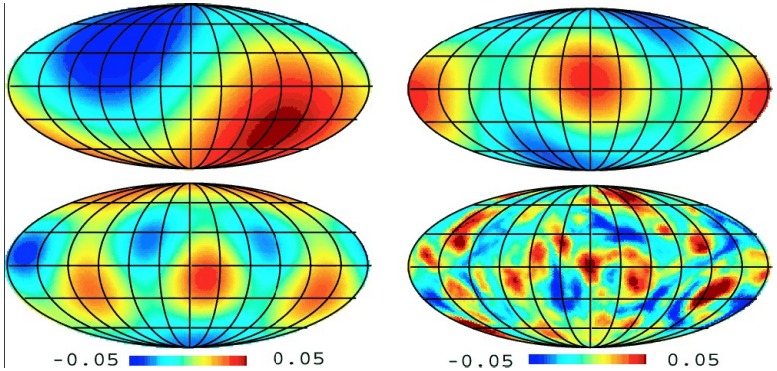


Ανάλυση του CMB

Κοιτάζοντας το χάρτη του CMB, αυτό που μετράμε είναι η ένταση του φωτός στις περιοχές διαφορετικού μεγέθους.

Το μέγεθος της κάθε περιοχής πλάσματος αποτυπώνεται στο γωνιακό μέγεθος που παρατηρούμε. Η ένταση της εκπομπής αντιστοιχεί στην απόκλιση από τη μέση θερμοκρασία.

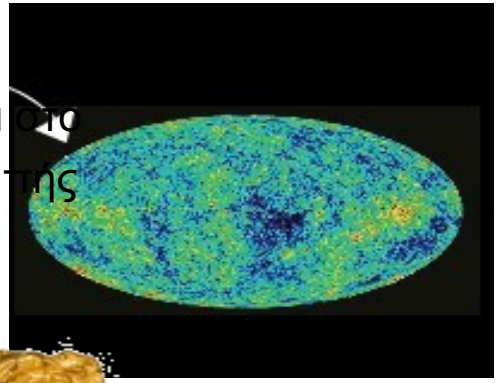


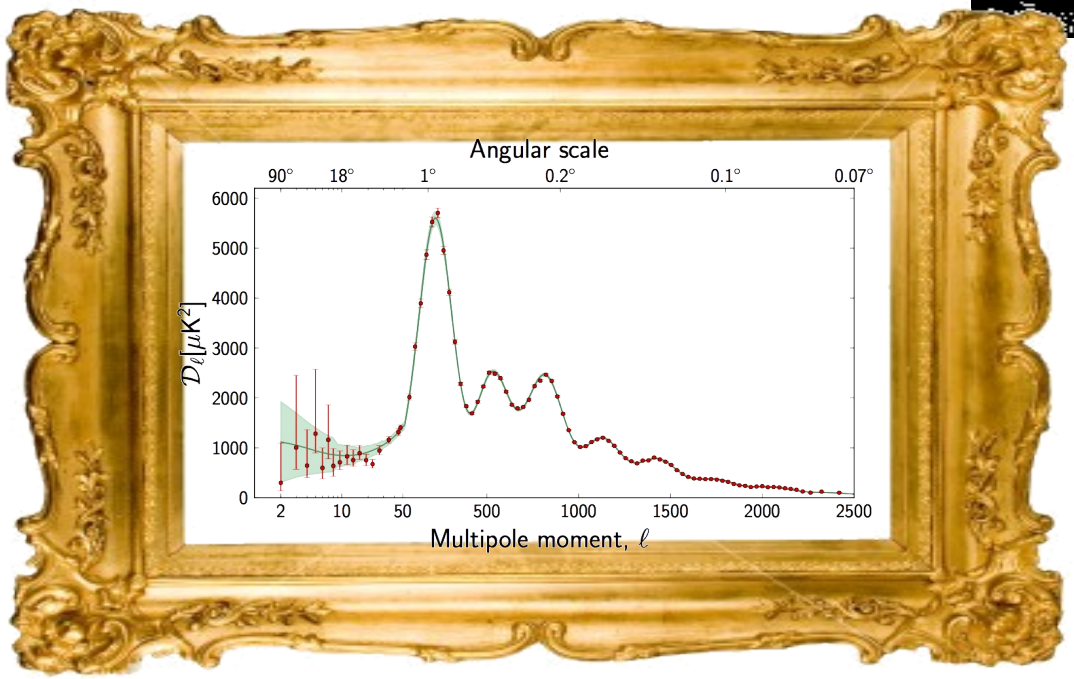


Ανάλυση του CMB

Κοιτάζοντας το χάρτη του CMB, αυτό που μετράμε είναι η ένταση του φωτός στις περιοχές διαφορετικού μεγέθους.

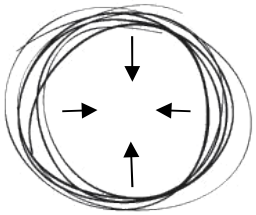
Το μέγεθος της κάθε περιοχής πλάσματος αποτυπώνεται στο γωνιακό μέγεθος που παρατηρούμε. Η ένταση της εκπομπής αντιστοιχεί στην απόκλιση από τη μέση θερμοκρασία.



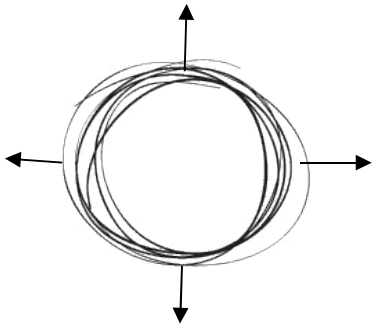


Αρμονική ανάλυση: ένταση φωτός σαν συνάρτηση των διαστάσεων κάθε περιοχής στο χάρτη

Παράδειγμα: Μέτρηση του ποσοστού σκοτεινής ύλης



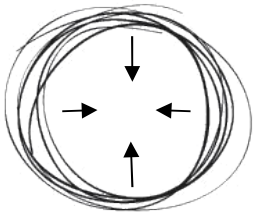
Βαρυτική έλξη: συνηθισμένη <u>και</u> σκοτεινή ύλη.



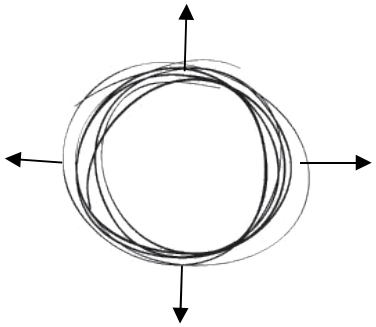
Ανταλλαγή ακτινοβολίας: μόνο συνηθισμένη ύλη!

→ Περιοχές στο μέγιστο της συστολής εκπέμπουν με μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με ό,τι στο μέγιστο της διαστολής!

Παράδειγμα: Μέτρηση του ποσοστού σκοτεινή ύλης



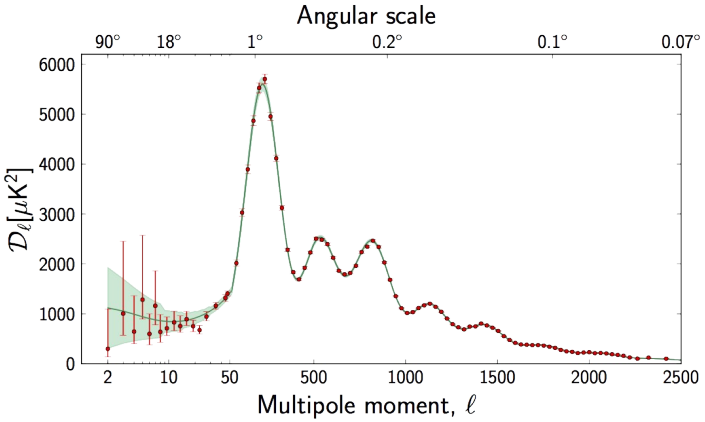
Βαρυτική έλξη: συνηθισμένη <u>και</u> σκοτεινή ύλη.



Ανταλλαγή ακτινοβολίας: μόνο συνηθισμένη ύλη!

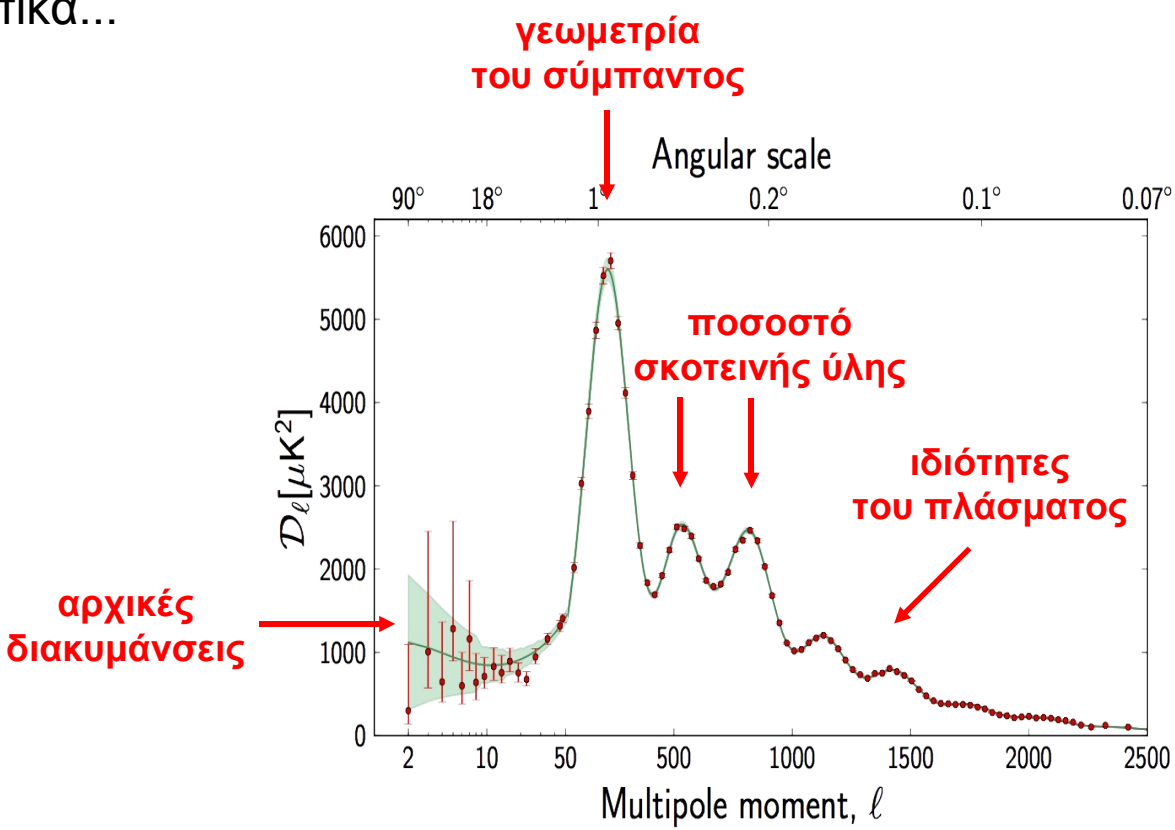
→ Περιοχές στο μέγιστο της συστολής εκπέμπουν με μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με ό,τι στο μέγιστο της διαστολής!

Η διαφορά ύψους ανάμεσα στις δύο πρώτες κορυφές είναι μέτρο του ποσοστού σκοτεινής ύλης!



Πληροφορίες από το CMB

Ενδεικτικά...

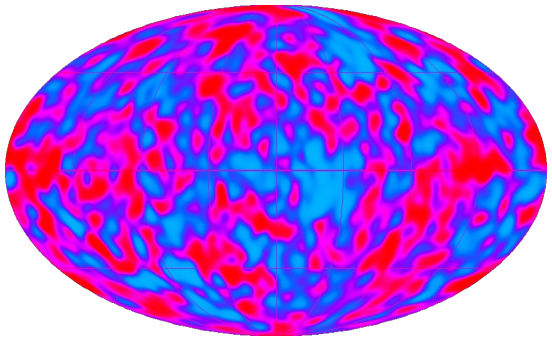


ύπαρξη κορυφών: ένδειξη πληθωρισμού

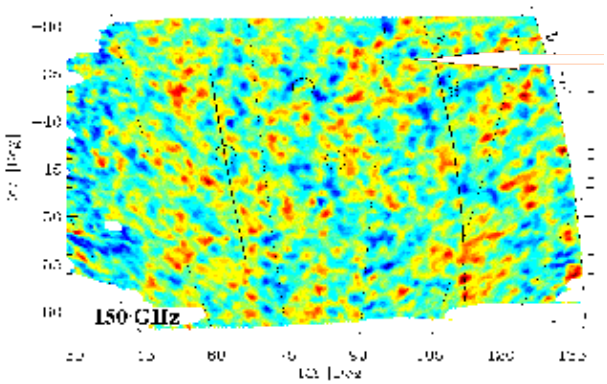
Φτιάξτε το δικό σας σύμπαν:
http://wmap.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/index.html

Κυριότερα πειράματα CMB

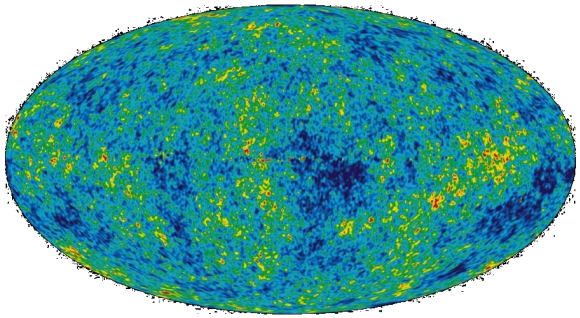
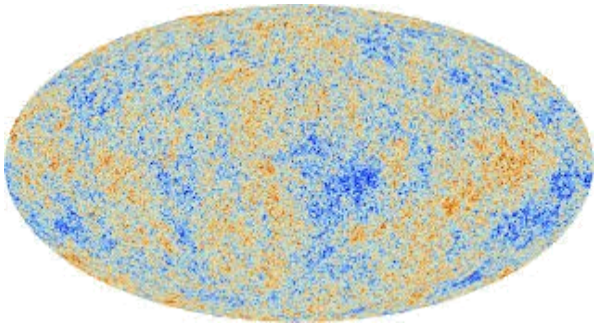
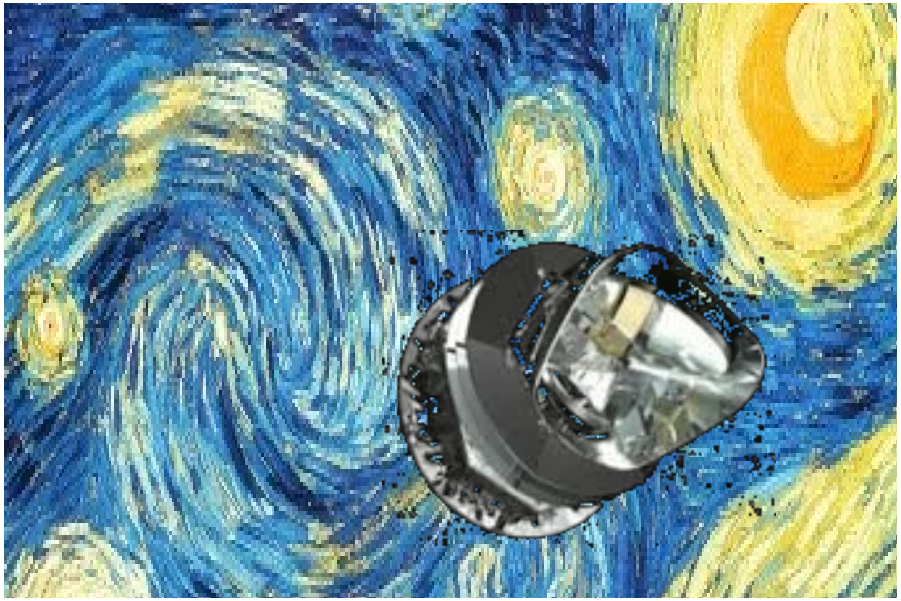
COBE (1990s)



BOOMERANG, MAXIMA (1998)



WMAP (2003)



PLANCK (2013)