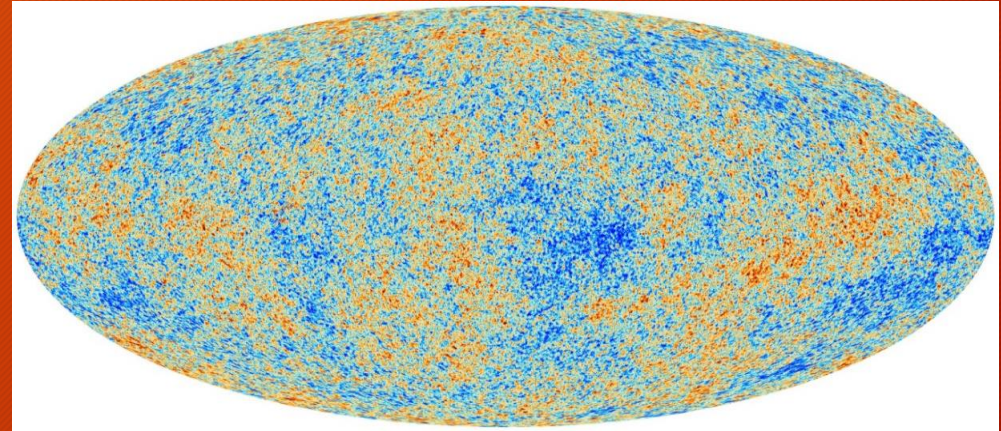


Εισαγωγή στην Κοσμολογία (μέρος 3)

Γιώργος Νικολιδάκης

Περιεχόμενα

- CMB Η πρόβλεψη
- Η ανακάλυψη
- Προέλευση: Εποχή της επανασύνδεσης
- Το παρελθόν της κατανομής CMB
- Ανισοτροπίες
- Διαταραχές θερμοκρασίας στην ακτινοβολία CMB
- Το φάσμα ισχύος
- Επιφάνεια τελευταίας σκέδασης
- Πρωτεύουσες διακυμάνσεις
- Δευτερεύουσες διακυμάνσεις
- Οι κορυφές του φάσματος ισχύος
- Η γεωμετρία του σύμπαντος
- Η σκοτεινή ύλη
- Μοντέλο Λ CDM
- Δορυφορικές αποστολές



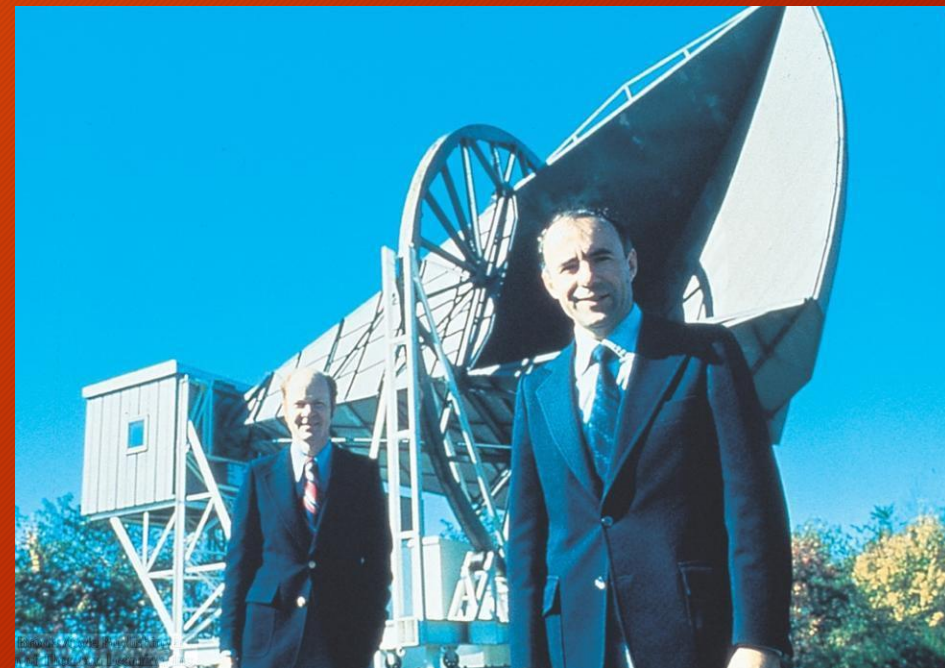
•

CMB Η πρόβλεψη

- Το 1948 ο G.Gamow κάνει την πρώτη πρόβλεψη για την Κοσμική Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου, συμπεραίνοντας ότι ο σχηματισμός των ελαφρών πυρήνων στο πρώιμο Σύμπαν αναγκαστικά συνεπαγόταν μεγάλη πυκνότητα ακτινοβολίας, που δεν θα μπορούσε να εξαφανιστεί χωρίς ίχνος και σε ένα έγγραφο που εμφανίζεται σε τεύχος του 1950 της «Φυσικής Σήμερα», αναφέρει μια προφητική τιμή 5K, χωρίς να δίνει πάρα πολλές εξηγήσεις γι' αυτό.
- Την άνοιξη του 1964, δύο σοβιετικοί φυσικοί, ο Αντρέι Doroshkevich και Igor Novikov, δημοσιεύουν ένα έγγραφο που διερευνά το δυνατότητα μέτρησης της ακτινοβολίας υποβάθρου που προβλέπεται από τον Gamow και παραπέμπουν για την μέτρησή του σε μια εσωτερική τεχνική έκθεση των εργαστηρίων Bell, σε μια χωανοειδή κεραία μήκους 6 μέτρων. Όμως το έγγραφο αυτό παραμένει άγνωστο από την επιστημονική κοινότητα.

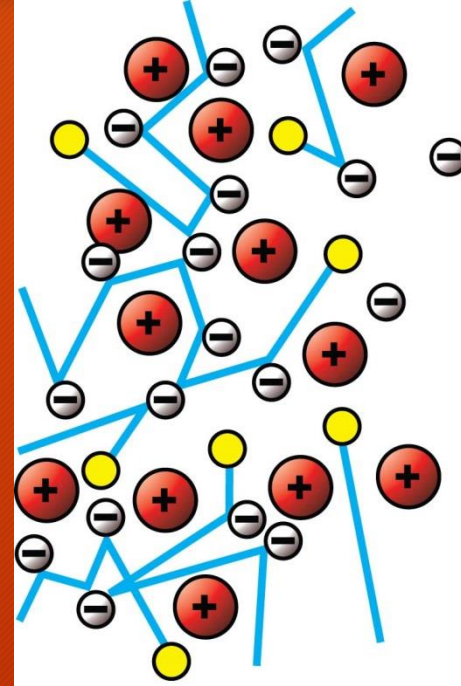
CMB Η ανακάλυψη

- Τον Μάιο του 1964 δύο νέοι ερευνητές φυσικοί από τα εργαστήρια της Bell, οι Arno Penzias και Robert Wilson άρχισαν να κάνουν αστρονομικές μετρήσεις από διάφορες πηγές ραδιακτινοβολίας στον ουρανό και κυρίως από γαλαξίες που εκπέμπουν στα ραδιοκύματα
- Χρησιμοποίησαν την ίδια χωνοειδή κεραία που είχαν προτείνει ο Αντρέι Doroshkevich και Igor Novikov αγνοώντας και οι ίδιοι την εργασία τους.
- Οι δυο φυσικοί στην προετοιμασία για τις μετρήσεις τους αντιμετώπισαν ένα τεχνικό, όπως νόμισαν, πρόβλημα. Όπου και να έστρεφαν την κεραία στον ουρανό εμφανιζόταν η ίδια ακτινοβολία η οποία έμοιαζε να προέρχεται από όλες τις κατευθύνσεις και είχε μια θερμοκρασία περίπου 3 βαθμούς Κέλβιν.
- Στην συνέχεια και αφού συζήτησαν το θέμα με μια ομάδα κοσμολόγων από το πανεπιστήμιο του Princeton συνειδητοποίησαν ότι είχαν ανακαλύψει την αρχέγονη Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου CMB (Cosmic Microwave Background) απομεινάρι από το πρώιμο σύμπαν.
- Για την ανακάλυψή τους αυτή μοιράστηκαν το βραβείο Nobel Φυσικής το 1978.



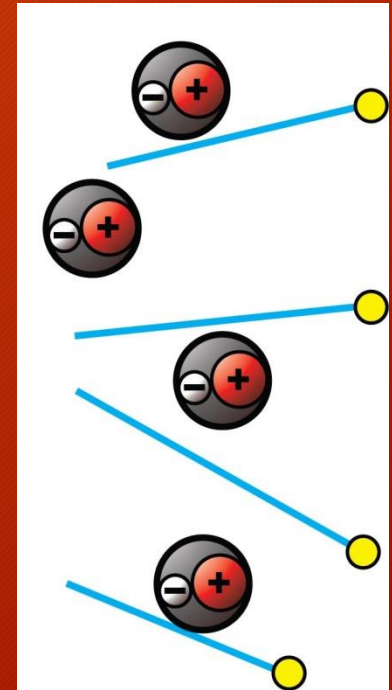
CMB προέλευση: Εποχή της επανασύνδεσης

- Το σύμπαν στα πρώτα του στάδια ήταν μια «θάλασσα» κυρίως από ελεύθερα πρωτόνια και ηλεκτρόνια και τα φωτόνια αλληλοεπιδρούσαν ισχυρά μέσω της σκέδασης Thomson και η μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων ήταν πολύ σύντομη.
- το αρχικό σύμπαν ήταν πολύ πυκνό και αδιαφανές στην ακτινοβολία αφού τα φωτόνια σκεδάζονταν διαδοχικά στο πυκνό αέριο των ηλεκτρονίων.
- Πως η βαρυονική ύλη μεταβαίνει από μια κατάσταση ιονισμένου πλάσματος, σε ένα αέριο ουδετέρων ατόμων και την συνεπακόλουθη διαδικασία κατά την οποία το σύμπαν μεταβαίνει από την κατάσταση να είναι αδιαφανές στην ακτινοβολία στην κατάσταση διαφάνειας.
- Η εποχή της επανασύνδεσης είναι η στιγμή κατά την οποία τα βαρυονικά συστατικά του σύμπαντος από ιονισμένα γίνονται ουδέτερα. Αριθμητικά είναι η στιγμή που η αριθμητική πυκνότητα των ιόντων είναι ίση με την αριθμητική πυκνότητα των ουδετέρων ατόμων.



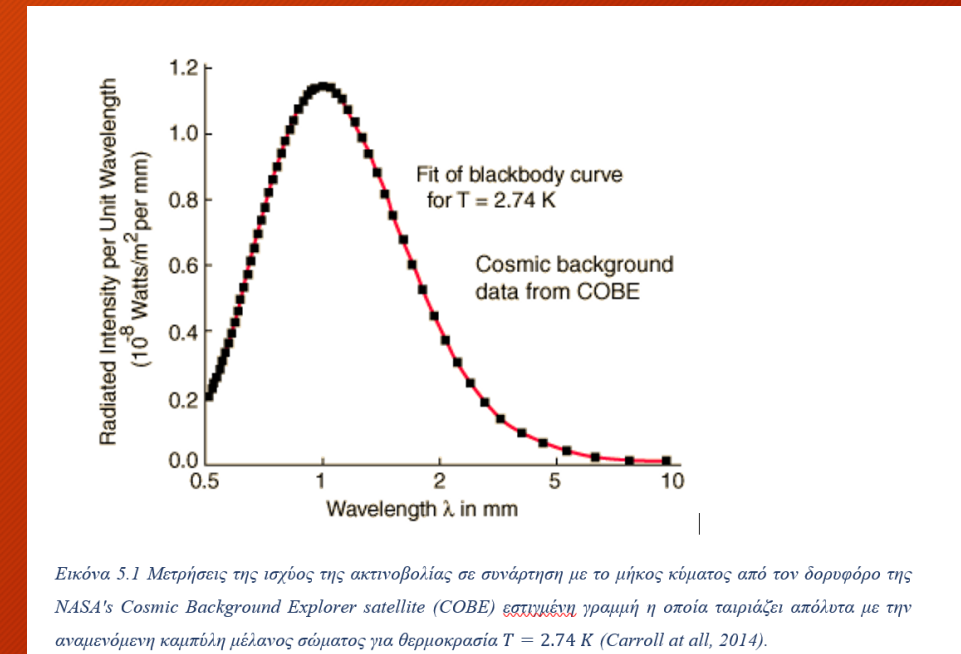
CMB προέλευση: Εποχή της επανασύνδεσης

- Καθώς το σύμπαν διαστελλόταν και ψύχονταν τα φωτόνια έχαναν ενέργεια και δεν ήταν ικανά πιά να ιονίσουν τα ουδέτερα άτομα που σχηματιζόταν. Δεδομένου ότι τότε δεν είχαν μείνει ελεύθερα ηλεκτρόνια τα φωτόνια του CMB σταμάτησαν να σκεδάζονται και μετά την τελευταία σκέδαση συνέχισαν να διαδίδονται ανενόχλητα
- Με τα ηλεκτρόνια να συλλαμβάνονται από τα άτομα, η πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων έγινε αρκετά χαμηλά ώστε η μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων έγινε πολύ μεγαλύτερη της τάξης μεγέθους του σύμπαντος και το φως ήταν ελεύθερο να διαδοθεί.
- Μια χονδρική προσέγγιση Για να εκτιμήσουμε τον χρόνο που συνέβηκε αυτή η μετάβαση, είναι να δούμε σε ποια θερμοκρασία ένα αέριο φωτονίων έχει μέση ενέργεια $Q = 13.6 \text{ eV}$ που είναι η ενέργεια ιονισμού του υδρογόνου (Ryden, B. S., 2017)
- $\langle E \rangle = 3kT \Rightarrow T \approx \frac{13.6 \text{ eV}}{3 \times 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}} \approx 50000 \text{ K}$
- Λεπτομερής υπολογισμός για την z_{dec} δίνει τελικά :
- $z_{dec} = 1100, T_{dec} = 3000 \text{ K}$
- Η χρονική στιγμή που συνέβηκε αυτό είναι $t = 380000$ έτη μετά το BB
- Μετά από αυτή τη χρονική στιγμή της επανασύνδεσης τα φωτόνια διαδίδονται ελεύθερα αφού το σύμπαν έγινε διάφανο στην ακτινοβολία.



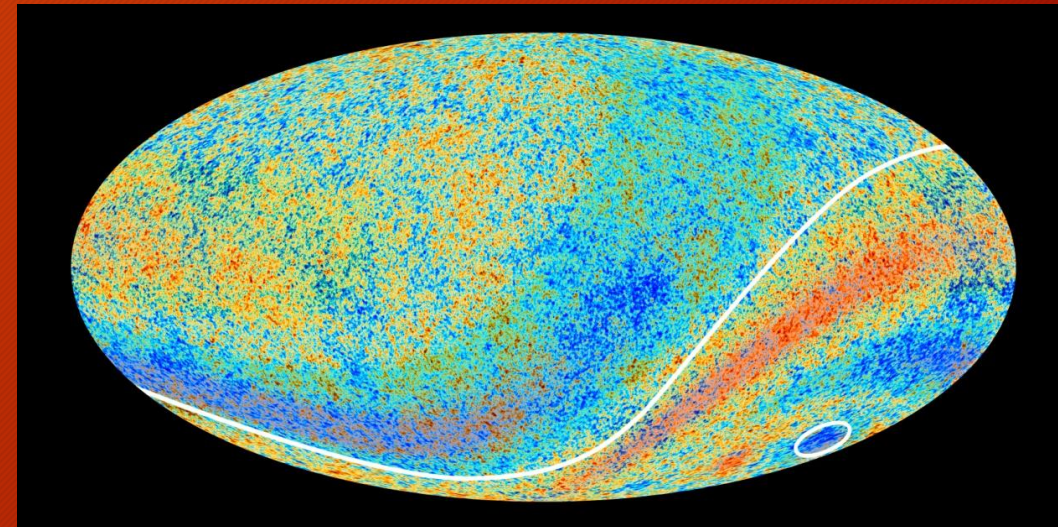
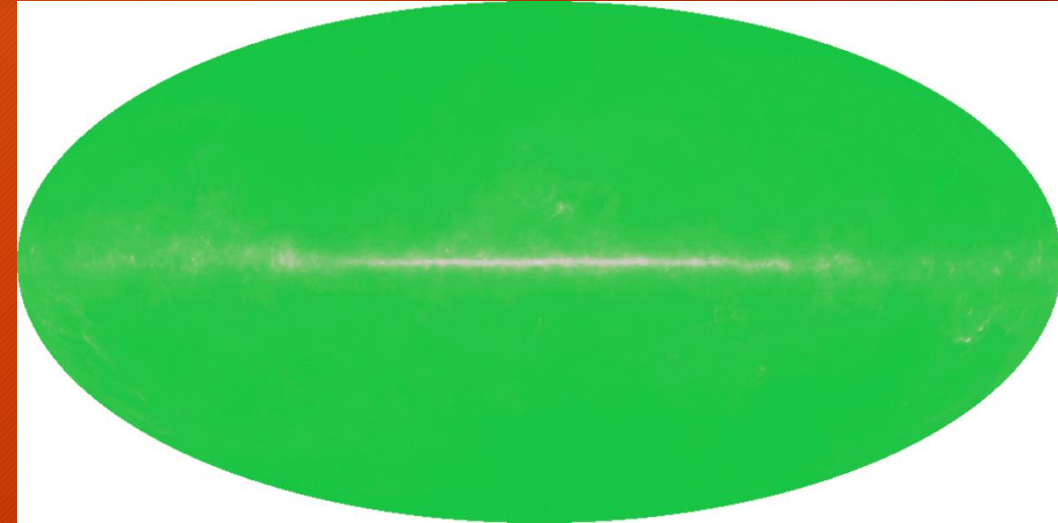
Το παρελθόν της κατανομής CMB

- Η κατανομή της ακτινοβολίας στο ζεστό πρώιμο σύμπαν αναμένεται να ήταν κατανομή μέλανος σώματος, αφού η ακτινοβολία είχε αλληλοεπιδράσει με την βαρυονική ύλη και είχε θερμοποιηθεί.
- Η ακτινοβολία του CMB σήμερα είναι ακτινοβολία μέλανος σώματος όπως καταγράφηκε από τις διαστημικές αποστολές και αρχικά από τον δορυφόρο COBE.
- Τα αποτελέσματα φαίνονται να αντιστοιχούν ακριβώς στην θεωρητική καμπύλη για την ακτινοβολία μέλανος σώματος με θερμοκρασία υποβάθρου $T_k = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$.
- Για να εξετάσουμε αν και στο παρελθόν αυτή η ακτινοβολία ήταν ακτινοβολία μέλανος σώματος εξετάζουμε την συνάρτηση της κατανομής της πυκνότητας ενέργειας του μέλανος σώματος.
- $$\varepsilon(f)df = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{f^3 df}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad 5.14$$
- Καθώς αντιστρέφουμε την ροή του χρόνου ο παράγοντας κλίμακας $a(t)$ μειώνεται ενώ η θερμοκρασία T αυξάνεται. Η πυκνότητα της ακτινοβολίας σχετίζεται με το παράγοντα διαστολής και την θερμοκρασία ως εξής $\rho_r \sim a^{-4}$, $\rho_r \sim T^4$ επομένως $T \propto a^{-1}$. Επίσης η συχνότητα μειώνεται με ρυθμό $f \propto a^{-1}$.
- Συμπέρασμα η κατανομή του μέλανος σώματος διατηρείται αφού ο λόγος f/T διατηρείται σταθερός στον παρονομαστή ενώ στον αριθμητή η συχνότητα f^3 μας δίνει κάθε φορά μια διαφορετική κλίμακα καθώς η συχνότητα των φωτονίων μειώνεται και το σύμπαν επεκτείνεται.
- Έτσι καθώς το σύμπαν ψύχεται λόγω κοσμικής διαστολής η κατανομή των φωτονίων στις διάφορες συχνότητες εξακολουθεί να διατηρεί την κατανομή μέλανος σώματος αλλά το μέγιστο της καμπύλης μετακινείται προς τα κάτω σε μεγαλύτερα μήκη κύματος κατά ένα παράγοντα $1/a$ και σε πυκνότητα ενέργειας $1/a^4$.

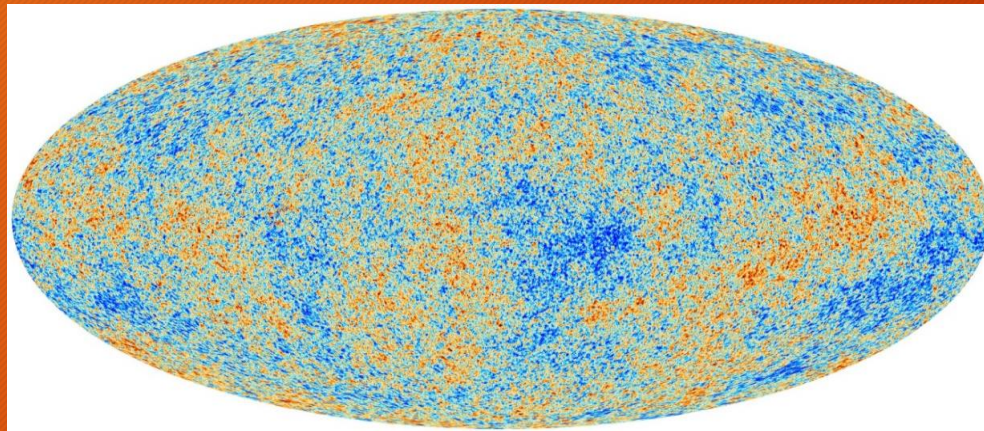


CMB Ανισοτροπίες

- Η CMB που ανιχνεύουμε σήμερα δεν είναι ακριβώς ίδια προς όλες τις διευθύνσεις όπως αρχικά μετρήθηκε από επίγεια πειράματα, αλλά εμφανίζει πολύ μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις η όπως αλλιώς αποκαλούνται ανισοτροπίες της τάξης 10^{-5} K (μ K).
- Αυτές οι πολύ μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι τα αποτυπώματα των πολύ μικρών ανισοτροπιών των «σπόρων», που με τις μετέπειτα συμπυκνώσεις της ύλης με την δράση και της βαρύτητας δημιουργήθηκαν οι γαλαξίες.
- Επομένως βλέπουμε πολύ πιο νωρίς στο σχηματισμό του σύμπαντος από ότι με οποιοδήποτε άλλο τηλεσκόπιο ή άλλο σύγχρονο μέσο δεδομένου ότι αυτή η ακτινοβολία δημιουργήθηκε μόλις 380 χιλιάδες χρόνια μετά το Big Bang, και πολύ πριν τον σχηματισμό των γαλαξιών.



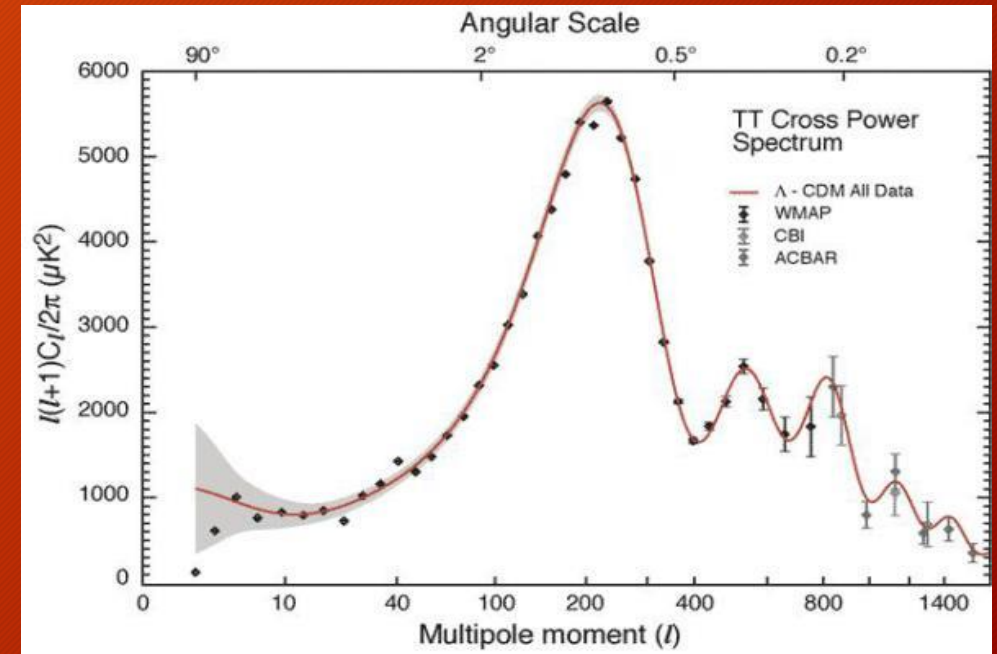
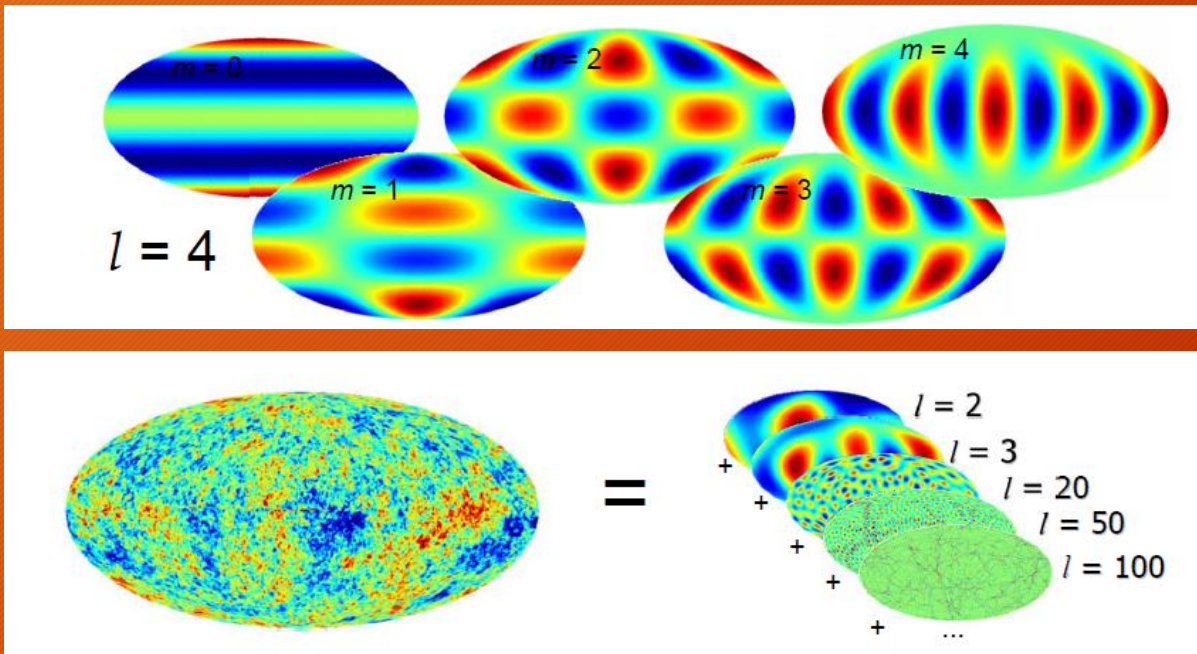
Διαταραχές θερμοκρασίας στην ακτινοβολία CMB



- Σήμερα, σε πολύ μεγάλες κλίμακες, το σύμπαν είναι ομοιογενές. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται από την ύπαρξη των άστρων των γαλαξιών και των γαλαξιακών σμηνών οι ανομοιογένειες αρχίζουν να γίνονται ορατές σε κλίμακες της τάξεως των 100 Mpc.
- Οι θεωρίες του σχηματισμού δομών απαιτούν ότι οι σπόροι της δομής που παρατηρούμε σήμερα πρέπει να ήταν ανομοιογένειες στην πυκνότητα της ύλης του πρώιμου σύμπαντος που λόγω των αμοιβαίων δυνάμεων βαρύτητας που αναπτύσσονταν τείνουν να μεγαλώσουν και να συμπυκνωθούν ακόμη περισσότερο.
- Αυτές οι ανομοιογένειες θα είχαν αφήσει το αποτύπωμα τους στο φάσμα της ακτινοβολίας της CMB που θα παρατηρούσαμε σήμερα ως ανισοτροπίες θερμοκρασίας. Έτσι, για να εξηγήσουμε το σύμπαν στο οποίο ζούμε, θα πρέπει να υπάρχουν ανισοτροπίες στην ακτινοβολία της CMB και αυτές οι ανισοτροπίες θα πρέπει να εμφανίζονται σε γωνιακές κλίμακες που αντιστοιχούν στην κλίμακα της παρατηρούμενης δομής.
- Πράγματι η ακτινοβολία CMB δεν είναι ακριβώς ίδια προς όλες τις διευθύνσεις και εμφανίζει πολύ μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Οι δορυφορικές παρατηρήσεις που ανακοινώθηκαν το 1992 επιβεβαίωσαν για πρώτη φορά την ύπαρξη αυτών των μικροδιαφορών στην Κοσμική Ακτινοβολία Μικροκυμάτων.

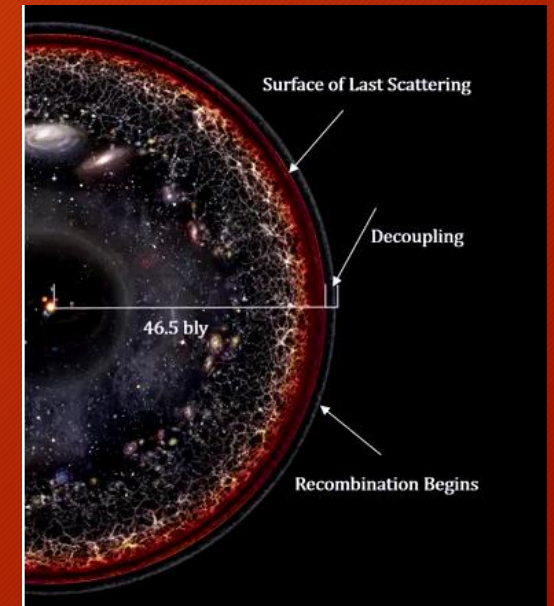
Το φάσμα ισχύος

- Αναπαράσταση σε σφαιρικές συντεταγμένες των τρόπων ταλάντωσης $\gamma_m^l(\theta, \varphi)$
 - σύμφωνα με τον l που παραστάει τον αριθμό των κυμάτων κατά μήκος του μεσημβρινού και του m που παραστάει τον αριθμό των τρόπων ταλάντωσης κατά μήκος του ισημερινού.
- Αναπαράσταση του φάσματος ισχύος των διαταραχών με την μορφή χάρτη όπου οι ανισοτροπίες σημειώνονται με χρώμα .
 - Το φάσμα ισχύος των διαταραχών είναι αποτέλεσμα του αθροίσματος πάνω σε όλα τα m για κάθε l .
- Αναπαράσταση του φάσματος ισχύος των διαταραχών με την μορφή συνάρτησης όπου οι κορυφές παριστάνουν συντονισμούς.



Επιφάνεια τελευταίας σκέδασης

- Η CMB που ανιχνεύουμε προέρχεται από ένα σφαιρικό κέλυφος που καλείται **επιφάνεια τελευταίας σκέδασης**, το οποίο έχει ένα πεπερασμένο πάχος διότι η επανασύνδεση ολοκληρώθηκε σε μια πεπερασμένη χρονική περίοδο.
- Οι πρωτεύουσες διακυμάνσεις είναι οι διακυμάνσεις που οφείλονται ακριβώς σε αυτή την πεπερασμένη περίοδο της επανασύνδεσης που έχουν αποτυπωθεί στα φωτόνια της ακτινοβολίας CMB καθώς αυτά άφησαν την επιφάνεια της τελευταίας σκέδασης.
- Οι διακυμάνσεις φωτεινότητας (η θερμοκρασίας) συνδέονται με τις διακυμάνσεις της μάζας διότι η μάζα και η ακτινοβολία ήταν στενά συνδεδεμένα και οι ενδογενείς διακυμάνσεις προκύπτουν διότι το πρώιμο σύμπαν πριν από την επανασύνδεση συμπεριφερόταν σαν ένα ρευστό φωτονίων-βαρυονίων.

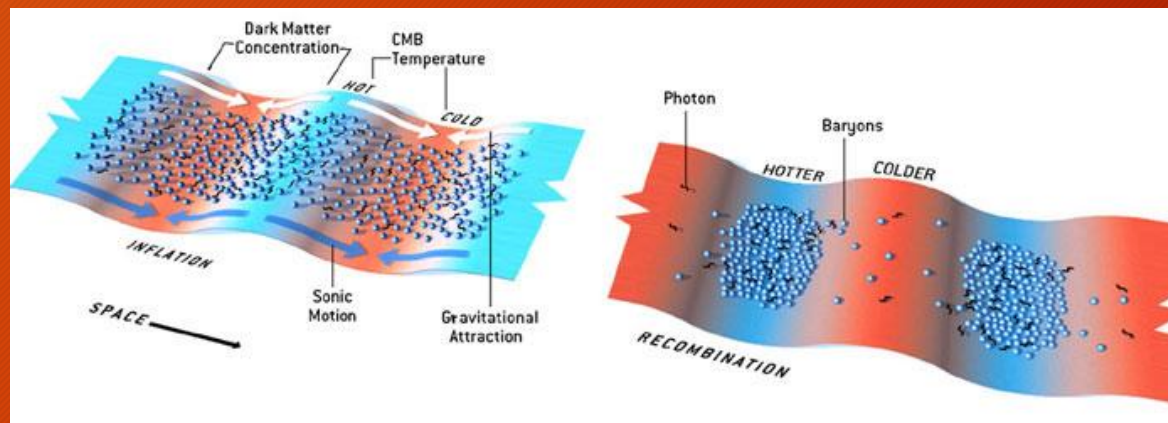


Πρωτεύουσες διακυμάνσεις

- Οι διακυμάνσεις στο φάσμα της CMB μπορούν να κατηγοριοποιηθούν χρονολογικά σύμφωνα με τον χρόνο που συνέβησαν σε δύο κατηγορίες
 - Πρωτεύουσες Διακυμάνσεις
 - Δευτερεύουσες διακυμάνσεις.
- Τρείς είναι οι πηγές για τις πρωτεύουσες Διακυμάνσεις-ανισοτροπίες
 - Το φαινόμενο Sachs-Woolf
 - Οι ενδογενείς αδιαβατικές διακυμάνσεις
 - Το φαινόμενο Doppler.

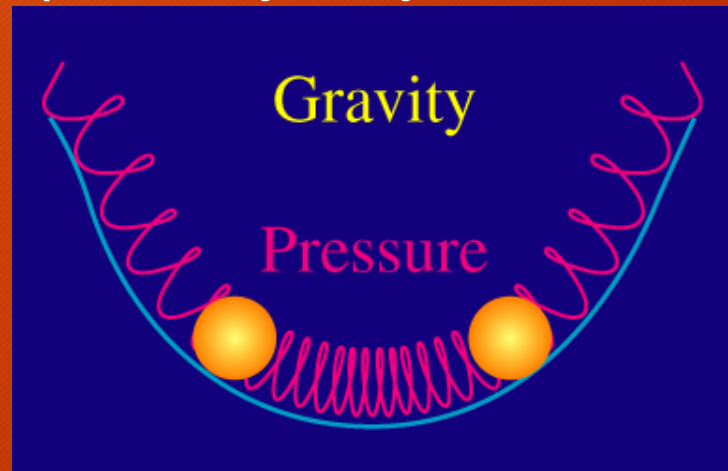
Πρωτεύουσες διακυμάνσεις

- Το φαινόμενο Sachs-WoOLF : Είναι ο μηχανισμός σε μεγάλες γωνιακές κλίμακες . Στην επιφάνεια της τελευταίας σκέδασης το φωτοβαρυονικό ρευστό κινείται κυρίως υπό την επίδραση της σκοτεινής ύλης που κυριαρχούσε και οι διαταραχές πυκνότητας θα προκαλούσαν διαταραχές στο βαρυτικό δυναμικό $\delta\Phi$. Τα φωτόνια που αναδύονται από μια υπέρπυκνη περιοχή θα έχουν μια μεγαλύτερη θερμοκρασία διότι οι πυκνές περιοχές είναι θερμότερες και καθώς το φως έβγαινε από περιοχές με μεγαλύτερη συμπίκνωση δηλαδή τοπικό ελάχιστο του βαρυτικού δυναμικού τότε θα δαπανήσει ενέργεια να βγει έξω από το πηγάδι δυναμικού και θα υποστεί βαρυτική ερυθρομετατόπιση. Όταν τα φωτόνια βρίσκονται σε τοπικό μέγιστο θα κερδίσουν ενέργεια και θα υποστούν κυανή μετατόπιση.
- Οι ενδογενείς αδιαβατικές διακυμάνσεις είναι ο μηχανισμός για τις ενδιάμεσες γωνιακές κλίμακες ο επικρατών μηχανισμός για τις ανισοτροπίες είναι οι ενδογενείς αδιαβατικές διακυμάνσεις που προκύπτουν από το γεγονός ότι η επανασύνδεση δεν συνέβηκε ακριβώς την ίδια στιγμή σε όλες τις περιοχές. Στις περιοχές με υψηλότερη πυκνότητα συνέβηκε λίγο αργότερα διότι εκεί υπήρχε πολύς μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων που σκέδαζαν τα φωτόνια. Έτσι τα φωτόνια από αυτές τις περιοχές έχουν υποστεί μικρότερη ερυθρομετατόπιση από την διαστολή του σύμπαντος αφού αναδύθηκαν τελευταία με αποτέλεσμα να εμφανίζονται θερμότερα



Πρωτεύουσες διακυμάνσεις

- Τέλος στις μικρές γωνιακές κλίμακες επικρατεί το φαινόμενο Doppler. Το βαρυονικό ρευστό το οποίο όταν βρεθεί σε βαρυτικό ελάχιστο συσσωρεύεται αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την πίεση του από την πίεση της ακτινοβολίας έτσι ώστε η συσσώρευση επιβραδύνεται και σταδιακά αντιστρέφεται. (Εικόνα 6.2) Το ρευστό διαστέλλεται και καθώς διαστέλεται κρυώνει και παράγει λιγότερη πίεση ακτινοβολίας. Με λιγότερη πίεση το βαρυτικό δυναμικό επικρατεί ξανά και αρχίζει άλλη μια φάση συμπίεσης. Με αυτό τον τρόπο το βαρυονικό ρευστό υπόκειται σε γραμμικές ταλαντώσεις όμοιες με τις ακουστικές και όλο το σύμπαν υποβλήθηκε σε ακουστικές ταλαντώσεις που θυμίζουν αστρική παλμική κίνηση.
- Τα ηχητικά κύματα διέσχισαν τον όγκο του σύμπαντος σε ένα σημαντικό κλάσμα της ταχύτητας του φωτός ($c/\sqrt{3}$). Η απόσταση που διέσχισαν τα ηχητικά κύματα ονομάζεται ηχητικός ορίζοντας r_s . Αυτά τα ηχητικά κύματα παρήγαγαν στάσιμα κύματα με περιοχές συμπίεσης και αραιώσης της βαρυονικής ύλης.

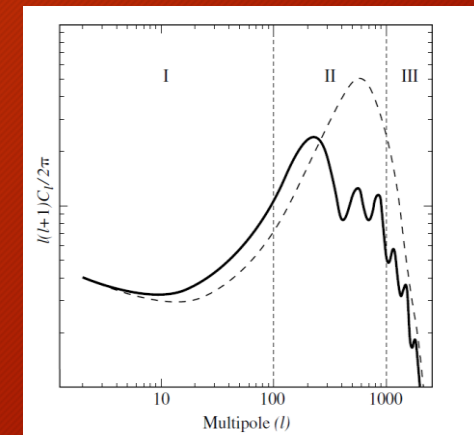
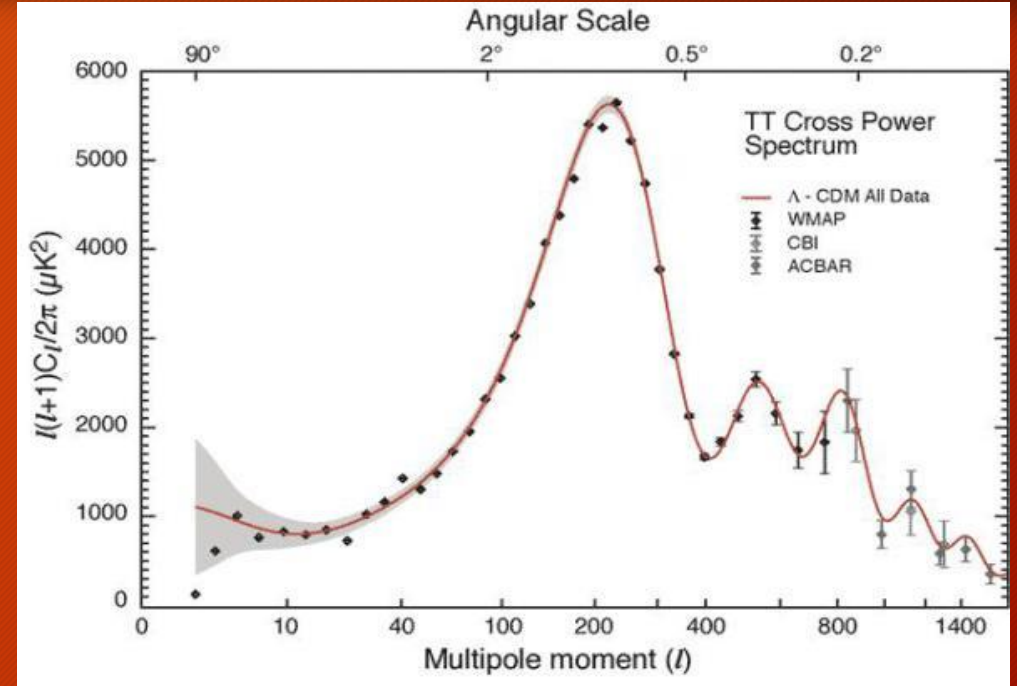


Δευτερεύουσες διακυμάνσεις

- Είναι το σύνολο των διακυμάνσεων στο φάσμα της CMB που οφείλονται στην εποχή μετά την τελευταία σκέδαση και αναφέρονται στις διαδικασίες που επηρεάζουν τα φωτόνια από την στιγμή της τελευταίας σκέδασης μέχρι να φτάσουν στην Γή
- Οι δευτερεύουσες διακυμάνσεις υπερτίθενται και προστίθενται στις πρωτεύουσες διακυμάνσεις.
- Τα φωτόνια αλληλοεπιδρούν με την ύλη μέσω σκέδασης Compton παράγοντας δευτερεύουσες ανισοτροπίες όπως :
 - Βαρυτικά φαινόμενα που δημιουργούνται όταν φωτόνια διασταυρώνονται με βαρυτικά δυναμικά όπου τα φωτόνια υφίστανται ερυθρομετατόπιση
 - Φαινόμενα βαρυτικών φακών κατά το οποίο η τροχιά των φωτονίων αλλάζει και παραμορφώνει τον επιφάνεια τελευταίας σκέδασης ενώ αναδιανέμει την ισχύ σε διαφορετικές γωνιακές κλίμακες.
 - Φαινόμενα επαναϊονισμού. Η επανασύνδεση σε $Z=1100$ είναι μια μετάβαση από ιονισμένη σε ουδέτερη κατάσταση του σύμπαντος. Παρόλα αυτά το σύμπαν έχει υποστεί μια φάση επαναϊονισμού μετά την επανασύνδεση και αυτός ο επαναϊονισμός παρήγαγε δευτερεύοντες ανισοτροπίες μέσω των διαδικασιών *Syriaev-Zeldovich* κατά την οποία η αντίστροφη σκέδαση Compton από τα φωτόνια του CMB στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ζεστού ενδογαλαξιακού αερίου παράγει δευτερεύουσες διακυμάνσεις.

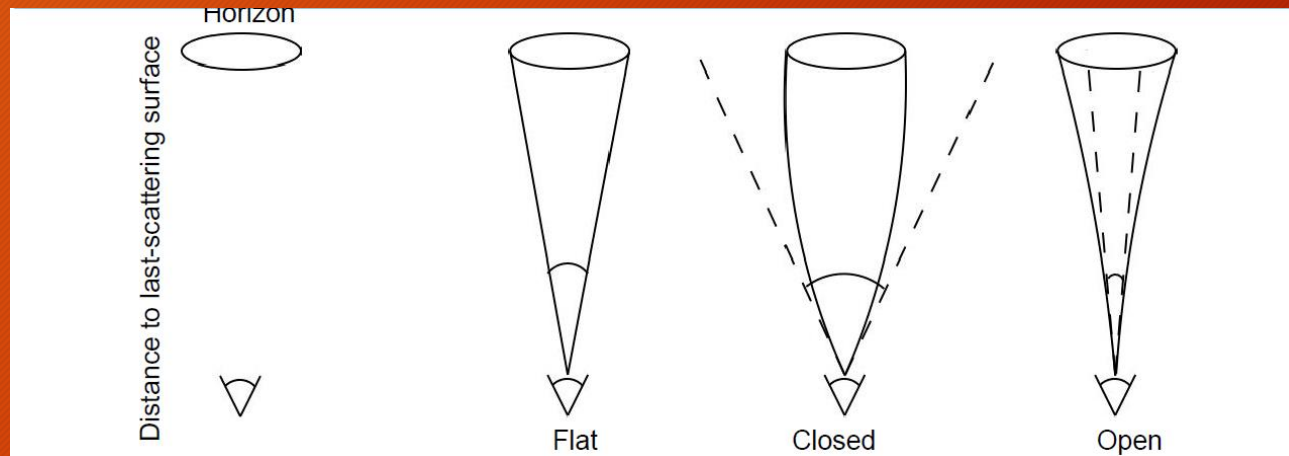
Οι κορυφές του φάσματος ισχύος

- Στο φάσμα ισχύος των διαταραχών θερμοκρασίας, οι θέσεις των μεγίστων αντιπροσωπεύουν συντονισμούς και όπως παρατηρούμε από τα δεδομένα, υπάρχει ένα μέγιστο κοντά στο $l = 220$ που αντιστοιχεί σε γωνιακό εύρος $\theta \cong \frac{180^\circ}{220} = 0.81^\circ$
- Η παραπάνω είναι η πειραματικά μετρούμενη τιμή του πρώτου μεγίστου. Με ένα θεωρητικό υπολογισμό της θέσης του πρώτου μεγίστου παίρνουμε μια τιμή 0.86°
- Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι η γεωμετρία του σύμπαντος είναι τελικά επίπεδη.



Η γεωμετρία του σύμπαντος

- Η κύρια πληροφορία που προέρχεται από τη γωνιακή θέση του πρώτου μεγίστου μας δίνει και μια εκτίμηση της γεωμετρίας του σύμπαντος. Η πρώτη κορυφή αντιστοιχεί σε μια πολύ ειδική κλίμακα μήκους, στο πρώιμο σύμπαν και όπως έχουμε πει αντιστοιχεί στο γωνιακό εύρος του ορίζοντα της στιγμή της αποσύνδεσης που όπως την υπολογίσαμε θεωρητικά στην σχέση ήταν 0.86° .
- Εάν η γεωμετρία του σύμπαντος ήταν κλειστή με θετική καμπυλότητα $k > 0$ τότε κάθε γωνιακό εύρος θα μεγεθυνόταν εξ αιτίας της γεωμετρίας της θετικής καμπυλότητας και έτσι θα μεταφερόταν στο φάσμα σε μεγαλύτερο γωνιακό εύρος $l < 220$. Εάν η γεωμετρία του σύμπαντος ήταν ανοιχτή με αρνητική καμπυλότητα $k < 0$ τότε κάθε γωνιακό εύρος θα γινόταν μικρότερο εξ αιτίας της αρνητικής καμπυλότητας και θα μεταφερόταν στο φάσμα σε μικρότερο γωνιακό εύρος $l > 220$.
- Σε ένα σύμπαν με επίπεδη γεωμετρία το γωνιακό εύρος δεν θα άλλαζε και το αποτέλεσμα που θα αποτυπωθεί στο φάσμα ισχύος των διαταραχών στο CMB θα είναι κοντά σε αυτή την τιμή $l = 220$ και γωνιακό εύρος $180/220 = 0.81^\circ$ που είναι πολύ κοντά στην θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή 0.86° .
- Η θέση της πρώτης κορυφής υποδεικνύει λοιπόν ότι το σύμπαν μας είναι πολύ κοντά σε ένα επίπεδο σύμπαν με $k = 0$, $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ειδικότερα τα αποτελέσματα του 2013 από τον δορυφόρο Planck δείχνουν ένα σύμπαν με $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.0005 \pm 0.0033$

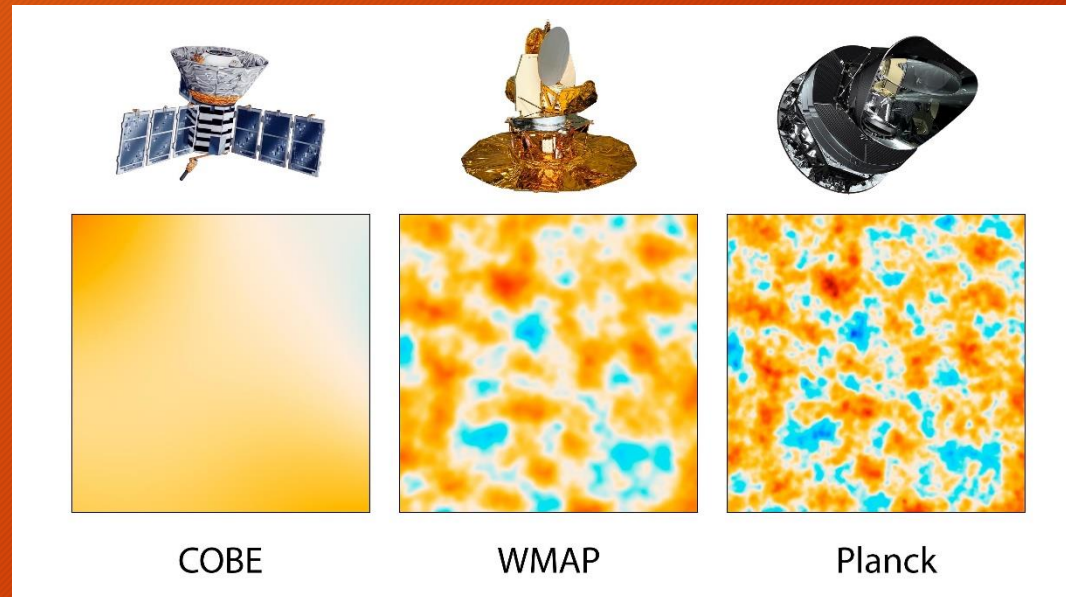


Η σκοτεινή ύλη

- Παρατηρούμε επίσης ότι το δεύτερο μέγιστο στο φάσμα έχει πολύ μικρότερο ύψος από το πρώτο. Έχουμε πει ότι το πρώτο μέγιστο οφείλεται σε μέγιστη συμπύκνωση της μάζας, ενώ το δεύτερο μέγιστο σε μέγιστη αποσυμπίεση. Η μέγιστη συμπίεση που επιτυγχάνεται από τις μάζες εξαρτάται από την ποσότητα της μάζας που βρίσκεται στο βαρυωνικό πηγάδι δυναμικού ενώ η μέγιστη αποσυμπίεση δεν εξαρτάται από την ποσότητα της μάζας αλλά από την ποσότητα της ακτινοβολίας αφού οι αποσυμπιέσεις οφείλονται στην πίεση της ακτινοβολίας. Ως αποτέλεσμα ο λόγος του πλάτους της δεύτερης προς την πρώτη κορυφή μας δίνει το Ω_b , που είναι ο λόγος της πυκνότητας των βαρυονίων προς την κρίσιμη πυκνότητα το αποτέλεσμα από τα δεδομένα του WMAP είναι $\Omega_b = 0.044$
- Οι κορυφές στο φάσμα ισχύος είναι ευαίσθητες στη πυκνότητα της σκοτεινής ύλης στο σύμπαν. Σε μοντέλα όπου προσπαθούν να αναπαραγάγουν το φάσμα παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η πυκνότητα της σκοτεινής ύλης αλλάζουν τα ύψη κυρίως των τριών πρώτων κορυφών και η ύπαρξη της τρίτης κορυφής που ενισχύεται σε ένα ύψος συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο από τη δεύτερη κορυφή αποτελεί ένδειξη ότι η σκοτεινή ύλη κυριαρχούσε στην πυκνότητα της ύλης στο πλάσμα πριν από την επανασύνδεση.
- Τα δεδομένα του WMAP δεν χαρακτηρίζουν πλήρως την τρίτη κορυφή, αλλά παίρνουν αρκετά από αυτήν για να εκτιμήσουν ότι η ολική πυκνότητα ύλης σε σχέση με την κρίσιμη είναι $\Omega_m = 0.27$, πράγμα που σημαίνει ότι το κλάσμα της σκοτεινής ύλης πρέπει να είναι περίπου $\Omega_{DM} = 0.23$.

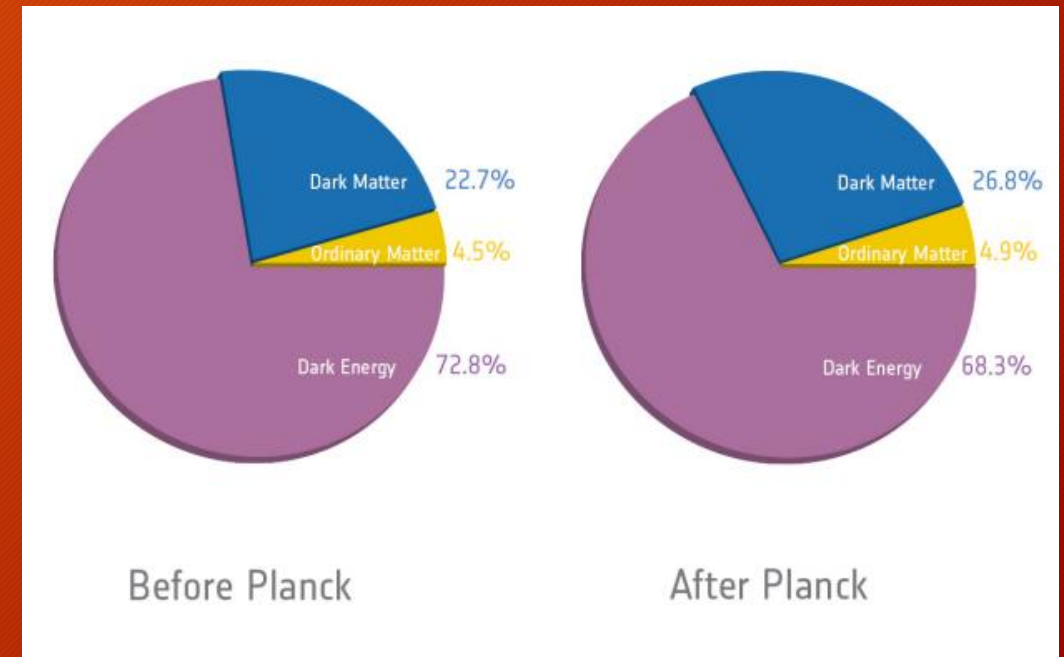
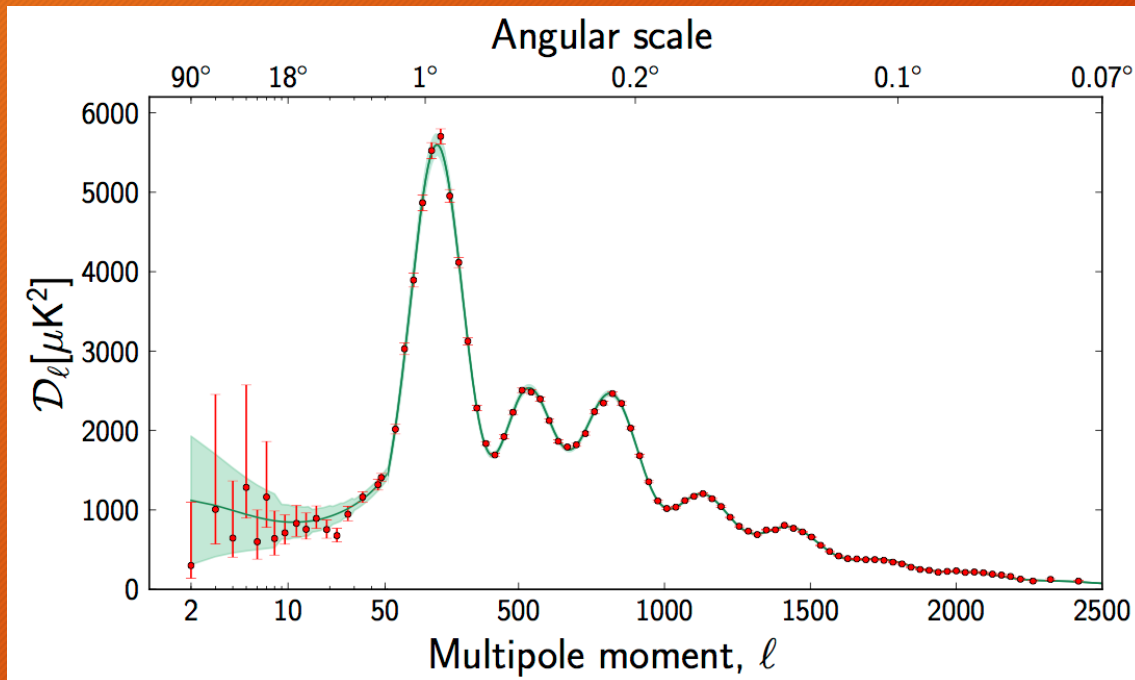
Δορυφορικές αποστολές

- Η βελτίωση στην γωνιακή ανάλυση είχε ως αποτέλεσμα τον Μάρτιο του 2013 να παραχθεί με την μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια από ποτέ ο χάρτης μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου από τον δορυφόρο Planck και τα δεδομένα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθούν με λεπτομέρεια όλα τα πιθανά μοντέλα που περιγράφουν την εξέλιξη του σύμπαντος.



Μοντέλο Λ CDM

- ΜΕ βάση τα δεδομένα από τον δορυφόρο Planck και την πρόβλεψη του μοντέλου Λ CDM με μέγιστη πιθανότητα για το CMB φάσμα.
- Η κόκκινη γραμμή είναι οι πρόβλεψη του μοντέλου, ενώ η εστιγμένη γραμμή είναι δεδομένα από τον δορυφόρο Planck



Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Αναφορές

1. Balbi, A. (2010). The music of the big bang: the cosmic microwave background and the new cosmology. Berlin: Springer.
2. Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2014). An introduction to modern astrophysics. Harlow: Pearson.
3. C. L. Bennett, et al, 1996, 4-Year COBE1 DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results : arXiv:astro-ph/9601067
4. Evans, R. (2015). The cosmic microwave background: how it changed our understanding of the Universe. Cham: Springer.
5. Liddle, A. (2015). An Introduction to Modern Cosmology, 3rd Edition. John Wiley & Sons.
6. Ludwig-Maximilians 2002, Data Analysis of the Cosmic Microwave Background -Universit Munchen 2002
7. Ryden, B. S. (2017). Introduction to cosmology. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
8. Wayne Hu, Princeton 1996 <http://background.uchicago.edu/~whu/index.html>