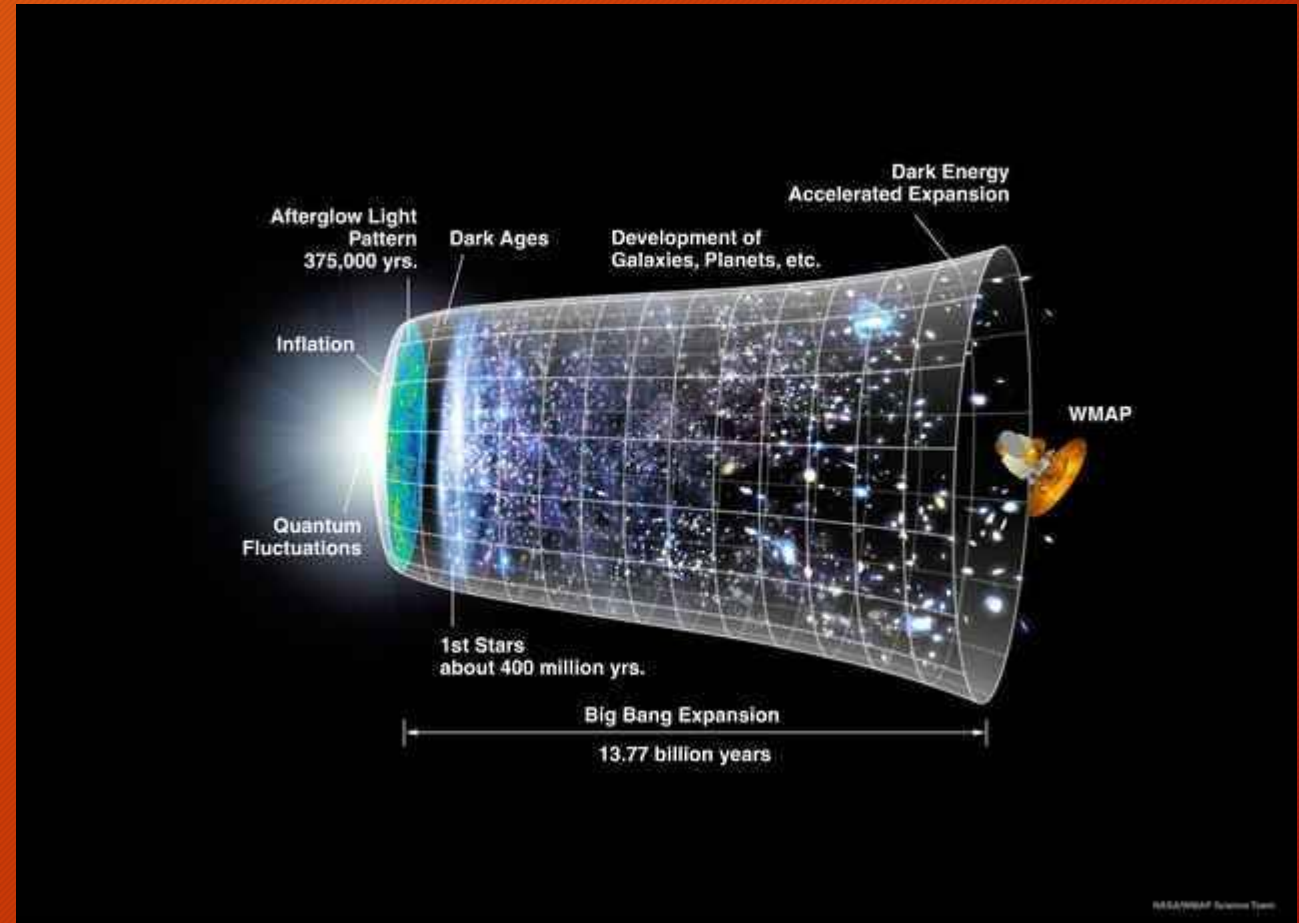


Εισαγωγή στην Κοσμολογία (μέρος 2)

Γιώργος Νικολιδάκης

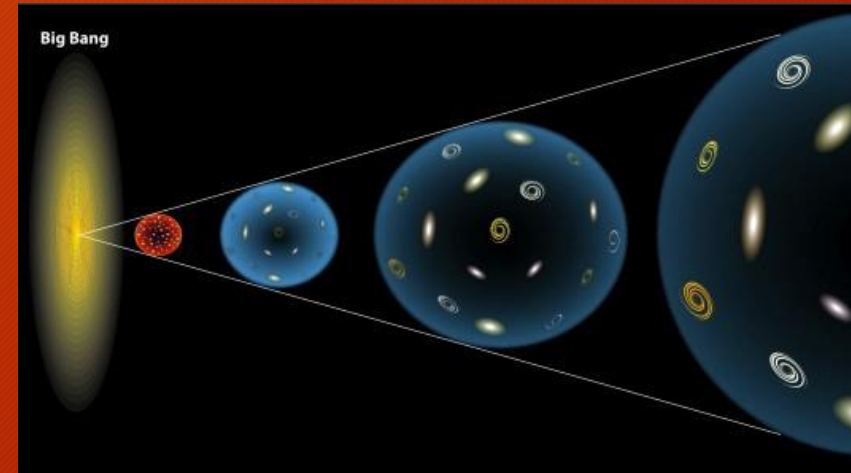
Περιεχόμενα

- Το Μοντέλο του Hot Bing Bang
- Το νόημα της διαστολής - διαστέλλονται τα πάντα ?
- Από που ξεκίνησαν όλα ?
- Ένα σύμπαν από το τίποτα !
- Η σύντομη ιστορία του πρώιμου σύμπαντος
- Εποχή Planck, Μεγάλης ενοποίησης
- Εποχή των Quark
- Κοσμικός πληθωρισμός
- Βαρυογένεση, εποχή των αδρονίων
- Εποχή των λεπτονίων
- Εποχή της πυρηνοσύνθεσης
- Εποχή της επανασύνδεσης
- Κοσμική Ακτινοβολία Υποβάθρου CMB
- Τα βασικά της Κοσμολογίας- η μετρική του σύμπαντος
- Ο παράγοντας κλίμακας
- Εξισώσεις Friedman
- Κρίσιμη πυκνότητα-Παράμετρος πυκνότητας
- Η εξέλιξη του σύμπαντος



Το Μοντέλο του Hot Bing Bang

- Η διαπίστωση, ότι οι γαλαξίες απομακρύνονταν μεταξύ τους σήμαινε ότι στο μακρινό παρελθόν τους είχαν μια κοινή εκκίνηση. Επομένως, συμπερασματικά καταλήγουμε στη γενική άποψη ότι η ύλη και η ενέργεια του Σύμπαντος ήταν συγκεντρωμένη σ' ένα αρχικό σημείο με άπειρη θεωρητικά πυκνότητα.
- Η θεωρία του Big Bang είναι το κυρίαρχο κοσμολογικό μοντέλο του παρατηρούμενου σύμπαντος και περιγράφει την εξέλιξή του από τις πρώτες στιγμές μέχρι την δομή μεγάλης κλίμακας που παρατηρούμε σήμερα.
- Περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το σύμπαν επεκτάθηκε από μια κατάσταση υψηλής πυκνότητας και υψηλής θερμοκρασίας, και προσφέρει μια εκτενή εξήγηση για ένα ευρύ φάσμα φαινομένων που παρατηρούμε σήμερα στο σύμπαν όπως η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου.
- Σύμφωνα με το καθιερωμένο κοσμολογικό πρότυπο, το Σύμπαν γεννήθηκε πριν από περίπου 13,8 δισεκατομμύρια χρόνια την χρονική στιγμή $t = 0$ σε μια υπέρθερμη και υπέρπυκνη κατάσταση και έκτοτε διαστέλλεται και ψύχεται συνεχώς (Hot Bing Bang).
 - Δεν υπάρχει κάποιο προνομιακό σημείο στο σύμπαν που να μπορούμε να πούμε ότι είναι το κέντρο της έκρηξης.
 - Το σύμπαν δεν επεκτάθηκε στο διάστημα, καθώς ο χώρος δεν υπήρχε πριν από το σύμπαν. Θα πρέπει να σκεφτούμε το Big Bang σαν μια ταυτόχρονη εμφάνιση του χώρου παντού.
- Αυτό που διαστέλλεται είναι ο ίδιος ο χώρος παρασύροντας μαζί του και τη μάζα του Σύμπαντος.
- Είναι σαν όλο το Σύμπαν να βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια ενός μπαλονιού που φουσκώνει συνεχώς καθώς ο χρόνος κυλάει.
- Δεδομένου ότι το σύμπαν με τον ορισμό του περιλαμβάνει το σύνολο του χώρου και του χρόνου όπως τον ξέρουμε, είναι πέρα από το μοντέλο του Big Bang να ρωτήσουμε μέσα σε τι διαστέλλεται.

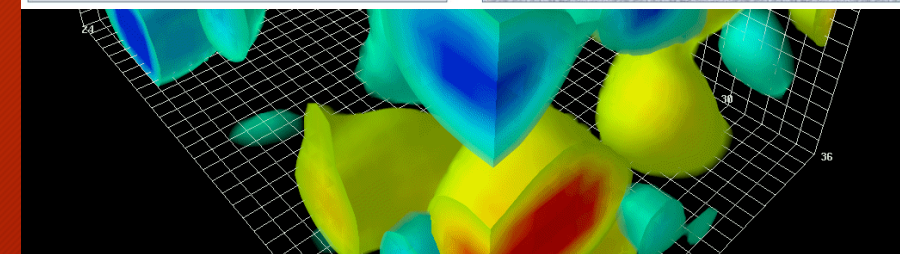
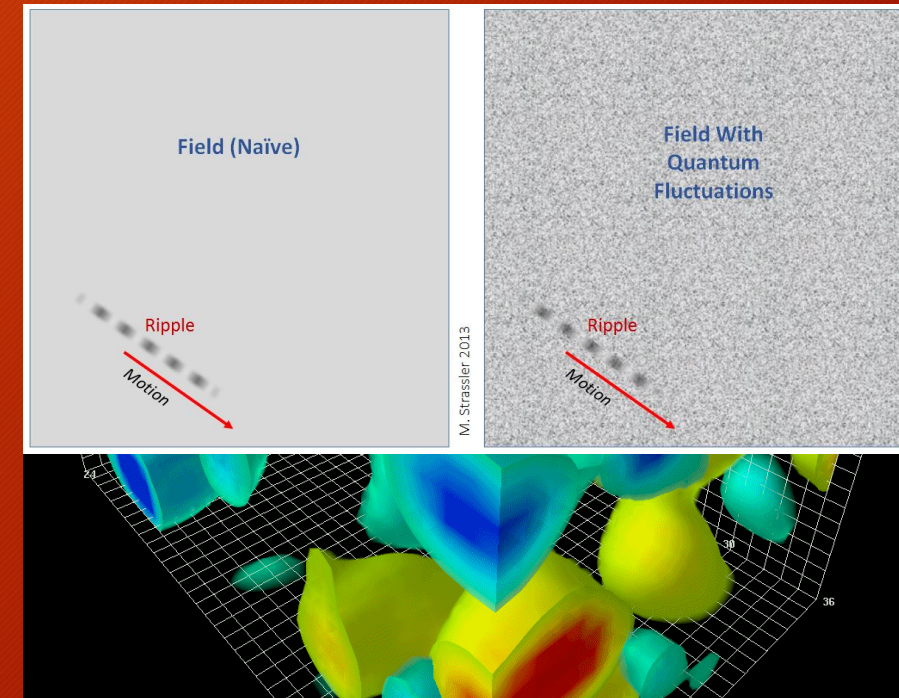
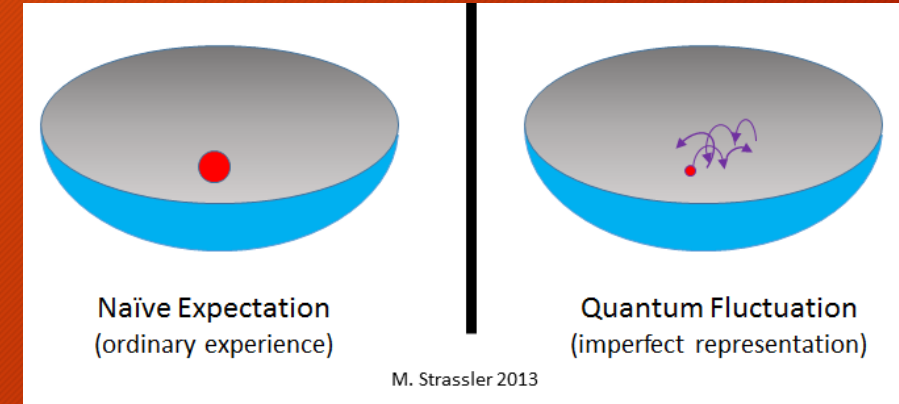


Το νόημα της διαστολής - διαστέλλονται τα πάντα ?

- Τα σώματά μας δεν γίνονται μεγαλύτερα
 - Τα άτομα στο σώμα μας κυριαρχούνται από τις δυνάμεις των χημικών δεσμών ενώ η βαρύτητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο
- Η τροχιά της Γης δεν μεγαλώνει
 - Κυριαρχείται από το βαρυτικό δυναμικό του Ήλιου
 - Λόγω διαστολής μεγάλωσε ένα μέρος στα 10^{24}
- Τα αστέρια στον γαλαξία μας δεν απομακρύνονται
 - Η κατανομή της πυκνότητας της ύλης στον γαλαξία μας διαφέρει πολύ από την ομαλή κατανομή που παρατηρούμε σε μεγάλες κλίμακες.
- Στις κλίμακες δεκάδων μεγαπάρσεκ το σύμπαν γίνεται ομογενές και ισότροπο και εκεί εφαρμόζονται οι εξισώσεις Friedman και οι γαλαξίες απομακρύνονται και υπάρχει διαστολή του σύμπαντος σύμφωνα με την κοσμολογική αρχή.
 - Διαστολή υπάρχει όταν η κίνηση των αντικειμένων σε μεγάλη κλίμακα κυριαρχείται από την αθροιστική βαρυτική δύναμη μιας ομογενοῦς διασποράς της μάζας ανάμεσά τους

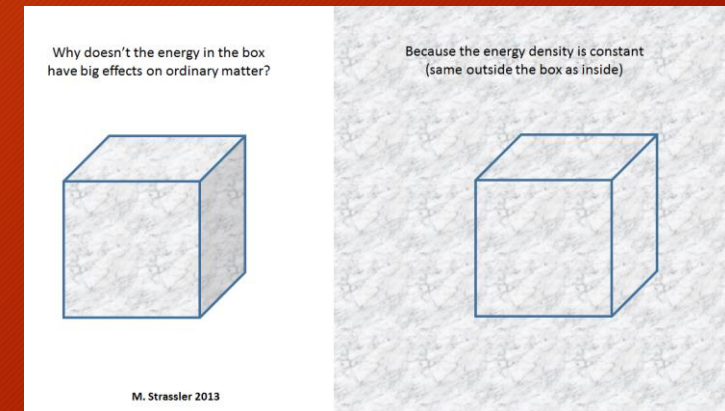
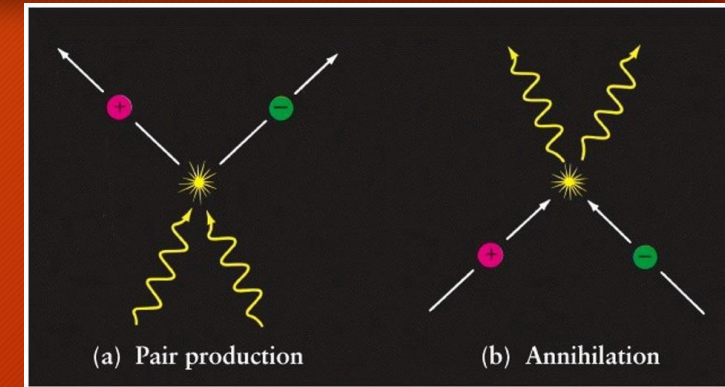
Από που ξεκίνησαν όλα ?

- Στην κβαντική θεωρία πεδίου η κατάσταση κβαντικού κενού είναι μια κβαντική κατάσταση με το χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ενέργειας. Αλλά δεν είναι το κενό άδαιο από οτιδήποτε.
- Το κενό brithi από ενέργεια και φευγαλέα σωματίδια που αναδύονται στον πραγματικό κόσμο για πολύ λίγο και στη συνέχεια εξαφανίζονται αμέσως δίνοντας πίσω την ενέργεια που τα γέννησε.
- Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας μας προέρχεται από εικονικά κουάρκ και γλουόνια που “ξεπηδάνε” από το κβαντικό κενό πράγμα που σημαίνει ότι τα κενά δεν είναι άδαιο αλλά είναι γεμάτο ενέργεια και κβαντικές διακυμάνσεις με πυκνώματα και αραιώματα στην ενέργεια και σωματίδια σε ζεύγη μπορούν να δημιουργούνται και να εξαφανίζονται κάθε στιγμή.
- Τα quarks αποκτούν μάζα μέσω του μηχανισμού Higgs αλλά η μάζα των τριών quarks άμα προστεθεί συνεισφέρει περίπου στο 1% της μάζας των πρωτονίων και νετρονίων το υπόλοιπο 99% οφείλεται στην λεγόμενη ενέργεια δέσμησης της κβαντικής χρωμοδυναμικής που είναι ακριβώς η ενέργεια της κβαντικής διακύμανσης του κενού.
- Ο τρόπος που δεσμεύονται τα κουάρκ στα πρωτόνια είναι θεμελιωδώς διαφορετικός από όλες τις άλλες δυνάμεις και αλληλεπιδράσεις που γνωρίζουμε. Αντί να γίνεται ισχυρότερη η δύναμη όταν τα quark πλησιάζουν - όπως οι βαρυτικές, ηλεκτρικές ή μαγνητικές δυνάμεις - η ελκτική δύναμη μειώνεται στο μηδέν όταν τα κουάρκ είναι πολύ κοντά. Και αντί να εξασθενεί η δύναμη όταν τα αντικείμενα απομακρύνονται, η δύναμη που τα κρατάει ενωμένα γίνεται ισχυρότερη.
- Μπορούμε να το φανταστούμε ότι τα δεσμευμένα κουάρκ ανταλλάσσουν συνεχώς εικονικά γλουόνια τα οποία μπορούμε να φανταστούμε ότι σχηματίζουν ένα σωλήνα ροής παρόμοιο με μια ελαστική χορδή που εκτείνεται μεταξύ των δύο σωματιδίων.
- Σε μεγάλες ενέργειες μπορούν να απομακρύνονται τα quark αλλά η δυναμική ενέργεια μεταξύ τους αυξάνεται και αν δώσουμε αρκετή ενέργεια τελικά ο σωλήνας ροής σπάει, σχηματίζοντας δύο ακόμη κουάρκ σε ζεύγη (quark antiquark) τα οποία αναδύονται κατά κάποιο τρόπο από το κβαντικό κενό.



Ένα σύμπαν από το τίποτα !

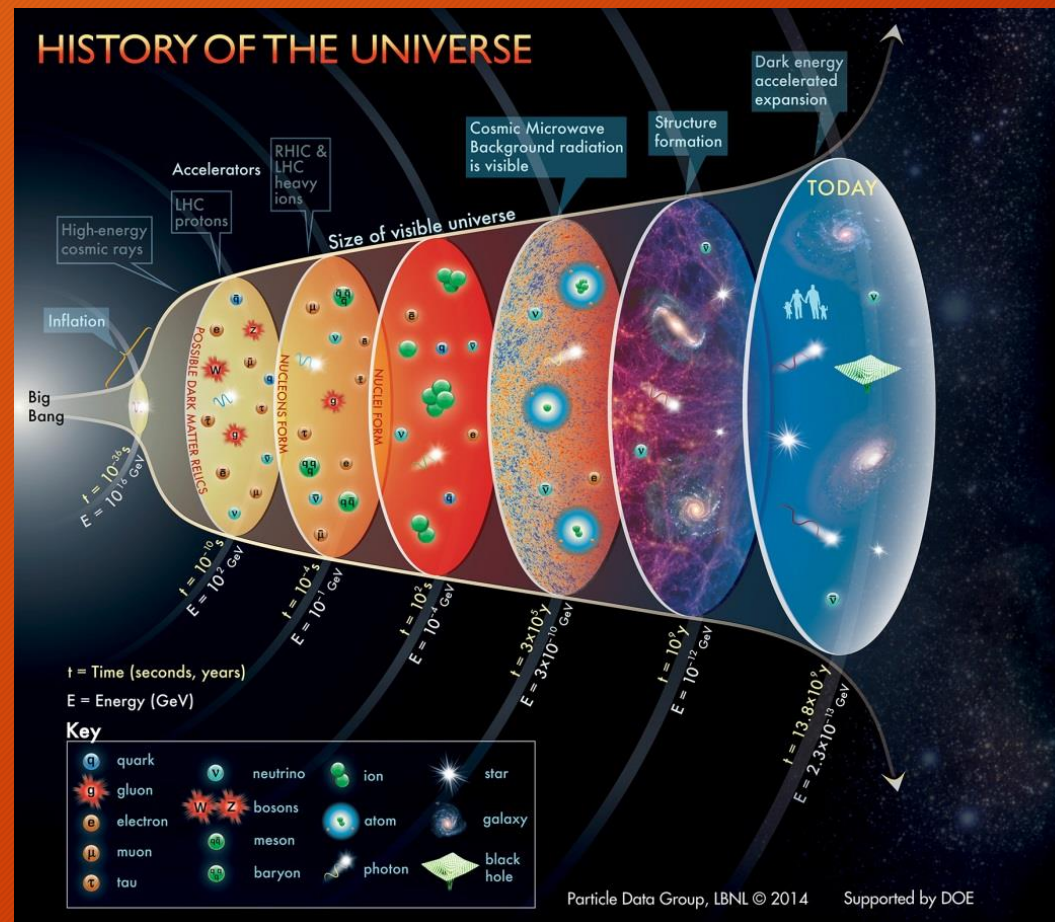
- Το επικρατέστερο σενάριο σήμερα είναι για ένα μοντέλο big bang όπου το σύμπαν είναι μια κβαντική διακύμανση του κενού που δημιούργησε ύλη και αντιύλη σε ίσες ποσότητες
- Τα υλικά και τα σωματίδια της αντιύλης παράγονται πάντα ως ζεύγος και, αν έρθουν σε επαφή, εξαϋλώνονται αφήνοντας πίσω καθαρή ενέργεια. Κατά τη διάρκεια των πρώτων κλασμάτων του δευτερολέπτου της Μεγάλης Έκρηξης, στο ζεστό και πυκνό σύμπαν υπήρχαν σε ζεύγη σωματίδια και τα αντίστοιχα αντισωματίδιά τους και κανονικά όλο το σύμπαν θα έπρεπε να εξαϋλωθεί αφήνοντας πίσω του καθαρή ενέργεια δηλαδή ακτινοβολία και καθόλου ύλη.
- Αλλά σήμερα, ό,τι βλέπουμε από τις μικρότερες μορφές ζωής στη Γη μέχρι τα μεγαλύτερα αστρικά αντικείμενα αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ύλη και γνωρίζουμε ότι, δεν υπάρχει πολύ αντιύλη για να βρεθεί.
- Κάτι πρέπει να έχει συμβεί κάποια διαδικασία που να έχει χαλάσει αυτή την ισορροπία ευνοώντας την ύλη αντί της αντιύλης και αυτό είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη φυσική δηλαδή να καταλάβουμε τι συνέβη με την αντιύλη και γιατί βλέπουμε μια ασυμμετρία μεταξύ της ύλης και αντιύλης.
- Προσπαθώντας να ανακαλύψουμε τους λόγους, πειράματα σωματιδιακής φυσικής έδειξαν ότι οι νόμοι της φύσης δεν ισχύουν εξίσου για την ύλη και την αντιύλη.
- Έχουν παρατηρηθεί αυθόρμητοι μετασχηματισμοί μεταξύ των σωματιδίων και των αντι-σωματιδίων τους, που συμβαίνουν εκατομμύρια φορές ανά δευτερόλεπτο πριν αποσυντεθούν.
 - Έχουμε δει τα D-μεσόνια να ταλαντεύονται ανάμεσα στο να είναι ένα φυσιολογικό σωματίδιο και ένα αντι-σωματίδιο, μια διαδικασία που έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν στα μεσόνια K.
 - Αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό το flip-flopping συμβαίνει με διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα με το αν ένα μεσόνιο μετατρέπεται σε αντιμεσόνιο ή το αντίστροφο.
 - Τα πειράματα στη δεκαετία του 1960 έδειξαν ότι τα μεσόνια K είναι πιο πιθανό να αλλάξει από το αντι-σωματίδιό του στο φυσιολογικό σωματίδιο παρά το αντίστροφο και κάποιες παρατηρήσεις στο Fermilab μέχρι το 2010 έχουν δείξει ότι το ίδιο ισχύει για τα μεσόνια B.
 - Αυτό είναι ένα παράδειγμα αυτού που είναι γνωστό ως παραβίαση CP - μια εξαίρεση από την αρχή ότι οι φυσικοί νόμοι θα πρέπει να είναι ίδιοι για ένα σωματίδιο όπως είναι για ένα αντι-σωματίδιο με την κατεύθυνση του αντιστρέψιμη.
- Φαίνεται ότι ένα πολύ μικρό μέρος της ύλης - περίπου ένα σωματίδιο ανά δισεκατομμύριο - κατάφερε να επιβιώσει. Αυτό είναι αυτό που βλέπουμε σήμερα.
- Με άλλα λόγια, μπορούμε να ξεκινήσουμε με ένα εντελώς συμμετρικό Σύμπαν, το οποίο υπακούει σε όλους τους γνωστούς νόμους της φυσικής και αυτό δημιουργεί αυθόρμητα την ύλη και την αντιύλη σε ίσα και αντίθετα ζεύγη και τελειώνει με επικράτηση της ύλης πάνω από την αντιύλη.



Η θάλασσα μοιάζει πολύ με αυτό το κβαντικό κενό. Τα σκάφη στην επιφάνεια της θάλασσας είναι τα πραγματικά σωματίδια. Τα κύματα είναι σαν "εικονικά" σωματίδια διακυμάνσεις γύρω από τη στάθμη της θάλασσας που βγαίνουν από τη θάλασσα και εξαφανίζονται ξανά. Μετρούμε την ανύψωση σε σχέση με τη μέση στάθμη της θάλασσας, την οποία ονομάζουμε ανύψωση μηδέν. Αλλά αυτός ο αριθμός είναι απλά μια σύμβαση. Το μόνο που μετράμε πραγματικά είναι οι διαφορές μεταξύ των υψών, οπότε ο απόλυτος αριθμός δεν έχει σημασία.

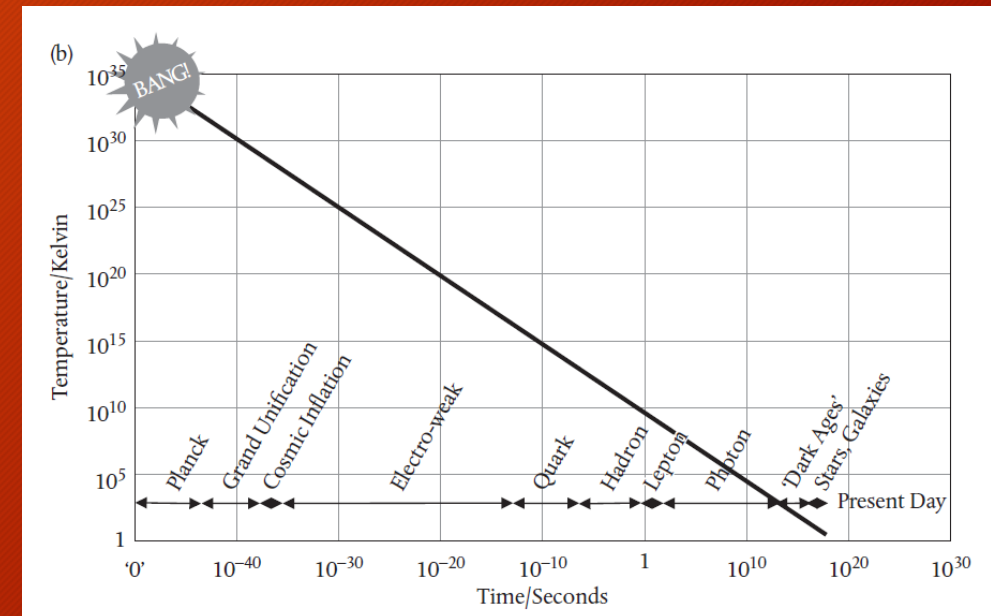
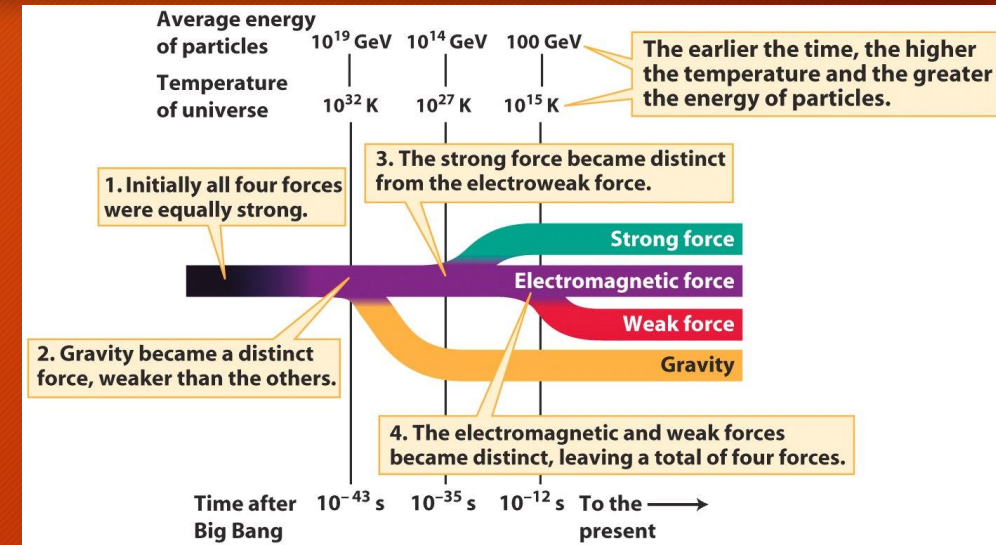
Η σύντομη ιστορία του πρώιμου σύμπαντος

- Το σύμπαν πέρασε διάφορες περιόδους μέχρι να φτάσει στην κατάσταση που είναι σήμερα και χρονολογικά διαιρείται σε εποχές.



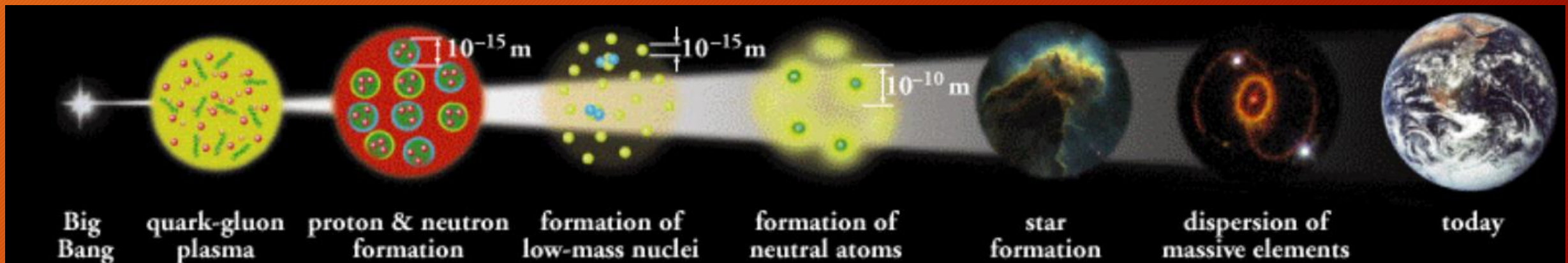
Εποχή Planck, Μεγάλης ενοποίησης

- Από την Χρονική στιγμή 0 έως τον χρόνο Planck ($E \geq 10^{15} \text{ GeV}$) δεν υπάρχει προς το παρόν μια θεωρία που να μπορεί να περιγράψει μαθηματικά το σύμπαν.
- Η πυκνότητα της ενέργειας, όσο και η καμπυλότητα του χώρου έτειναν προς το άπειρο. Αυτό σημαίνει ότι το Σύμπαν εξελισσόταν στα πλαίσια μιας σημειακής ιδιομορφίας μέσα από την οποία γεννήθηκε.
- Η ιστορία του σύμπαντος από την πλευρά της φυσικής ξεκινάει την χρονική στιγμή $t_p = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$ που ονομάζεται και χρόνος Planck. Η εποχή Πλανκ είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η φυσική κυριαρχείται από κβαντικά φαινόμενα και την κβαντική βαρύτητα.
- Ανάμεσα σε χρόνους $10^{-44} - 10^{-36} \text{ s}$ εικάζεται σύμφωνα με την μεγάλη ενοποιημένη θεωρία (GUT) ότι οι τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης: η Βαρυτική, η Ισχυρή Πυρηνική, η Ασθενής Πυρηνική και η Ηλεκτρομαγνητική, παρουσιάζονταν ενοποιημένες σε μία δύναμη.
 - Σε αυτούς τους χρόνους έννοιες όπως η μάζα το φορτίο και άλλα χαρακτηριστικά των quark δεν είχαν νόημα.
- Τη χρονική στιγμή $t = 5 \times 10^{-43}$ δευτερόλεπτα σύμφωνα με την μεγάλη ενοποιημένη θεωρία (GUT) σε μια διαδικασία που ονομάζεται αυθόρμητο σπάσιμο της συμμετρίας, η βαρύτητα αποχωρίζεται και αποτελεί ξεχωριστή δύναμη.
- Επομένως αυτή την εποχή έχουμε την βαρυτική δύναμη και την ηλεκτροσχυρή δύναμη.



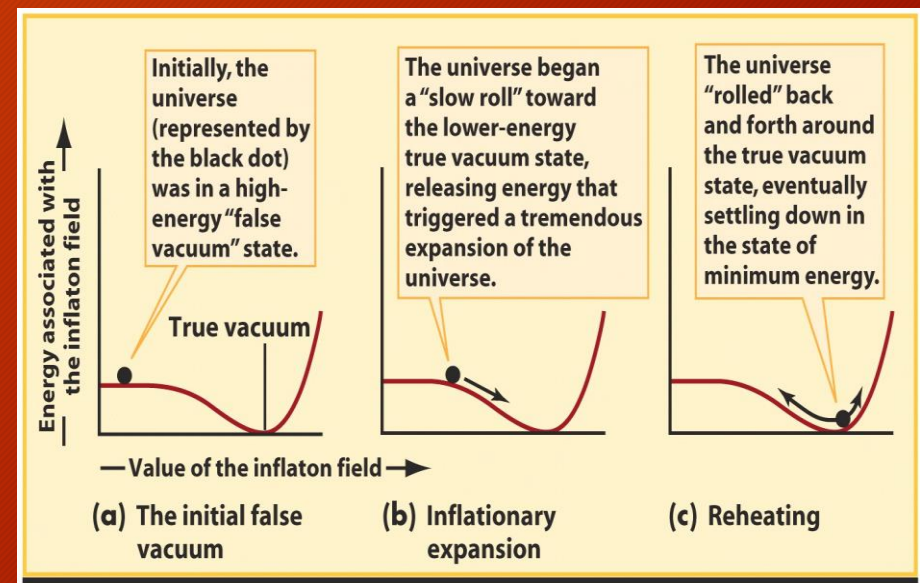
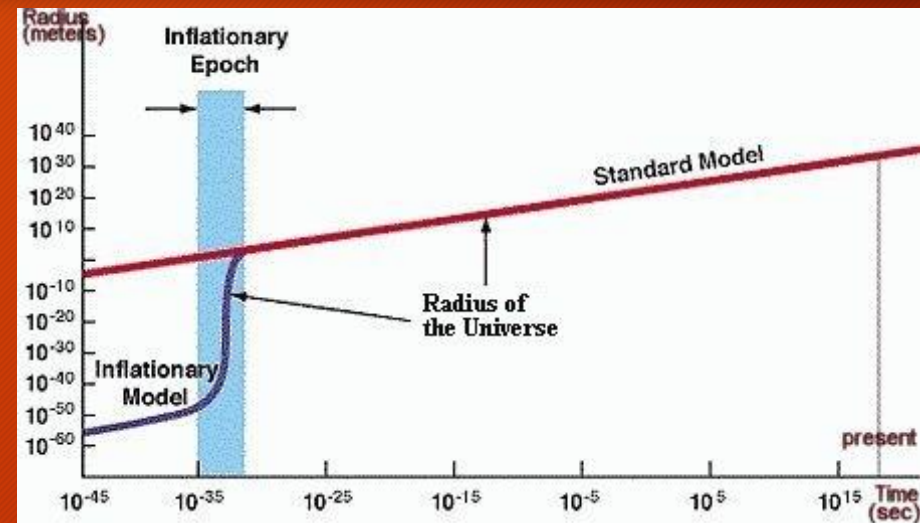
Εποχή των Quark

- Την χρονική στιγμή 10^{-32} s γίνεται ο διαχωρισμός της ισχυρής πυρηνικής η οποία θα συνδέσει αργότερα τα σωματίδια των ατομικών πυρήνων.
- Το γεγονός αυτό γέμισε το σύμπαν με ένα πυκνό και θερμό πλάσμα κουάρκ-γλουονίων.
- Έχουμε την ισχυρή πυρηνική και την ηλεκτρασθενή δύναμη η οποία αργότερα θα διαχωριστεί και θα μας δώσει την ηλεκτρομαγνητική και την ασθενή πυρηνική δύναμη.
- Η απελευθέρωση της ισχυρής πυρηνικής θεωρείται ότι αποτέλεσε την αιτία για μια μετάβαση φάσεως (phase transition) και την έναρξη μιας περιόδου εκθετικής διαστολής του σύμπαντος.
- Η φάση αυτή της πληθωριστικής διόγκωσης κράτησε 10^{-33} δευτερόλεπτα και μεγάλωσε το μέγεθος του σύμπαντος κατά 10^{26} φορές.



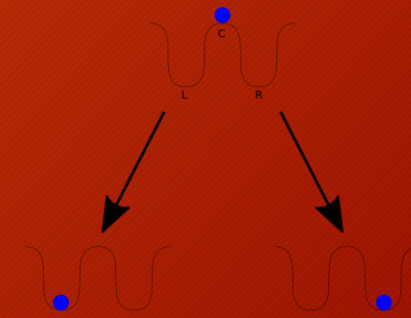
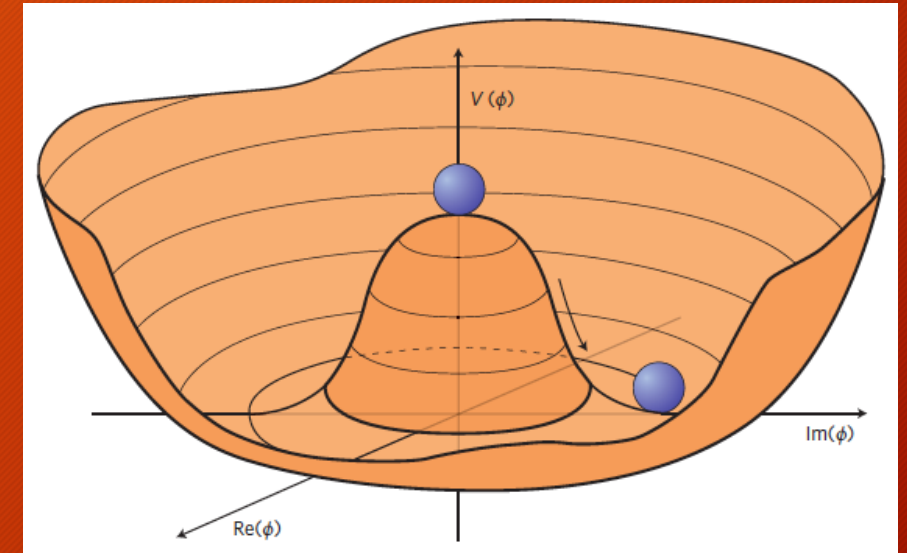
Κοσμικός πληθωρισμός

- Το Σύμπαν μας εμφανίζεται αρκετά ομοιογενές και ισότροπο σε μεγάλες κλίμακες με την θερμοκρασία υποβάθρου να είναι ίδια από όποια πλευρά του διαστήματος και να προέρχεται.
- Πως όμως εξηγείται αυτό αφού ξέρουμε ότι με τον ρυθμό εξάπλωσης που παρατηρούμε σήμερα θα έπρεπε να υπάρχουν τμήματα του σύμπαντος που δεν έχουν καθόλου επικοινωνήσει μεταξύ τους. Πως κατάφερε το σύμπαν μετά την μεγάλη έκρηξη να έρθει σε μια τέτοια κατάσταση ώστε τα τμήματά του να βρεθούν σε θερμοδυναμική ισορροπία.
- 1980 - Ο Alan Guth προτείνει το Πληθωριστικό Μοντέλο (Inflation), το οποίο προβλέπει ότι το σύμπαν ξεκίνησε στο πρώτο στάδιο με πολύ μικρότερο ρυθμό διαστολής έτσι ώστε τα τμήματα του σύμπαντος, πρόλαβαν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και να έρθουν σε μια θερμοδυναμική ισορροπία και στην συνέχεια με την δράση ενός βαθμωτού πεδίου η διαστολή του σύμπαντος επιταχύνθηκε εκθετικά με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός.
- Η εκθετική διαστολή, λύνει το πρόβλημα της ομοιομορφίας διότι παίρνει ένα κομμάτι του πρώιμου σύμπαντος αρκετά μικρό ώστε να έχει εξομαλυνθεί με τις εσωτερικές διαδικασίες και με την εκθετική διαστολή γίνεται τόσο μεγάλο όσο βλέπουμε σήμερα.
- Ταυτόχρονα ο πληθωρισμός ωθεί το σύμπαν όλο και πιο κοντά στην τέλεια επιπεδότητα καθώς η διαστολή συνεχίζεται.
- Κατά την διάρκεια του πληθωρισμού η παράμετρος πυκνότητας που θα δούμε παρακάτω οδηγήθηκε στην μονάδα και το σύμπαν στην επιπεδότητα.
- Το Πληθωριστικό Μοντέλο (Inflation) δίνει λύσεις
 - Στο λεγόμενο “Πρόβλημα Ορίζοντα” καθώς εάν δεν συνέβαινε, θα έπρεπε το σύμπαν να ξεκινήσει από ένα σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος,
 - Στο πρόβλημα της επιπεδότητας
 - Στην ανυπαρξία μαγνητικών μονοπόλων.



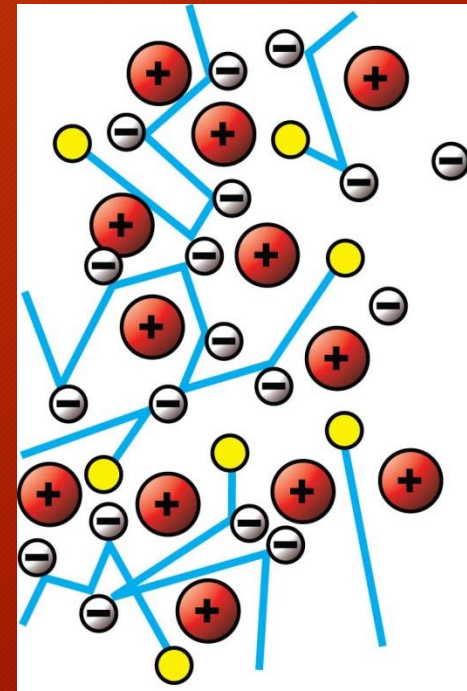
Βαρυογένεση, εποχή των αδρονίων

- Σε χρόνους μετά τα 10^{-12} s και ενώ το σύμπαν ψυχόταν η τελευταία συμμετρία έσπασε και μέσω του μηχανισμού Higgs και του αυθόρμητου σπασίματος της συμμετρίας τα στοιχειώδη σωματρία απέκτησαν μάζα ενώ ήταν άμαζα πριν σε υψηλότερες ενέργειες.
- Τα στοιχειώδη σωματίδια άρχιζαν να συμπεριφέρονται περίπου όπως ξέρουμε ότι συμπεριφέρονται και σήμερα.
- Αμέσως μετά σε χρόνους 10^{-11} έγινε η Βαρυογένεση κυρίως από τα συστατικά του πλάσματος κουάρκ-γλουονίων και σχηματίστηκαν τα υποατομικά σωματίδια δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια μαζί με τα αντισωματίδιά τους και άλλα σωματίδια.
- Ακολούθησε επομένως η εποχή των αδρονίων σε χρόνο 10^{-6} και θερμοκρασίες 10^{12} K σχηματίστηκαν κυρίως από την ίδια σούπα και τα πιόνια.



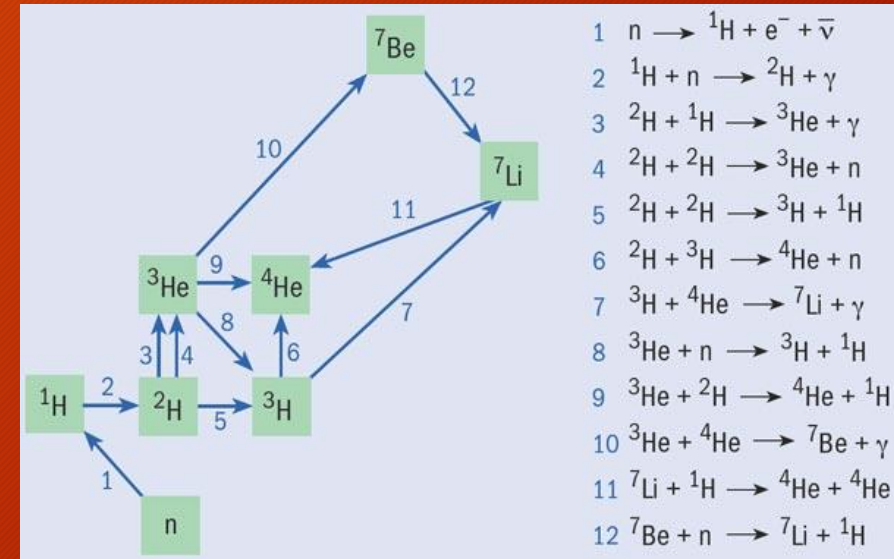
Εποχή των λεπτονίων-φωτονίων

- Σε χρόνους 1 έως 10 δευτερόλεπτα εμφανίστηκαν τα ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και τα νετρίνα μέσω των αντιδράσεων πχ.
- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- Η εποχή του φωτονίου ξεκίνησε αφού τα περισσότερα λεπτόνια και αντιλεπτόνια εξαυλώθηκαν στο τέλος της εποχής των λεπτονίων, περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά το Big Bang
- Σύμφωνα, λοιπόν, με την θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης, δέκα μόλις δευτερόλεπτο μετά την «εμφάνισή» του, το Σύμπαν ήταν μία υπέρθερμη σούπα πρωτονίων, νετρονίων, ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, φωτονίων, νετρίνων, με θερμοκρασία $10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$ τα οποία συγκρούονταν και μετασχηματιζόταν από το ένα στο άλλο.
- Τα φωτόνια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σκεδάζονταν συνεχώς απ' αυτά τα φορτισμένα σωματίδια και δεν μπορούσαν να διαφύγουν ελεύθερα στο Διάστημα, μεταφέροντας πληροφορίες απ' αυτή την αρχέγονη εποχή.
- Με άλλα λόγια, καθ' όλη την διάρκεια των πρώτων σταδίων της εξέλιξής του, το Σύμπαν ήταν αδιαφανές στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Σε θερμοκρασία 10 δισεκατομμυρίων βαθμών τα νετρίνα αποσυνδέθηκαν από τα υπόλοιπα σωματίδια και οι δυνάμεις ασθενούς αλληλεπίδρασης σταμάτησαν να μετατρέπουν τα νετρόνια σε πρωτόνια μέσω της αντίδρασης : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- Ο λόγος πρωτονίων προς νετρόνια σταθεροποιήθηκε σε μία τιμή $\sim 1/5$. (αυτή η αναλογία μεταβλήθηκε αργότερα από την διάσπαση των ελεύθερων νετρονίων σε μια τιμή $1/7.3$)
- Σε θερμοκρασία 3 δισεκατομμυρίων βαθμών η ακτινοβολία ήταν πλέον ανεπαρκής να δημιουργήσει ζεύγη ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ και η πυκνότητα των φωτονίων έγινε σταθερή (όπως αυτή των νετρίνων)



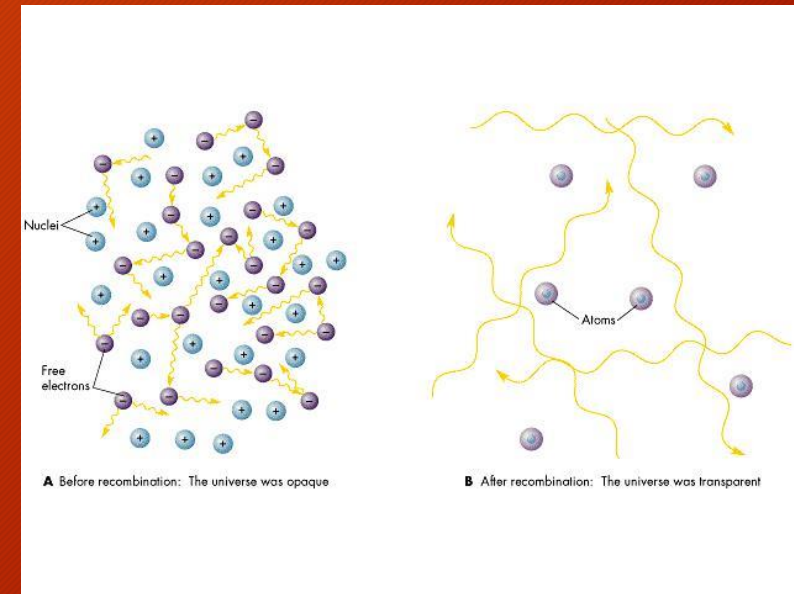
Εποχή της πυρηνοσύνθεσης

- Καθώς το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται ($E = 1\text{MeV}$ χρόνος περίπου $t = 1\text{s}$), τα νετρόνια άρχισαν να ενώνονται με τα πρωτόνια, σχηματίζοντας πυρήνες δευτερίου.
- Στη συνέχεια, το δευτέριο συντήχθηκε στο μεγαλύτερο μέρος του σε πυρήνες ηλίου, ενώ παράλληλα σχηματίστηκαν και ίχνη λιθίου.
- Αυτή η περίοδος της αρχέγονης πυρηνοσύνθεσης όπως ονομάζεται, ολοκληρώθηκε αμέσως μετά τον σχηματισμό λιθίου, αφού η επακόλουθη μείωση της θερμοκρασίας του Σύμπαντος εμπόδισε το σχηματισμό βαρύτερων πυρήνων οι οποίοι θα σχηματιστούν αρκετά αργότερα, στο εσωτερικό των άστρων.
- Μετά το πέρας της πυρηνοσύνθεσης, το Σύμπαν εξακολουθούσε να είναι τόσο θερμό, ώστε η ύλη που εμπεριείχε ήταν πλήρως ιονισμένη, δηλαδή αποτελούνταν από ελεύθερα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και ελαφρούς ατομικούς πυρήνες θετικά φορτισμένους σε κατάσταση πλάσματος.
- Σε χρόνο μόλις 200 δευτερολέπτων με αυτή τη διαδικασία περίπου το ένα τέταρτο των πρωτονίων μετατράπηκε σε πυρήνες ηλίου. Η σημερινή παρατηρούμενη αναλογία ηλίου με υδρογόνο είναι 3/10, με μία επιπλέον 5% αύξηση που οφείλεται στις αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης που συμβαίνουν στο εσωτερικό των αστέρων.
- Μετά το πέρας της πυρηνοσύνθεσης, το Σύμπαν εξακολουθούσε να είναι τόσο θερμό, ώστε η ύλη που εμπεριείχε ήταν πλήρως ιονισμένη, δηλαδή αποτελούνταν από ελεύθερα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και ελαφρούς ατομικούς πυρήνες θετικά φορτισμένους (πλάσμα).
- Ο συνολικός αριθμός των βαρυονίων που παρατηρούνται σήμερα στα αστέρια και στον ενδογαλαξιακό χώρο σχετίζεται με τον αριθμό των σωματιδίων που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια της πυρηνοσύνθεσης.



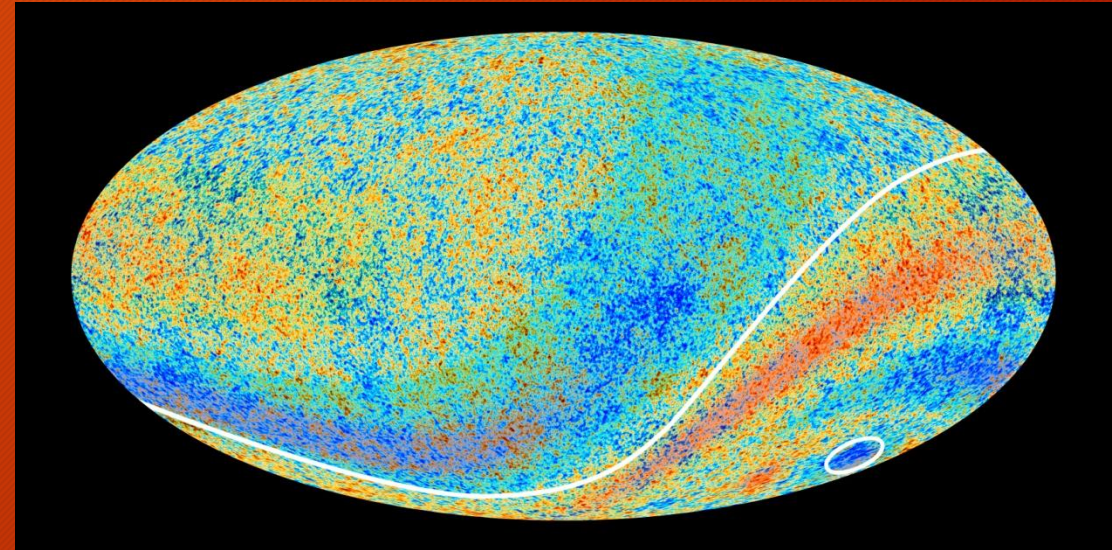
Εποχή της επανασύνδεσης

- Η κατανομή της ακτινοβολίας στο ζεστό πρώιμο σύμπαν ήταν κατανομή μέλανος σώματος, αλλά το αρχικό σύμπαν ήταν πολύ πυκνό και αδιαφανές στην ακτινοβολία αφού τα φωτόνια σκεδάζονταν διαδοχικά στο πυκνό αέριο των ηλεκτρονίων.
- Όταν πέρασαν 380.000 χρόνια μετά από τη μεγάλη έκρηξη, η θερμοκρασία του είχε μειωθεί περίπου στους 3000 K , γεγονός που επέτρεψε στα πρωτόνια να ενωθούν με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και να σχηματίσουν ουδέτερο υδρογόνο σε μια διαδικασία που ονομάζεται επανασύνδεση.
- Το σύμπαν εκείνη την εποχή κυριαρχείτο από την σκοτεινή ύλη
- Με τα ηλεκτρόνια να συλλαμβάνονται από τα άτομα, η πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων έγινε αρκετά χαμηλή ώστε η μέση ελεύθερη διαδρομή των φωτονίων έγινε πολύ μεγαλύτερη της τάξης μεγέθους του σύμπαντος και το φως ήταν ελεύθερο να διαδοθεί
- Το σύμπαν έγινε διαφανές και το πρώτο φως παρουσιάστηκε
- Από την εποχή της φωτοκρατίας μέχρι σήμερα το σύμπαν ήταν χίλιες φορές μικρότερο και είχε θερμοκρασία χίλιες φορές μεγαλύτερη.



Κοσμική Ακτινοβολία Υποβάθρου CMB

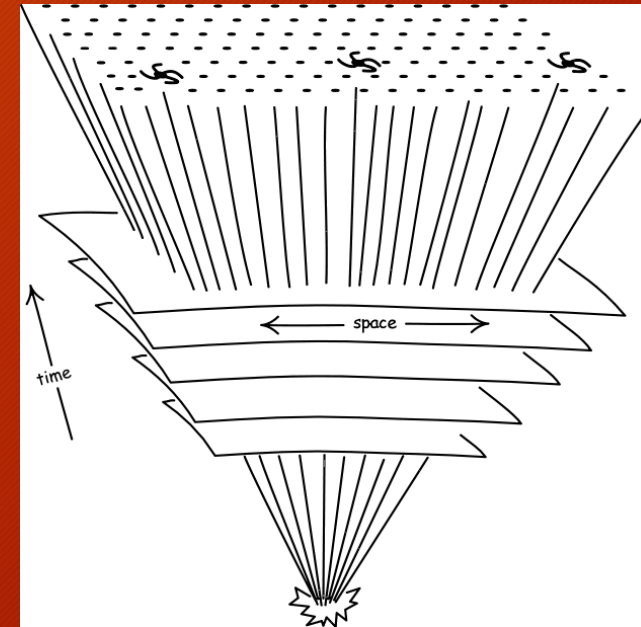
- Τα φωτόνια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που «απελευθερώθηκαν» ακριβώς τότε, έχουν φτάσει στις μέρες μας, και είναι γνωστά ως Κοσμική Ακτινοβολία Υποβάθρου CMB και αποτελούν το πλέον αρχέγονο φως που είναι δυνατόν να ανιχνεύσουμε στο Σύμπαν.
- Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου είναι και ένα τείχος, ένα φράγμα στον χρόνο, πέρα απ' το οποίο είναι αδύνατο να «δούμε» με τα συμβατικά τηλεσκόπια που ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ανεξάρτητα του πόσο ισχυρά είναι.
- Με τα τηλεσκόπιά μας αυτό που μπορούμε να «δούμε» είναι το πολύ μέχρι την εποχή που η ηλικία του Σύμπαντος ήταν περίπου 380.000 έτη
- 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 ή όπως αλλιώς αποκαλούνται ανισotropίες 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.



Τα βασικά της Κοσμολογίας- η μετρική του σύμπαντος

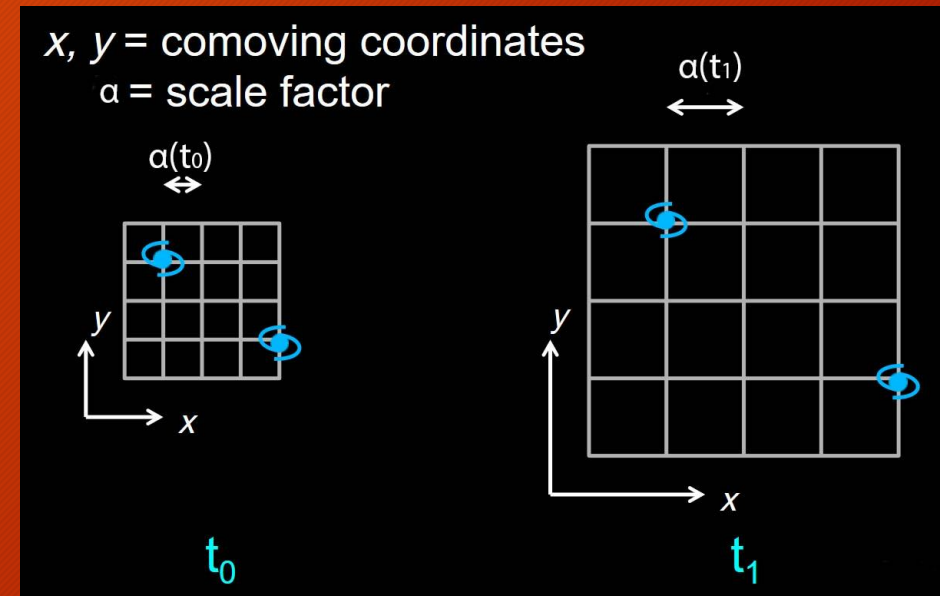
- Το καθιερωμένο πρότυπο της κοσμολογίας έχει κτιστεί πάνω στην κοσμολογική αρχή της συμμετρίας που προϋποθέτει ότι το σύμπαν σε μεγάλες κλίμακες είναι ομογενές και ισοτροπικό.
- Ένα τέτοιο σύμπαν μπορεί να περιγραφεί από την μετρική Friedman-Robertson-Walker (FRW) η οποία περιγράφει ομογενείς και ισοτροπικούς χώρους και δίνει την χωροχρονική απόσταση μεταξύ δύο γεγονότων σε ένα διαστελλόμενο σύμπαν.

- $ds^2 = c^2 dt^2 - \alpha^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right]$
- Όπου (r, θ, φ, t) είναι συνκινούμενες συντεταγμένες που κινούνται με την διαστολή του σύμπαντος και δεν αλλάζουν με τον χρόνο.
- k είναι η χωρική καμπυλότητα που έχει τις τιμές 0 ή ± 1 .
- Η συντεταγμένη του χρόνου t καλείται κοσμολογικός χρόνος (proper time)



Ο παράγοντας κλίμακας

- Το σύμπαν διαστέλλεται και επομένως χρειαζόμαστε ένα μέγεθος για να περιγράψει την χρονική εξέλιξη του μεγέθους του σύμπαντος εξαιτίας της διαστολής.
- Παράγοντας κλίμακας (scale factor) $\alpha(t)$
- Είναι συνάρτηση του χρόνου με εξ ορισμού $\alpha(t_0) = 1$.
- Αν R_0 είναι η απόσταση ενός σημείου του χώρου από εμάς κάποια χρονική στιγμή $t = t_0$ την οποία διαλέγουμε να είναι σήμερα, η απόσταση $R(t)$ κάθε άλλη χρονική στιγμή t θα είναι
 - $R(t) = \alpha(t)R_0$
- Είναι μια κρίσιμη ποσότητα που μετράει το γενικό ρυθμό επέκτασης του σύμπαντος.
- Για παράδειγμα, εάν μεταξύ των χρόνων t_1 και t_2 ο συντελεστής κλίμακας διπλασιάζεται, αυτό μας λέει ότι το σύμπαν έχει επεκταθεί σε μέγεθος κατά έναν παράγοντα επί δύο.



Εξισώσεις Friedman

- Οι εξισώσεις Friedman είναι ανάλογες της εξίσωσης κίνησης ενός σώματος και περιγράφουν την χρονική εξέλιξη του σύμπαντος με βάση το ενεργειακό του περιεχόμενο.
- $$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{r_0^2 a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$
- Η αναλογία ενέργειας/ύλης του σύμπαντος άλλαζε από εποχή σε εποχή και σε γενικές γραμμές το σύμπαν προσομοιάζεται με ένα ιδανικό ρευστού
 - Η επιτάχυνση του σύμπαντος μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της βαρύτητας που εξαρτάται από την πυκνότητα ενέργειας ρ και της πίεσης p του ρευστού καθώς επίσης από την κοσμολογική σταθερά Λ
- Στην εποχή της υλοκρατίας το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται, με επακόλουθο την ελάττωση της πυκνότητας και της θερμοκρασίας του.
- Η βαρύτητα άρχισε να επιβραδύνει τη διαστολή.
- Περιέχει ένα όρο με την βαρύτητα με αρνητικό πρόσημο διότι θα επιβραδύνει την διαστολή, και ένα όρο με θετικό πρόσημο ο οποίος θα ενισχύει την επιτάχυνση. Ο όρος της βαρύτητας περιλαμβάνει την πυκνότητα (ρ) και πίεση (p) όλης της ύλης και της ενέργειας που προέρχεται από την θεωρία ρευστών.
- Η κοσμολογική σταθερά Λ προτάθηκε από τον Άλμπερτ Αϊνστάιν ως μια τροποποίηση της αρχικής του θεωρίας της γενικής σχετικότητας ώστε να επιτύχει ένα στατικό σύμπαν. Η ανακάλυψη της επιτάχυνσης της κοσμικής διαστολής έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον για αυτήν. Η κοσμολογική σταθερά έχει την ίδια επίδραση που θα είχε μια ενδογενής ενεργειακή πυκνότητα του κενού και αποδίδεται στην σκοτεινή ενέργεια, που είναι ένα υποθετικό είδος ενέργειας που εκτείνεται παντού στο σύμπαν και τείνει να επιταχύνει τη διαστολή του.
- Ο ρυθμός διαστολής του σύμπαντος για μια χρονική στιγμή t εκφράζεται από την παράμετρο Hubble $H(t)$ η οποία αλλάζει με τον χρόνο
- $$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$
- Η παρούσα τιμή H συμβολίζεται με H_0 και είναι
- $$H_0 = 67.11 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

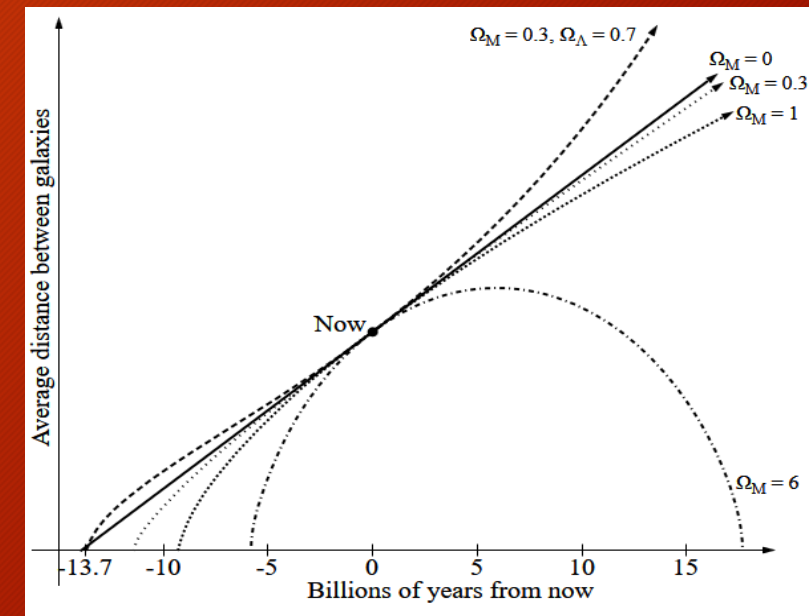
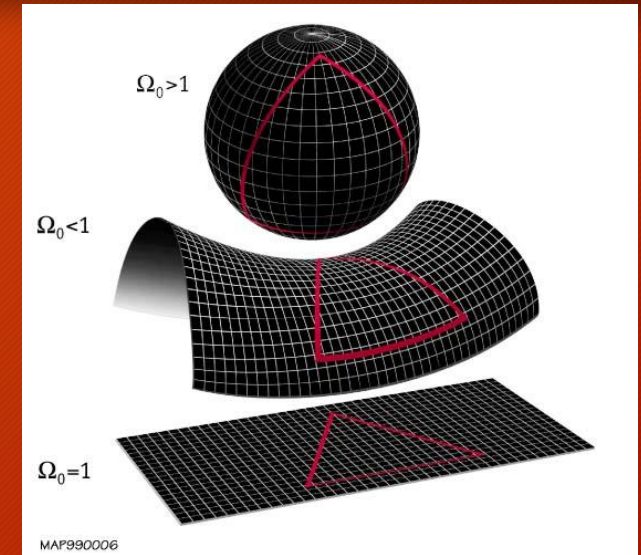
The diagram illustrates the Friedmann acceleration equation:
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$
 The left side is labeled "acceleration". The first term on the right, $-\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$, is enclosed in a green box and labeled "gravity". A green arrow points from this box to the text "slows down expansion". The second term, $+\frac{\Lambda}{3}$, is enclosed in a purple box and labeled "cosmological constant". A purple arrow points from this box to the text "speeds up expansion".

Κρίσιμη πυκνότητα-Παράμετρος πυκνότητας

- Για δεδομένη τιμή του H υπάρχει μια τιμή της πυκνότητας ρ με την οποία η γεωμετρία του σύμπαντος γίνεται επίπεδη ($k = 0$) , αυτή είναι η κρίσιμη πυκνότητα ρ_c
- Η κρίσιμη πυκνότητα αλλάζει με τον χρόνο αφού και η $H(t)$ αλλάζει.
- $\rho_c(t_0) = 1.88h^2 \times 10^{-26} \text{ kgr m}^{-3}$
- Η κρίσιμη πυκνότητα συνδέεται με την κρίσιμη ενέργεια $\varepsilon_c(t) = \rho_c(t)c^2$
- Ορίζουμε ως παράμετρο πυκνότητας $\Omega(t)$ το πηλίκο της πραγματικής πυκνότητας προς την κρίσιμη
- $\Omega(t) = \frac{\rho(t)}{\rho_c(t)}$
- Η παράμετρος πυκνότητας Ω_Λ αναφέρεται στην κοσμολογική σταθερά Λ και αποδίδεται στην σκοτεινή ενέργεια.
- $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}$
- Παρατηρούμε ότι αν και η Λ είναι σταθερά η Ω_Λ δεν είναι αφού η H δεν είναι σταθερά στο χρόνο, έτσι λοιπόν ανάλογα με τις τιμές της καμπυλότητας Ω και του παράγοντας πυκνότητας σύμπαντος θα έχουμε και διαφορετική γεωμετρία και διαφορετική μοίρα για το σύμπαν.

Η εξέλιξη του σύμπαντος

- η εξέλιξη του σύμπαντος καθορίζεται, από την ορμή της διαστολής και την έλξη της βαρύτητας. Ο τρέχων ρυθμός διαστολής μετράται από τη σταθερά *Hubble*, ενώ η δύναμη της βαρύτητας εξαρτάται από την πυκνότητα και την πίεση της ύλης στο σύμπαν, που χαρακτηρίζεται από τιμές των παραμέτρων πυκνότητας (Ω_M για ύλη και Ω_Λ για σκοτεινή ενέργεια).
- $\frac{kc^2}{H(t)^2 r_0^2 a(t)^2} = \Omega + \Omega_\Lambda - 1$ Με ποιοτική διερεύνηση προκύπτει ότι,
- $k > 0 \Rightarrow \Omega + \Omega_\Lambda - 1 > 0 \Rightarrow \Omega_0 = \Omega + \Omega_\Lambda > 1$
 - Στην περίπτωση αυτή έχουμε γεωμετρία **κλειστού σύμπαντος** όπως η επιφάνεια μιας σφαίρας. Σε ένα κλειστό σύμπαν η βαρύτητα επικρατεί έναντι της σκοτεινής ενέργειας και σταματά τελικά την διαστολή του σύμπαντος, ώστε τελικά αρχίζει να συστέλλεται μέχρι ότου όλη η ύλη στο σύμπαν καταρρέει σε ένα σημείο, η τελική μοναδικότητα ονομάζεται το "Big Crunch", το αντίθετο από το Big Bang.
 - Ένα "κλειστό σύμπαν" με $\Omega_M > 1$ και $\Omega_\Lambda = 0$ καταρρέει σε ένα σημείο ("Big Crunch") και είναι πολύ νεότερο από την ηλικία του *Hubble* ($\Omega_M = 6$ στο σχήμα).
- $k < 0 \Rightarrow \Omega + \Omega_\Lambda - 1 < 0 \Rightarrow 0 < \Omega_0 = \Omega + \Omega_\Lambda < 1$
 - Στην περίπτωση αυτή έχουμε γεωμετρία **ανοικτού υπερβολοειδούς** σύμπαντος (προσομοιάζει με κυρτή επιφάνεια της σέλας). Το σύμπαν θα διαστέλλεται για πάντα, με τη την σκοτεινή ενέργεια να επιταχύνει τον ρυθμό διαστολής του σύμπαντος και τη βαρύτητα μόλις να επιβραδύνει. Η τελική μοίρα ενός ανοικτού σύμπαντος είναι είτε καθολικός θερμικός θάνατος, το "Big Freeze", ή το "Big Rip", όπου η επιτάχυνση που προκαλείται από τη σκοτεινή ενέργεια γίνεται τελικά τόσο ισχυρή που καταβάλλει πλήρως τα αποτελέσματα της βαρυτικής.
 - Ένα "ανοικτό σύμπαν" με $\Omega_M \leq 1$ και $\Omega_\Lambda = 0$ επεκτείνεται για πάντα και έχει μια ηλικία που είναι πιο κοντά στην ηλικία του *Hubble*
- $k = 0 \Rightarrow \Omega + \Omega_\Lambda - 1 = 0 \Rightarrow \Omega_0 = \Omega + \Omega_\Lambda = 1$
 - Στην περίπτωση αυτή έχουμε γεωμετρία **επίπεδου ευκλείδειου** σύμπαντος. Ένα επίπεδο σύμπαν θα διαστέλλεται για πάντα, αλλά με ρυθμό συνεχώς επιβραδυνόμενο, με ρυθμό διαστολής που ασυμπτωτικά προσεγγίζει το μηδέν. Η τελευταία μοίρα του σύμπαντος είναι το ίδιο με ένα ανοικτό σύμπαν.
 - Ένα σύμπαν με $\Omega_M = 0.3$ και $\Omega_\Lambda = 0.7$ είναι πολύ κοντά στο παρατηρούμενο δικό μας σύμπαν και έχει ακριβώς την υπολογιζόμενη ηλικία.
- Παρατηρούμε από την σύγκριση των τιμών Ω_Λ, Ω ότι η διαστολή του σύμπαντος την σημερινή εποχή κυριαρχείται από την κοσμολογική σταθερά αλλά θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στο πρόσφατο παρελθόν κυριαρχείτο από την μη σχετικιστική ύλη ενώ πριν από αυτή από την ακτινοβολία.



Αναφορές

- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2014). An introduction to modern astrophysics. Harlow: Pearson.
- Liddle, A. (2015). An Introduction to Modern Cosmology, 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Ryden, B. S. (2017). Introduction to cosmology. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- <https://medium.com/starts-with-a-bang/how-did-the-matter-in-our-universe-arise-from-nothing-2975cc737f66>
- <http://www.physics.org/article-questions.asp?id=121>
- <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-12440.pdf>
- <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/quantum-fluctuations-and-their-energy/>
- <http://backreaction.blogspot.com/2015/03/what-physics-says-about-vacuum-visit-to.html>
- <http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/>
- <http://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/LineweaverDavisSciAm.pdf>

Ευχαριστώ για την
προσοχή σας

Γιώργος Νικολιδάκης