

Κοσμολογικά μοντέλα

Προϋποθέσεις και παραδοχές συμμετρίας.

Τα κοσμολογικά μοντέλα προκύπτουν ως λύσεις των εξισώσεων πεδίου του Αϊνστάιν.

Σε αυτές χρησιμοποιούμε δυο παραδοχές συμμετρίας.

1) Το σύμπαν γύρω μας είναι ισότροπο, υπάρχει ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, από το οποίο το σύμπαν εμφανίζεται ισότροπο.

2) Η θέση μας στο σύμπαν δεν είναι σημαντικότερη από τις θέσεις άλλων παρατηρητών (κοσμολογική ή Κοπερνίκια αρχή).

Ετσι, έχουμε ένα σύμπαν που είναι ισότροπο και ομογενές για κάθε παρατηρητή.

Τα κοσμολογικά μοντέλα δημιουργούνται ως ομογενείς και ισότροπες λύσεις των εξισώσεων πεδίου του Αϊνστάιν. Παρατηρήσεις, ιδίως της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, στηρίζουν ιδιαίτερα την πρώτη παραδοχή συμμετρίας, λόγω των σχετικών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας αυτής στην κλίμακα των μόλις 10στη-5 του βαθμού Κελβιν. Και δεν υπάρχει κανένας λόγος για αμφισβήτηση της δεύτερης παραδοχής.

Η παρατηρήσιμη κίνηση απομάκρυνσης των γαλαξιών δεν είναι αντίθετη με αυτές τις παραδοχές.

Κοσμολογική ερυθρολίσηση.

Τα μήκη κύματος μεγαλώνουν με το ίδιο μέτρο όπως διαστέλλεται το σύμπαν ανάμεσα στην πηγή εκπομπής τους και τον παρατηρητή. Η σχετική μεταβολή του μήκος κύματος είναι η ερυθρολίσηση. (z είναι ο βαθμός διπλασιασμού του μήκος κύματος μιας συγκεκριμένης φασματικής γραμμής, π.χ. μια γραμμή στα 500 nm σε $z=1$ θα εμφανίζεται στα 1000 nm.) Η τιμή $z=1$ αντιστοιχεί σε εκπομπή φωτός πριν περίπου 9 δις έτη.

Κοσμολογικοί παράμετροι.

Ο συνδυασμός των δεδομένων του δορυφόρου Πλανκ, της κατανομής των γαλαξιών και των σ. Νοβα Ια μας δίνει τις ακόλουθες τιμές.

Μέση θερμοκρασία του σύμπαντος	2,728 K
Συνολική πυκνότητα ενέργειας	1,0052 (επιπεδότητα)
Πυκνότητα ύλης (ορατή και σκοτεινή)	26,8%
Βαρυονική πυκνότητα (ορατή ύλη)	4,9%
Κοσμολογική σταθερά (σκοτεινής ενέργειας)	68,3%
Σταθερά του Hubble	67,3 χιλ./ δευτ/ Mpc
Ηλικία του σύμπαντος	13,81 δις. έτη

Η σταθερά του Hubble ήταν παλιότερα πολύ μεγαλύτερη. Η κρίσιμη πυκνότητα με την οποία ο χώρος γίνεται επίπεδος, είναι 5 πρωτόνια ανα τετρ. μέτρο ή ένας γαλαξίας ανά τετραγωνικό Mpc. Η συνολική πυκνότητα ύλης και ενέργειας είναι πολύ κοντά σε αυτή την τιμή.

Εποχές της κοσμικής διαστολής.

Στην αρχική φάση του σύμπαντος κυριάρχησε η ακτινοβολία, μετά η μάζα και τώρα η σκοτεινή ενέργεια.

Οι αποστάσεις στο σύμπαν.

Τα μέτρα μέτρησης αποστάσεων δεν είναι προφανή στην γενική σχετικότητα.

Έχουμε την συν-κινούμενη απόσταση (co-moving distance). Είναι η απόσταση που μετράμε σε συν-κινούμενες συντεταγμένες έχοντας αφαιρέσει την κοσμική διαστολή. Ο χρόνος μετάβασης του φωτός καθορίζει την ίδια απόσταση (Proper distance). Υπάρχει και η γωνιακή απόσταση (angular diameter distance), που είναι σχετική με τον ευκλείδειο χώρο, και

η απόσταση λαμπρότητας (luminosity distance) που έχει να κάνει με την λαμπρότητα και την ροή ακτινοβολίας ενός αντικειμένου. Σε μικρές αποστάσεις όλες οι παραπάνω μετρήσεις συμφωνούν.

Η εξέλιξη της θερμοκρασίας.

Η αδιαβατική διαστολή έχει ως συνέπεια η θερμοκρασία των φωτονίων να μειώνεται με την κλίμακα. Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου ψύχεται με τον ίδιο ρυθμό που διαστέλλεται το σύμπαν.

Η συνιστώσα της μάζας.

Η δημιουργία βαρυτικά δεσμευμένων συστημάτων από την σκοτεινή ύλη, οι σκοτεινές άλω, περιγράφονται πολύ καλά από μοντέλα σφαιρικής κατάρρευσης. Δηλαδή οι διακυμάνσεις πυκνότητας καταρρέουν, όταν η γραμμική αντίθεση πυκνότητας ξεπερνάει την τιμή 1,686.

Η ηλικία του σύμπαντος.

Το πυρηνικό ημερολόγιο.

Ο χρόνος Hubble καθορίζει το μέγεθος της ηλικίας του σύμπαντος. Το κοσμολογικό μοντέλο προβλέπει πως όλα τα αντικείμενα στο σύμπαν είναι νεαρότερα από την ηλικία του. Η ηλικία της Γης μπορεί να καθοριστεί από μακρόβια ισότοπα. Αυτά δημιουργούνται σε εκρήξεις σ. Νοβα με γνωστές σχετικές αναλογίες. Από την σύγκριση με σχετικές αναλογίες στη Γη έχουμε την τιμή 4,5822 δις έτη. Παρόμοιες μεθόδους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον Γαλαξία μας, όπου εξετάζουμε τον εμπλουτισμό του μεσοαστρικού αερίου σε ανάλογη πάροδο του χρόνου. Η εκτίμηση της ηλικίας του Γαλαξία είναι 13 δις έτη.

Εκτίμηση της ηλικίας των αστεριών.

Τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης μας δείχνουν ότι η παραμονή των αστεριών στο διάγραμμα H/R είναι ανάλογη με την θερμοκρασία τους. Από το σημείο εκτροπής της κ. ακολουθίας ενός ομογενούς αστρικού πληθυσμού μπορούμε να συμπεράνουμε την ηλικία του. Πρέπει να γνωρίζουμε την μεταλλικότητα και την απόσταση του πληθυσμού. Έτσι για τα σφαιρωτά στην άλω του Γαλαξία μας υπολογίζουμε ηλικία 12,5- 13 δις. έτη.

Μια άλλη μέθοδος είναι η παρατήρηση λευκών νάνων, όπου η μάζα τους (0,55 ηλιακές μεση μάζα) και η σταδιακή τους ψύξη μας δίνουν ένα θεωρητικό μοντέλο της συνιστώσας της λαμπρότητάς τους (ρυθμός μείωσης και αρχική λαμπρότητα). Η σύγκριση αυτού του μοντέλου με τις παρατηρήσεις μας δίνει την ηλικία των πιο γερασμένων λ. νάνων στα 9,5+1 δις. έτη.

Τα παραπάνω συμφωνούν με την εκτιμώμενη ηλικία του σύμπαντος να είναι στα 11-14 δις έτη.

Η σταθερά του Hubble.

Υπάρχει παρατηρήσιμη σχέση ανάμεσα στην απόσταση και την μετατόπιση στο ερυθρό των γαλαξιών. Συμπεραίνουμε από την μετατόπιση των γαλαξιών στο ερυθρό την ταχύτητα διαστολής του σύμπαντος. Η μέτρηση της σταθεράς προϋποθέτει την γνώση της απόστασης του αντικειμένου.

Οι μετρήσεις με την παράλλαξη είναι δυνατές μέχρι απόσταση 1 kpc, άρα μόνο μέσα στον Γαλαξία μας. Το άλλο πρόβλημα είναι ότι η ιδίες κινήσεις των γαλαξιών ξεπερνάνε την τιμή της σταθεράς, έτσι μόνο οι μετρήσεις σε αντικείμενα με $z > 0,01$ είναι αξιόπιστες.

Έτσι μας χρειάζονται και δευτερεύοντες δείκτες απόστασης. Αυτοί είναι αντικείμενα στα οποία η λαμπρότητά τους μας γίνεται γνωστή από άλλα συμπεράσματα παρατήρησης. Συμπεραίνουμε την απόστασή τους συγκρίνοντας την πραγματική με την φαινόμενη λαμπρότητα.

Οι σημαντικότεροι δείκτες είναι οι μεταβλητοί αστέρες, ιδίως οι Κηφείδες, τα πλανητικά νέφη, οι εκρήξεις σ. Νοβα, οι ελλειπτικοί γαλαξίες κ.α. Η σημερινή τιμή της σταθεράς είναι 68-72 kms Mpc. (Τα νεότερα αποτελέσματα του δορυφόρου Planck μας δίνουν 68 km/s /Mpc και αυτά των σουπερνόβα, αλλά και των βαρυτικών φακών 77 km/s /Mpc.)

Βαρυτικοί φακοί.

Λόγω της βαρυτικής στρέβλωσης του φωτός από μεγάλες μάζες, οι γαλαξίες ή τα γαλαξιακά σμήνη μπορεί να λειτουργούν ως βαρυτικοί φακοί και να απεικονίζουν πολλαπλά είδωλα μακρυνών αντικειμένων, αυξάνοντας την φαινόμενη λαμπρότητά τους (μετρήθηκε η ενίσχυση σουπερνόβα κατά 52 φορές από βαρυτικό φακό). Οι μεταβολές στην λαμπρότητα των μεταβλητών πηγών φαίνονται μετά από διαφορετική πάροδο του χρόνου στις διαφορετικές εικόνες του προβαλλόμενου γαλαξία. Αυτή η διαφορετική πάροδο του χρόνου για κάθε εικόνα έχει γεωμετρική σχέση, λόγω της επιμήκυνσης της διαδρομής του φωτός από τον βαρυτικό φακό.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζονται δείκτες απόστασης. Η διαφορά παρόδου του χρόνου είναι σχετική με τον χρόνο Hubble. Η αναλογική σταθερά εξαρτάται από την κατανομή της μάζας στον βαρυτικό φακό, που μπορεί να μοντελοποιηθεί. Ο συνδυασμός τέτοιων μετρήσεων σε 5 πολλαπλά απεικονισμένα Κβάζαρ μας έδωσε τιμή σταθεράς Hubble 72 km/s Mpc , πολύ σύμφωνη τιμή με την μέτρηση των δορυφόρων μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου.

Το θερμικό φαινόμενο Sunjajew- Seldowitsch.

Η αντίστροφη διασπορά Compton ενεργεί έτσι ώστε καυτά ηλεκτρόνια (στο πλάσμα) σε σμήνη γαλαξιών να αυξάνουν την ενέργεια των φωτονίων της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου που περνάνε από τα σμήνη αυτά. Η ενσωμάτωση του σήματος Sunjajew-Seldowitsch στο σμήνος μετράει την ενσωματωμένη παράμετρο Compton που είναι ανάλογη του συνολικού αριθμού των ηλεκτρονίων σε αυτό.

Η εκπομπή ακτίνων X αυτών των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα ρεύμα ακτίνων X. Από αυτήν καθορίζεται η κατανομή της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και η θερμοκρασία τους. Έτσι μετράμε μεγέθη όπως την ακτίνα του πυρήνα ενός σμήνος. Σε σύγκριση με την γωνιακή τους ανάλυση παίρνουμε έμμεσα την απόσταση του σμήνος. Αν και είναι μια μέθοδος χωρίς την ανάγκη δεικτών, έχει πολλές ανακρίβειες και δεν μας δίνει ακριβής μέτρηση της σταθεράς.

Οι αναλογία των ελαφριών στοιχείων.

Μετά από την δημιουργία των πυρηνικών σωματιδίων στην αρχή του σύμπαντος η θερμοκρασία ήταν για μερικά λεπτά αρκετά μεγάλη, ώστε να συντηχθεί το υδρογόνο σε βαρύτερα στοιχεία, πρώτα σε δευτέριο, μετά σε τρίτιο, ^3He , ^4He και ^7Li . Δεν ήταν δυνατή η δημιουργία βαρύτερων στοιχείων, αφού δεν υπάρχει σταθερό ισότοπο με ατομικό αριθμό 8. Η δημιουργία των στοιχείων αυτών συνέβη πολύ πριν το τέλος της εποχής της ακτινοβολίας. Ο μόνος παράγοντας από τον οποίο εξαρτιόταν ήταν η σχέση της πυκνότητας του σύμπαντος σε νουκλεόνια και σε φωτόνια.

Η πυκνότητα σε φωτόνια είναι καθορισμένη, μέσω της θερμοκρασίας της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου. Είναι 410 φωτόνια ανα τετρ. Εκατοστό. Από αυτό προκύπτει η πυκνότητα της βαρυσονικής μάζας, που υπολογίζεται έτσι από την αναλογία των ελαφριών στοιχείων. Αρχικά η μεγάλη πυκνότητα φωτονίων εμπόδιζε την δημιουργία δευτερίου, περίπου 150 δευτερόλεπτα μετά την μεγάλη έκρηξη. Μετά τα ελαφριά στοιχεία δημιουργήθηκαν γρήγορα. Το δευτέριο αποτελεί πιστό ίχνος της αρχέγονης σύντηξης, γιατί τα άλλα ελαφριά στοιχεία δημιουργούνται και στα αστέρια (το δευτέριο δημιουργείται στα πολύ μικρά αστέρια, που έχουν χρόνο ζωής πολύ μεγαλύτερο από την σημερινή ηλικία του σύμπαντος).

Η τιμή της αναλογίας δευτερίου σε ουδέτερα νέφη υδρογόνου συμφωνεί με τις μετρήσεις της ακτινοβολίας υποβάθρου. Προβλήματα προκύπτουν με τις τιμές του ηλίου και του λιθίου, στοιχεία που όμως παράγονται και στα (μεγαλύτερα) αστέρια.

Άμεση διαπίστωση της πυκνότητας της μάζας.

Στους σπειροειδείς γαλαξίες τα αστέρια κινούνται γύρω από το κέντρο με ταχύτητες σχεδόν ανεξάρτητες από την απόστασή τους από αυτό. Ενώ η επιφανειακή λαμπρότητα πέφτει ραγδαία μακριά από τον γαλαξιακό πυρήνα, η μάζα δεν μειώνεται ανάλογα. Αυτή είναι μια άμεση απόδειξη της σκοτεινής μάζας.

Ανάλογα φαινόμενα έχουμε σε σμήνη γαλαξιών. Το καυτό αέριο αποτελεί εκεί το 10% της μάζας και τα αστέρια το 5%. Το υπόλοιπο είναι η σκοτεινή ύλη. Αυτό εξηγεί και την αργή εξέλιξη των πληθυσμών των γαλαξιακών σμηνών. Άμεσοι υπολογισμοί δίνουν για την ορατή μάζα τιμή πολύ μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από την τιμή βάση της αναλογίας ελαφριών στοιχείων. Έτσι η σκοτεινή ύλη πρέπει να μην είναι βαρυονική ή να δημιουργήθηκε πριν την αρχέγονη σύντηξη των ελαφριών στοιχείων. Υποθετικές μαύρες τρύπες ή νετρίνα δεν μπορεί να έχουν αρκετή μάζα για να είναι υποψήφια συστατικά της σκοτεινής μάζας.

Η κοσμική ακτινοβολία μικροκυμάτων υποβάθρου.

Όπως και η μεταστοιχείωση υδρογόνου σε δευτέριο, έτσι και η διαπερατότητα του σύμπαντος στην ακτινοβολία (επανασύνδεση) καθυστέρησαν πολύ, λόγω της πυκνότητας των φωτονίων. Αυτό μπόρεσε να συμβεί μόνο όταν το σύμπαν ψύχθηκε στους 3000 βαθμούς, μετά από 380000 έτη από την μεγάλη έκρηξη. Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο, του Ηλίου γύρω από το κέντρο του Γαλαξία, του Γαλαξία μέσα στο τοπικό σμήνος και του σμήνος προς το σμήνος της Παρθένου δημιουργούν ανισοτροπία της ακτινοβολίας υποβάθρου, που σχηματίζει ένα δίπολο.

Η διακύμανση της θερμοκρασίας (3,3 μικρο Κελβιν) μας δίνει την ταχύτητα της Γης σχετικά με το σύστημα ηρεμίας του μικροκυματικού υποβάθρου (370 χιλιομέτρα/δευτερόλεπτο).

Οι δομές του υποβάθρου.

Από τότε που απελευθερώθηκε η ακτινοβολία υποβάθρου μέσω της επανασύνδεσης, το σύμπαν έχει διασταλεί κατά 1090 φορές (z). Έτσι οι διακυμάνσεις πυκνότητας που δημιουργήθηκαν, όταν συνδέθηκαν η μάζα και η ακτινοβολία (δημιουργία ατόμων), έχουν μεγαλώσει κατά 1000 φορές. Η παρατηρήσιμη διακύμανση της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας υποβάθρου θα έπρεπε να είναι 1 μικρο Κελβιν για 1% διαφορά πυκνότητας στο σημερινό σύμπαν.

Αυτή είναι όμως κατά 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η σκοτεινή ύλη δεν μπορεί να αλληλοεπιδράσει με το φως. Αυτή η διαπίστωση είναι το κυριότερο επιχείρημα στη θεωρία που υποστηρίζει ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από σωματίδια που έχουν ελάχιστη αλληλεπίδραση. Υπάρχουν 3 φυσικά μεγέθη που είναι σημαντικά για τις δομές του μικροκυματικού υποβάθρου.

Το φάσμα απόδοσης του υποβάθρου.

1) Sachs- Wolfe. Είναι ο συνδυασμός της βαρυτικής μετατόπισης στο ερυθρό και του όρου βαρυτικής καθυστέρησης κατά την επανασύνδεση, σημαντικός μόνο για μεγάλες κοσμικές κλίμακες.

2) Ακουστικές διακυμάνσεις. Προέρχονται από την βαρύτητα της σκοτεινής ύλης και την αντίθετη πίεση του μείγματος βαρυονίων- φωτονίων.

3) Απόσβεση. Προέρχεται από διάχυση φωτονίων, λόγω της αύξησης της μέσης ελεύθερης διαδρομής των φωτονίων κατά την επανασύνδεση. Φαίνεται σε κλίμακα κάτω από 10 δεύτερα της μοίρας.

Από μικρή σε μεγάλη κλίμακα έχουμε πρώτα το φαινόμενο Sachs- Wolfe, μετά τα ακουστικά κύματα και τελικά την απόσβεση. Από την κατάσταση του πρώτου ακουστικού μέγιστου μπορεί να καθοριστεί η συνολική μέση πυκνότητα ενέργειας του σύμπαντος.

Οι μέσες πυκνότητες της σκοτεινής και της βαρυονικής μάζας προέρχονται κυρίως από τις διακυμάνσεις του ακουστικού μέγιστου και των σχετικών

ελαττώσεων του δεύτερου μεγίστου, σε σχέση με το πρώτο και το τρίτο μέγιστο.

Το ακριβές σχήμα του φάσματος απόδοσης του υποβάθρου καθορίζεται από το μέγεθος της διαστολής του σύμπαντος κατά την επανασύνδεση, αρα είναι ένας συνδυασμός της σταθεράς του Hubble και της πυκνότητας. Μόνο με τον υπολογισμό και άλλων κοσμολογικών παραμέτρων μπορούν να καθοριστούν ακριβέστερα οι κοσμολογικές παράμετροι.

Οι μεγάλες δομές στην κατανομή των γαλαξιών.

Η χωρική κατανομή των γαλαξιών ακολουθεί την δομή της σκοτεινής ύλης. Έτσι πρέπει να χαρακτηρίζονται αυτά τα 2 από το ίδιο φάσμα συσχέτισης. Ακόμα, πιστεύουμε ότι οι διακυμάνσεις της χωρικής πυκνότητας των γαλαξιών ακολουθούν το κοντράστι πυκνότητας της σκοτεινής ύλης, όμως αυτό διαφοροποιείται κατά έναν παράγοντα παραμόρφωσης (bias factor). Το φάσμα συσχέτισης και η χωρική συνάρτηση συσχέτισης των γαλαξιών μπορούν να μετρηθούν άμεσα αν έχουμε τρισδιάστατες μετρήσεις των θέσεων των γαλαξιών σε μεγάλη κλίμακα.

Μια άλλη δυσκολία είναι ότι οι αποστάσεις της συντριπτικής πλειοψηφίας των γαλαξιών γίνονται γνωστές μόνο από την ερυθρολίσηση, μετρήσεις που μπορεί να παρεκκλίνουν λόγω ιδίων κινήσεων των γαλαξιών. Η ερμηνεία της ερυθρολίσησης ως αποτέλεσμα μόνο της συμπαντικής διαστολής οδηγεί σε χαρακτηριστικές παραμορφώσεις στην ερυθρολίσηση. Περιπτώσεις κίνησης μεγάλης χωρικής έκτασης δείχνουν επιμήκυνση της ερυθρολίσησης κατά της γραμμής θέασης (<δάκτυλο του θεού>).

Βαρυονικές ηχητικές ταλαντώσεις.

Οι ηχητικές ταλαντώσεις στην ανάμειξη βαρυονίων, φωτονίων και σκοτεινής ύλης, που προϋπήρχαν του επαναιονισμού και είναι υπεύθυνες για τις δομές στην κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου, έχουν δημιουργήσει επίσης δομές στην κατανομή των γαλαξιών.

Οι δομές αυτές εμφανίζονται ως μικρή κυματοειδής διακύμανση του φάσματος συσχέτισης της κατανομής των γαλαξιών σε κλίμακες που είναι μικρότερες του ορίζοντα κλίμακας της χαρακτηριστικής ερυθρολίσησης των γαλαξιών. Αυτές οι ηχητικές βαρυονικές διακυμάνσεις (baryonic acoustic oscillation) έχουν παρατηρηθεί. Έχουν μεγάλη σημασία για τον καθορισμό της κοσμικής διαστολής.

Φάσμα συσχέτισης της διασποράς γαλαξιών.

Είναι χρήσιμο στην κοσμολογία επειδή

-Το μέγιστο αυτού του φάσματος καθορίζεται από το μέγιστο του φάσματος της σκοτεινής ύλης, αφού εξαρτάται από την πυκνότητα της ύλης συνολικά. Από αρκετές παρατηρήσεις των γαλαξιών μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε την παράμετρο πυκνότητας του σύμπαντος (Ω).

-Το φάσμα συσχετισμού ψυχρής σκοτεινής ύλης πρέπει να μειώνεται ασυμπτωτικά σε μικρές κλίμακες. Η μορφή του φάσματος συσχετισμού των γαλαξιών μας δίνει μια άμεση εικόνα για την φύση της σκοτεινής ύλης.

-Τα φάσματα συσχέτισης διαφορετικών τύπων γαλαξιών μας επιτρέπουν την μέτρηση του σχετικού παράγοντα παραμόρφωσης, και βοηθάνε στα μοντέλα της δημιουργίας των γαλαξιών.

-Το μήκος κύματος των βαρυονικών ηχητικών διακυμάνσεων καθορίστηκε από τον σχετικό ορίζοντα λίγο πριν τον επαναιονισμό. Μας δίνει ένα μέτρο για την γεωμετρική μέτρηση του σύμπαντος. Το πλάτος της διακύμανσης θέτει τα όρια της συσχέτισης της πυκνότητας της βαρυονικής ύλης και της σκοτεινής ύλης.

Μετρήσεις του φάσματος συσχέτισης μας δίνουν τιμή $\Omega = 0.233$, και τη σχέση βαρυονικής με σκοτεινή ύλη στο 0,185, τιμές που είναι πολύ καλά σύμφωνες με άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις.

Η διάτμηση.

Οι κοσμικές δομές καμπυλώνουν το φως. Το φαινόμενο αυτό του βαρυτικού φακού είναι αστιγματικό και σχηματίζει μια παραμόρφωση της εικόνας, τη διάτμηση γ . Μια υποθετική στρογγυλή πηγή θα εμφανιζόταν ως έλλειψη.

Η χωρική συνάρτηση της διάτμησης μας δίνει πληροφορίες για την σκοτεινή ύλη. Το πλάτος της είναι ανάλογο του φάσματος συσχετισμού της. Η κοσμική διάτμηση είναι μετρήσιμη γιατί η πυκνότητα των μακρινών αμυδρών γαλαξιών είναι τόσο, ώστε η απόσταση μεταξύ τους να είναι πολύ μικρότερη από τον συσχετισμό της διάτμησης. Έτσι μπορούν να δώσουν καλό μέσο όρο πολλές εικόνες των γαλαξιών. Με την παραδοχή ότι χωρίς τη διάτμηση οι μέσες εικόνες θα ήταν κυκλικές, η διάτμηση είναι ίση με την μέση ελλειπτικότητα τους. Στο μεταξύ η κοσμική διάτμηση έχει μετρηθεί από πολλά διαφορετικά τηλεσκόπια. Η χωρική της συνάρτηση έχει το σχήμα που θα περιμέναμε με την παραδοχή της ψυχρής σκοτεινής ύλης.

Οι εκρήξεις σ . Νοβα Ια

Οι εκρήξεις σ . Νοβα τύπου Ια δεν είναι απόλυτα κεριά λαμπρότητας (δεν έχουν πάντα την ίδια λαμπρότητα), αλλά μετατρέπονται σε τέτοια (τυποποίηση στα $-19,2 \text{ mag}$). Η απόλυτη λαμπρότητά τους σχετίζεται με την διάρκεια της έξαρσής τους (Phillips relation), μέσω της οποίας η διασπορά της λαμπρότητας μειώνεται μέχρι 10%.

Η κοσμολογική χρήση τους.

Μετά την τυποποίηση σε μια μέση λαμπρότητα, οι μετρημένες ροές από Ια εξαρτώνται από την απόστασή τους. Η λαμπρότητα δεν χρειάζεται να είναι ακριβώς γνωστή, αλλά να βαθμονομείται μέσω των αρκετά κοντινών Ια, για τις οποίες να ισχύει η γραμμική σχέση της απόστασής τους. Με τη σύγκριση αυτών των 2 τιμών λαμπρότητας μπορεί να εκφραστεί η πορεία των κοσμολογικών αποστάσεων με την ερυθρολίσηση, μέσω της κατάστασης της ροής κοντινών και μακρινών Ια.

Οι Ια μπορούν έτσι να μετρήσουν την διαφοροποίηση της αναλογίας λαμπρότητας/ απόστασης με την ερυθρολίσηση. Αυτή εξαρτάται πολύ από την κοσμολογική παράμετρο (Ω). Έτσι, σύμφωνα και με την κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου, οι Ια δείχνουν θετική τιμή για το Ω .

Επίσης μας δείχνουν ότι η επιτάχυνση της κοσμικής διαστολής γίνεται θετική μετά από $z < 0,78$, άρα μας δείχνουν τη μετάβαση από επιβραδυνόμενη σε επιταχυνόμενη διαστολή.

Τυποποίηση του φάσματος συσχέτισης.

Το σχήμα του φάσματος συσχέτισης της σκοτεινής ύλης βασίζεται στην παραδοχή της ψυχρής σκοτεινής ύλης, όταν είναι γνωστός ο φασματικός δείκτης σ . Σε ακτίνα 8 Mpc έχουμε τον δείκτη σ_8 . Λόγω αβεβαιότητας του βαθμού παραμόρφωσης και της πιθανής κλίμακας εξάρτησης, δεν μπορεί να καθοριστεί άμεσα ο σ_8 από τη δομή της διασποράς των γαλαξιών. Οι τρεις παρακάτω μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την μέτρησή του.

1) Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου. Λόγω της προβολής των χωρικών διακυμάνσεων πυκνότητας σε σφαίρα και της αύξησης των διακυμάνσεων αυτών από την εποχή του επαναιονισμού, η μετατροπή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας της κοσμικής ακτινοβολίας σε φασματικό δείκτη εξαρτάται από τις κοσμολογικές παραμέτρους. Το σύμπαν επαναιονίστηκε μέσω των πρώτων πηγών ακτινοβολίας στις υπεριώδεις. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εμφανίζονται (στα μικροκύματα) να έχουν αποσβεστεί λόγω διάχυσης Thomson. Ταυτόχρονα η διάχυση αυτή δείχνει γραμμική πολικότητα και μέσω της τυπικής κλίμακας της καθορίστηκε η ερυθρολίσηση του επαναιονισμού σε $z = 11 \pm 1.4$. Έτσι έχουμε $\sigma_8 = 0,817$.

2) Ο ασθενής κοσμικός παράγοντας βαρυτικού φακού (κοσμική διάτμηση). Οι μετρήσεις της κοσμικής διάτμησης δίνουν $\sigma_8 = 0,713$ με $\Omega = 0,279$. Αβεβαιότητες σε αυτήν την μέθοδο αποτελούν η διασπορά της ερυθρολίσησης των γαλαξιών, στους οποίους μετρήσαμε την κοσμική διάτμηση, και η μη γραμμική εξέλιξη

του φάσματος συσχέτισης της σκοτεινής ύλης, που επηρεάζει την κοσμική διάτμηση πολύ σε κλίμακες < 10 λεπτών της μοίρας.

3) Η συχνότητα των σμηνών γαλαξιών. Η χωρική πυκνότητα των μεγάλης μάζας άλεων σκοτεινής ύλης των γαλαξιακών σμηνών εξαρτάται εκθετικά από τον σ_8 στη-2. Έτσι η συχνότητα των σμηνών με δεδομένη ελάχιστη μάζα είναι πολύ ευαίσθητη για την τιμή της σ_8 . Η χρήση αυτής της μεθόδου επιβαρύνεται αισθητά με το ότι οι μάζες των σμηνών δεν είναι άμεσα μετρήσιμες. Έτσι χρησιμοποιούμε, θεωρητικές και μέσω παρατηρήσεων, τυποποιημένες σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας ή της λαμπρότητας των αερίων στις ακτίνες X σε σμήνη και της μάζας τους. Πιο σπάνια καθορίζουμε την μάζα από την επίδραση του βαρυτικού φακού ή της ορατής εκπομπής. Η τιμή για την σ είναι εδώ 0,76.

Αντικειμενικά η σ είναι ένα από τα πιο άγνωστα μεγέθη της κοσμολογίας. Φαίνεται η πιθανή τιμή της να είναι κοντά στο 0,8.

Σκοτεινή ύλη.

Η κίνηση των αστεριών στους γαλαξίες και των γαλαξιών στα σμήνη τους δείχνει ότι χρειάζεται δεκαπλάσια μάζα από αυτήν που διαπιστώνουμε σε όλο το φάσμα, ώστε να διατηρηθεί ο βαρυτικός τους δεσμός. Βάσει της θεωρίας της βαρύτητας αυτή η ύλη είναι μη ορατή (σκοτεινή ύλη).

Το πλάτος της διακύμανσης της θερμοκρασίας της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου συμφωνεί με το πλάτος των σημερινών διακυμάνσεων πυκνότητας των κοσμικών δομών μόνο αν η σκοτεινή ύλη είναι σε μια μορφή που δεν αλληλοεπιδρά με το φως. Διαφορετικά οι διακυμάνσεις αυτές της θερμοκρασίας θα έπρεπε να ήταν της τάξης του 10στη-3 του βαθμού αντί στην τιμή των 10στη-5 του βαθμού που μετράμε σήμερα.

Η αναλογία των ελαφριών στοιχείων στο νεαρό σύμπαν συμφωνεί ώστε η βαρυονική μάζα να αποτελεί μόνο το 4% της κρίσιμης πυκνότητας. Όμως όλη η πυκνότητα της συνολικής ύλης αντιστοιχεί στο 27% (το υπόλοιπο είναι η σκοτεινή ενέργεια). Η διαφορά (23%) είναι η σκοτεινή ύλη.

Βάσει των παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η σκοτεινή ύλη μπορεί να αποτελείται από σωματίδια ύλης ασθενής αλληλεπίδρασης.

Σωματίδια με μεγάλες ταχύτητες (10- 100 kms) δεν είναι υποψήφια για την σκοτεινή ύλη, επειδή δεν μπορούν να δεσμευτούν βαρυτικά σε μικρές δομές. Ειδικά τα νετρίνα αποκλείονται. Τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης πρέπει να είναι ψυχρά (αργά). Όταν τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης είναι σε θερμική ισορροπία, η μικρή τους ταχύτητα συνεπάγεται μεγάλη μάζα. Αυτά τα σωματίδια ονομάστηκαν WIMP (weakly interacting massive particles). Προσπαθούμε να τα ανακαλύψουμε άμεσα (επιταχυντές σωματιδίων) και έμμεσα (πειράματα ανάκρουσης). Υποψήφιοι είναι το ελαφρύτερο υπερ-συμμετρικό σωματίδιο νετραλίνο ή το αξιόνιο.

Ο κοσμικός πληθωρισμός και η σκοτεινή ενέργεια.

Με την φάση της διαστολής μεγάλης ταχύτητας (πληθωρισμό) λύνονται 2 προβλήματα της κοσμολογίας.

-Το πρόβλημα του ορίζοντα, πως μπορεί το σύμπαν να είναι σχεδόν ισότροπο. Μέχρι το τέλος της επανασύνδεσης τα υπό αλληλοεπίδραση πεδία έχουν διάμετρο μόνο μερικές μοίρες στον ουρανό. Πως μπορεί όλες οι περιοχές του σύμπαντος να έχουν την ίδια θερμοκρασία (χωρίς να έχουν αλληλοεπιδράσει ποτέ μεταξύ τους)?

-Το πρόβλημα της επιπεδότητας, ένα σχεδόν αλλά όχι εντελώς χωρικά επίπεδο σύμπαν εξελίσσεται έτσι ώστε να μειώνεται η επιπεδότητά του. Πως μπορεί το σύμπαν να είναι ακόμη και σήμερα, 14 δις έτη μετά την μεγάλη έκρηξη, σχεδόν επίπεδο?

Βάσει του πληθωρισμού, μικρές περιοχές που αλληλοεπιδρούσαν στο αρχικό σύμπαν μεγάλωσαν σε τέτοια έκταση, ώστε να βρίσκονται εκτός παρατηρήσιμου σύμπαν. Η ακτίνα της καμπύλωσης (μη επιπεδότητα) μεγάλωσε τόσο, ώστε να μην είναι πλέον μετρήσιμη στο παρατηρήσιμο σύμπαν.

Πληθωρισμός και σχηματισμός δομών.

Μια τέτοια φάση πληθωρισμού μπορεί να εξηγήσει και την προέλευση των κοσμικών δομών. Κβαντικές διακυμάνσεις μεγεθύνθηκαν σε μακροσκοπική κλίμακα και πάγωσαν έξω από τον ορίζοντα (ώστε η καθεμιά να μην μπορέσει να αλληλοεπιδράσει ξανά με καμία άλλη). Έγιναν οι σπόροι των κοσμικών δομών. Βάσει της κοσμικής ακτινοβολίας μικροκυμάτων, το σύμπαν επεκτάθηκε κατά 54 τάξεις μεγέθους κατά τον πληθωρισμό. Μια άλλη ισχυρή απόδειξη του πληθωρισμού θα ήταν η ανακάλυψη ενός υποβάθρου από βαρυτικά κύματα, που μπορεί να προκύψει από μετρήσεις της πολικότητας του μικροκυματικού υποβάθρου σε μεγάλες κλίμακες.

Ο πληθωρισμός μπορεί να ενεργοποιήθηκε από ένα βαθμωτο πεδίο υπό αλληλεπίδραση, το λεγόμενο πληθωριστικό πεδίο.

Η σκοτεινή ενέργεια.

Η κοσμολογική σταθερά είναι απλή από την πλευρά της γενικής σχετικότητας, αλλά πολύ ανικανοποιητική και ακατανόητη από την πλευρά της θεωρίας πεδίων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ότι η σταθερά αυτή είναι πολύ μικρή σχετικά με τις προσδοκίες της κβαντικής θεωρίας πεδίου, αλλά απεριόριστα μεγάλη και συγκρίσιμη με την σημερινή πυκνότητα σε ύλη.

Για να το κατανοήσουμε αυτό χωρίς να χρειαστούμε ακραία εξομάλυνση των διακυμάνσεων στο αρχικό σύμπαν, εισάγουμε την παραδοχή ενός υπό αλληλεπίδραση πεδίου όπως στον πληθωρισμό. Αυτό χαρακτηρίζεται από την πίεσή του και την ενεργειακή πυκνότητά του. Ως κοσμολογική σταθερά (στατικό σύμπαν) πρέπει να έχει την τιμή -1 και ως επιταχυνόμενη διαστολή $-1/3$. Η σκοτεινή ενέργεια επηρεάζει τον ρυθμό διαστολής και την ανάπτυξη των δομών, όπως και την γεωμετρία του σύμπαντος.

Σημείωση 1

Όταν το σύμπαν ήταν σε ηλικία 180 εκ. ετών ($z = 20-30$), εκτιμάται ότι τα μεγάλα νέφη θερμού μοριακού υδρογόνου κατέρρεαν, παράγοντας τεράστια αστέρια (εκατοντάδων ηλιακών μαζών). Όταν αυτά γρήγορα εξερράγησαν ως σ. Νόβα (ή εκρήξεις αστάθειας ζευγών ηλεκτρονίων- ποζιτρονίων, pair instability), εμπλούτισαν το σύμπαν με βαρύτερα στοιχεία, δίνοντας την δυνατότητα στα νέφη να ψυχθούν, ώστε να γεννούνται μικρότερα και μακροβιότερα αστέρια.

Η ανακάλυψη των πρώτων αστεριών θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί από την απουσία βαρέων στοιχείων στο φάσμα τους. Ο αστρικός τους άνεμος συνέβαλε στον επαναιονισμό του σύμπαντος, κάνοντας τα νεφελώματα να λάμπουν. Δηλαδή τα θέρμανε τόσο, ώστε να αποσπαστούν ελευθέρως ηλεκτρόνια από αυτά, με αποτέλεσμα τον ιονισμό τους. Ετσι δεν απορροφούσαν πια όλο το φως των αστεριών, κάνοντας το σύμπαν ορατό. Βοήθησαν και οι δίσκοι προσαύξησης των Κβαζαρ, με την ισχυρή τους εκπομπή ακτινοβολίας. Αυτοί δημιουργήθηκαν από συγχωνεύσεις μ. τρυπών από τα απομεινάρια των πρώτων αστεριών. Δίνουν διαφορετικό φάσμα από τα αστέρια με αποτέλεσμα να μπορούμε να τα ξεχωρίσουμε.

Σημείωση 2.

Η μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου προέρχεται από την εξαύλωση ύλης- αντιύλης σε ακτίνες γ . Αυτές μετατοπίστηκαν στο ερυθρό κατά 10στη15 φορές, και τις μετράμε σήμερα στα μικροκύματα. 10 μικρά του δευτερολέπτου μετά την μεγάλη έκρηξη δημιουργήθηκαν βαρυόνια και αντιβαρυόνια (από κουαρκ και αντικουαρκ, αντίστοιχα) από το αρχικό πλάσμα κουαρκ και γλουονίων. Για κάθε 1 δισ αντιβαρυόνια δημιουργήθηκαν 1 δισ και ένα βαρυόνια. Πρόκειται για μια ασυμμετρία που δεν μπορούμε ακόμα να εξηγήσουμε. Ετσι για κάθε βαρυόνιο που επέζησε από την εξαύλωση με τα αντιβαρυόνια δημιουργήθηκαν 1 δισ. φωτόνια (από την εξαύλωση των

βαρυονίων με τα αντιβαρυόνια). Αυτό είναι μετρήσιμο στην ακτινοβολία υποβάθρου, και καθόρισε την αναλογία νετρονίων με πρωτόνια, όπως επίσης και την δημιουργία δευτερίου μερικές εκατοντάδες δευτερόλεπτα μετά την μεγάλη έκρηξη.

Το κοσμολογικό μοντέλο προβλέπει η αναλογία των βαρυονίων και αντιβαρυονίων να είναι πάντα σταθερή (ίσως η διάσπαση X- μποζονίων σε περισσότερα κουαρκ από αντικουαρκ).

Σημείωση 3

Οι μοντέρνες θεωρίες δημιουργίας γαλαξιών μας λένε ότι οι γαλαξίες δημιουργήθηκαν σε διάχυτα, λιγότερο ή περισσότερο σφαιρικά νέφη σκοτεινής ύλης. Αυτές οι άλως είχαν πολύ μεγαλύτερη ακτίνα από τους σημερινούς γαλαξίες.

Η σκοτεινή και η ορατή ύλη αρχικά ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες. Μικρές βαρυτικές ανομοιομορφίες στην μεικτή αυτή ύλη είχαν ως αποτέλεσμα την τοπική συμπύκνωσή της. Και κατά την δημιουργία των άλεων η ορατή ύλη πρέπει να ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη με την σκοτεινή. Αλλά σε αντίθεση με την σκοτεινή ύλη, το αέριο μπορεί να απωλέσει την πίεσή του μέσω ψύξης και να καταρρεύσει στο κέντρο της άλως, δημιουργώντας έναν γαλαξία.

Η πηγή της στροφορμής του γαλαξία δεν είναι η σκοτεινή ύλη, αλλά όλη η διαδικασία δημιουργίας της άλως. Αυτό γιατί η ύλη που δημιούργησε την άλω δεν ήταν αρχικά συμμετρικά σφαιρική. Έτσι παρουσιάστηκαν ροπές στροφορμής μεγάλων εξωτερικών περιοχών της άλως. Με αυτόν τον τρόπο άρχισε η περιστροφή της μεικτής ακόμα σκοτεινής και ορατής ύλης.

Όσο η άλω παραμένει ως μεγάλο διάχυτο νέφος, η στροφορμή δεν είναι αισθητή (έναντι της βαρύτητας). Όμως με την κατάρρευση της ορατής ύλης διατηρήθηκε η στροφορμή σε πολύ μικρότερο χώρο, με αποτέλεσμα την δημιουργία σπειροειδών γαλαξιών. Η μεταφορά στροφορμής από την σκοτεινή στην ορατή ύλη δεν είναι από μόνη της ικανή να εξηγήσει τις δομές των γαλαξιών.

Σημείωση 4

Ένα από τα μυστήρια της κοσμολογίας είναι η ανακάλυψη της πηγής της ακτινοβολίας που ήταν αιτία του επαναιονισμού της ύλης του νεαρού σύμπαντος. Όταν 380000 έτη μετά την μεγάλη έκρηξη το σύμπαν ψύχθηκε αρκετά, ώστε να σχηματιστούν άτομα, το μόριο που κυριάρχησε και κυριαρχεί και σήμερα είναι το μοριακό υδρογόνο. Αυτό όμως απορροφούσε την υπεριώδη ακτινοβολία των τεράστιων πρώτων άστρων, με αποτέλεσμα το σύμπαν να παραμένει σκοτεινό (να μην λάμπουν οι γαλαξίες). Μια ομάδα ερευνητών (Isotow) από την ακαδημία επιστημών της Ουκρανίας απέδειξε ότι οι γαλαξίες <πράσινα μπιζέλια> παρουσίαζαν έντονη αστρογέννηση. Αυτοί οι γαλαξίες (φωτογραφικά μοιάζουν με πράσινα μπιζέλια) σχημάτιζαν τόσο μεγάλο αριθμό νέων τεράστιων αστεριών, που η υπεριώδης ακτινοβολία τους δεν μπορούσε να απορροφηθεί από το μοριακό υδρογόνο που διέθεταν. Το 8% της ακτινοβολίας αυτής διέφευγε στον μεσογαλαξιακό χώρο, με αποτέλεσμα να ιονίσει μοριακό υδρογόνο 40πλάσιας μάζας από αυτήν των γαλαξιών. Ο επαναιονισμός επιτεύχθηκε όταν ένα μεγάλο μέρος του μοριακού υδρογόνου διασπάστηκε σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια.

Έτσι οι γαλαξίες πράσινα μπιζέλια είχαν σημαντική συνεισφορά στην μετάβαση του σύμπαντος από σκοτεινό σε φωτεινό.

