

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: Βασικές Αρχές

## 1.1 Εισαγωγή

Η Κοσμολογία είναι η επιστήμη που μελετά τη δομή και δυναμική εξέλιξη του σύμπαντος στον χώρο και στον χρόνο, σε μεγάλη κλίμακα. Η επιθυμία του ανθρώπου να εξερευνήσει τις καταβολές του σύμπαντος είναι έμφυτη, καθώς το ερώτημα αυτό συνδέεται αναπόφευκτα με το ερώτημα της προέλευσης του ίδιου του ανθρώπου. Για τον λόγο αυτό, κοσμολογικά μοντέλα διατυπώθηκαν από τον 17ο αιώνα, πολύ σύντομα δηλαδή μετά την καθιέρωση της σύγχρονης επιστημονικής έρευνας του 16ου και 17ου αιώνα. Όπως θα δούμε, τα πρώτα αυτά μοντέλα απέιχαν πολύ από το να περιγράψουν το σύμπαν όπως το αντιλαμβανόμαστε σήμερα, παρ' όλα αυτά παρείχαν το πλαίσιο για την διατύπωση ιδεών αλλά και ερωτημάτων σχετικά με τη δομή και τα χαρακτηριστικά του σύμπαντος.

Ο ρόλος της βαρύτητας στην Κοσμολογία είναι κεντρικός, καθώς οι βαρυτικές δυνάμεις είναι αυτές που, κατά κύριο λόγο, διαμορφώνουν τη δομή και καθορίζουν την εξέλιξη του σύμπαντος. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που τα πρώτα 'ρεαλιστικά' κοσμολογικά μοντέλα διατυπώθηκαν μετά την ανακάλυψη της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας από τον A. Einstein στις αρχές του 20ου αιώνα. Μέχρι όμως και τα τέλη της δεκαετίας του '50, η Κοσμολογία δεν αποτελούσε επιστήμη "στην οποία, ένας επιστήμονας που σεβόταν τον εαυτό του, άξιζε να αφιερώσει τον χρόνο του" (S. Weinberg, "Τα πρώτα τρία λεπτά"). Ο βασικός λόγος για αυτό ήταν η έλλειψη κοσμολογικών παρατηρήσεων αλλά και η σχεδόν παντελής απουσία σύνδεσης των θεωρητικών μοντέλων της Κοσμολογίας με τις υπάρχουσες θεωρίες της Θεωρητικής και Σωματιδιακής Φυσικής.

Η κατάσταση αυτή όμως άλλαξε ραγδαία τη δεκαετία του '80, όταν σημαντική πρόοδος σημειώθηκε στο δεύτερο από τα δύο αυτά 'μέτωπα' της Κοσμολογίας. Τη δεκαετία αυτή, πολλές ιδέες και μοντέλα της Σωματιδιακής Φυσικής ενσωματώθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην Κοσμολογία. Η έλλειψη όμως κοσμολογικών παρατηρήσεων έκανε αδύνατη την αξιολόγησή τους. Η πραγματική 'επανάσταση' στον χώρο της Κοσμολογίας επήλθε τη δεκαετία του '90, όταν οι πρώτες πραγματικές κοσμολογικές παρατηρήσεις έκαναν την εμφάνισή τους. Η 'επανάσταση' αυτή συνεχίζεται και σήμερα με έναν συνεχώς αυξανόμενο όγκο κοσμολογικών παρατηρήσεων, που αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο στο μέλλον. Οι κοσμολογικές αυτές παρατηρήσεις έφτασαν στο σημείο να επιβάλλουν περιορισμούς στα θεωρητικά μοντέλα ή ακόμα και να τα αποκλείουν ως μη ρεαλιστικά. Δείγμα της αξιοπιστίας της επιστήμης της Κοσμολογίας σήμερα αποτελεί και το γεγονός ότι οι προβλέψεις ή οι παρατηρήσεις της χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως 'οδηγός' για μοντέλα της Σωματιδιακής Φυσικής.

## 1.2 Το παράδοξο του Olbers και η Κοσμολογική Αρχή

Γυρίζοντας για λίγο πίσω στον 17ο και 18ο αιώνα, ας μελετήσουμε το κοσμολογικό μοντέλο εκείνης της εποχής. Οι τρεις βασικές παραδοχές για το σύμπαν την εποχή εκείνη ήταν: (i) το σύμπαν είναι στατικό (δεν εξελίσσεται στον χρόνο και επομένως δεν αλλάζει με τον χρόνο), (ii) υπάρχει από πάντα και θα υπάρχει για πάντα, και (iii) η ύλη είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη μέσα σε αυτό. Η εικόνα αυτή όμως για το σύμπαν οδήγησε στο παράδοξο του Olbers (1826), το οποίο συνοψίζεται στην απλή ερώτηση: "γιατί ο ουρανός είναι σκοτεινός την νύχτα;".

Εάν δεχτούμε ότι η ύλη είναι όντως ομοιόμορφα κατανεμημένη στον χώρο, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το σύμπαν, γύρω από ένα τυχαίο σημείο  $P$ , αποτελείται από διαδοχικά σφαιρικά κελύφη που εκτείνονται έως το άπειρο. Μπορούμε επίσης να υποθέσουμε ότι ο μέσος αριθμός πηγών φωτός  $N$  που περιέχονται στη μονάδα του όγκου είναι σταθερός, και ότι η ακτινοβολία  $L$  που εκπέμπεται από κάθε μία από τις πηγές αυτές είναι αμετάβλητη. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σφαιρικό κέλυφος πάχους  $dr$  και ακτίνας  $r$  είναι:  $LNdV = LN 4\pi r^2 dr$ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ένταση ακτινοβολίας στο σημείο  $P$  από το συγκεκριμένο κέλυφος να δίνεται από την έκφραση:

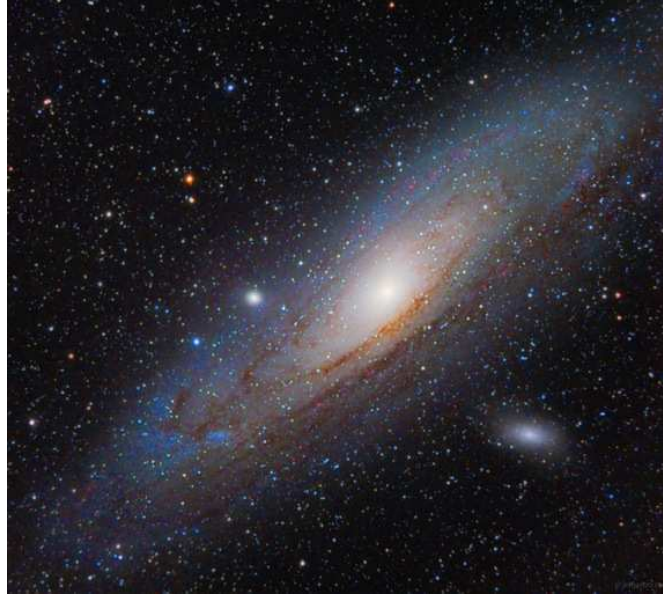
$$I = \frac{LN 4\pi r^2 dr}{4\pi r^2} = LN dr . \quad (1.1)$$

Η συνολική ένταση ακτινοβολίας που δέχεται το σημείο  $P$  προκύπτει ολοκληρώνοντας την παραπάνω έκφραση, ως προς  $r$ , στο διάστημα  $(0, \infty)$ . Το αποτέλεσμα προκύπτει να είναι άπειρο! Ένα λογικό ίσως αντι-επιχείρημα είναι ότι η παραπάνω ανάλυση δεν είναι τελείως ρεαλιστική, μια που η μεσοαστρική ύλη που υπάρχει ανάμεσα στο σημείο  $P$  και το σφαιρικό

κέλυφος απορροφά το φώς που προέρχεται από αυτό και το εμποδίζει να φτάσει στο σημείο  $P$ . Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως το πρόβλημα παραμένει: οι υποθέσεις της στατικότητας και της αιώνιας ύπαρξης του σύμπαντος, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μεσοαστρική ύλη βρίσκεται ήδη σε θερμική ισορροπία με τις πηγές φωτός και ό,τι απορροφάται από αυτή ξαναεκπέμπεται. Η ακτινοβολία στο σημείο  $P$  επομένως θα πρέπει να είναι η ίδια με την ακτινοβολία στην επιφάνεια των αστερών! Γιατί όμως τότε ο ουρανός τη νύχτα είναι σκοτεινός;

Λόγω της υποτιθέμενης ομοιόμορφης κατανομής ύλης στο σύμπαν, το παραπάνω παράδοξο παραμένει ανεξάρτητα από την ακριβή θέση του σημείου  $P$ . Μήπως αυτή ήταν η εσφαλμένη παραδοχή του πρωταρχικού κοσμολογικού μοντέλου; Μήπως υπάρχει προτιμητέο σημείο στο σύμπαν, το οποίο και κατέχουμε; Οι αρχαίοι Έλληνες (με ελάχιστες εξαιρέσεις) πίστευαν ακράδαντα ότι η Γη βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος. Ο Πτολεμαίος ανέπτυξε ένα ιδιαίτερα περίπλοκο σύστημα τροχιών, τους Επίκυκλους, για να εξηγήσει την, καμιά φορά αμφίδρομη, κίνηση των πλανητών. Τον 15ο αιώνα ο Κοπέρνικος αναβίωσε την ιδέα του Αρίσταρχου και τοποθέτησε τον Ήλιο στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος. Και πάλι όμως, κατά τον Κοπέρνικο, ο Ήλιος παρέμενε το κέντρο του σύμπαντος. Η παρατήρηση της θέσης άλλων αστερών και η διαπίστωση ότι ο Ήλιος μαζί με το πλανητικό σύστημα αποτελεί μέρος μιας, τεραστίων διαστάσεων, δισκοειδούς συγκέντρωσης αστερών, του Γαλαξία μας, τάραξε για λίγο τα νερά της ανθρωποκεντρικής φιλοσοφίας. Ο Ήλιος όμως τοποθετήθηκε και πάλι στο κέντρο του Γαλαξία, και μόνο στις αρχές του 20ου αιώνα διαπιστώθηκε από τον H. Shapley ότι στην πραγματικότητα ο Ήλιος βρίσκεται μακριά από το κέντρο του Γαλαξία μας σε απόσταση  $2/3$  της ακτίνας του. Ο τελευταίος 'πύργος' της ανθρωποκεντρικής θεωρίας, η αντίληψη ότι ο Γαλαξίας μας βρίσκεται με τη σειρά του στο κέντρο του σύμπαντος, κατέρρευσε το 1952 όταν ο W. Baade απέδειξε ότι ο Γαλαξίας μας είναι ένας μόνο από τους αμέτρητους που υπάρχουν στο σύμπαν, και ότι η φαινομενικά κεντρική θέση του είναι απατηλή. Με αυτό έγινε πλέον φανερό ότι δεν κατέχουμε προτιμητέα θέση στο σύμπαν, και, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, τέτοιο σημείο δεν υπάρχει.

Πόσο ομοιόμορφη πραγματικά είναι όμως η κατανομή ύλης στο σύμπαν; Μια ματιά στον νυχτερινό ουρανό αρκεί για να αποκαλύψει την ύπαρξη αστερών αλλά και περιοχών γεμάτες με χαμηλής πυκνότητας μεσοαστρική ύλη. Με την χρήση τηλεσκοπίου, μπορούμε να ξεχωρίσουμε γαλαξίες και μεσογαλαξιακές περιοχές. Άλλωστε, δύο σημαντικές, για την Κοσμολογία και Αστροφυσική, μονάδες μέτρησης μήκους, η αστρονομική μονάδα  $AU = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ , και το parsec  $pc = 3.086 \times 10^{16} \text{ m}$ , αντιστοιχούν στην απόσταση Γης-Ηλίου και Ηλίου-πλησιέστερου αστερά, οι οποίες κάθε άλλο παρά μικρές είναι. Πριν αποφανθούμε όμως για την ομοιομορφία της ύλης στο σύμπαν, ας σταθούμε για λίγο στην κατανομή των πηγών του ορατού φωτός. Οι πρώτες σημαντικές συγκεντρώσεις ύλης που συναντούμε στο σύμπαν είναι οι αστέρες και τα πλανητικά τους συστήματα. Ο Ήλιος είναι ένας τυπικός αστέρας με



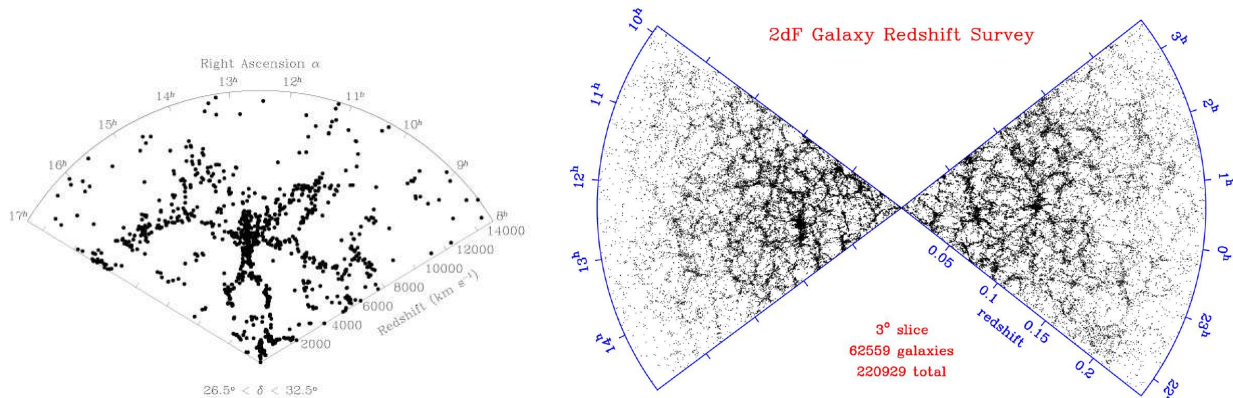
Σχήμα 1: Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας, ο μεγαλύτερος κοντινός μας γαλαξίας σε απόσταση 770 Kpc, ένα βαρυτικό σύστημα με  $10^{11}$  αστέρες, αέρια και σκόνη.

μάζα  $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$  kgr. Οι αστέρες με την σειρά τους σχηματίζουν τους γαλαξίες (βλέπε Σχήμα 1), δέσμιες καταστάσεις ύλης, που εκτός από αστέρες περιέχουν αέρια και σκόνη. Ένας τυπικός γαλαξίας, όπως ο δικός μας, περιέχει κατά μέσο όρο  $10^{11}$  αστέρες και ολική μάζα  $10^{12} M_{\odot}$ , ενώ σε ολόκληρο το παρατηρήσιμο σύμπαν υπάρχουν περίπου  $10^{11}$  γαλαξίες. Εάν η μάζα που αντιστοιχεί στο σύνολο των γαλαξιών του σύμπαντος ήταν πραγματικά ομοιόμορφα κατανεμημένη, η μέση πυκνότητα ύλης τη σημερινή εποχή θα ήταν

$$\rho \equiv \frac{M}{V} \simeq \frac{10^{11} \times 10^{12} \times 10^{30} \text{ kgr}}{4\pi/3 (2.5 \times 10^{26})^3 \text{ m}^3} \sim 10^{-30} \text{ gr/cm}^3, \quad (1.2)$$

το οποίο ισοδυναμεί με ένα πρωτόνιο ανά κυβικό μέτρο. Ο Γαλαξίας μας έχει ακτίνα 12.5 kpc ( $1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$ ) και πάχος 0.3 kpc, ενώ το ηλιακό μας σύστημα βρίσκεται σε απόσταση 8 περίπου kpc από το κέντρο του δίσκου. Κάθε Γαλαξίας, εκτός από τον κεντρικό δίσκο, περιέχει και ένα μεγάλο αριθμό σφαιρικών σμηνών· τα σμήνη αυτά αριθμούν μέχρι και  $10^6$  αστέρες και βρίσκονται κατανεμημένα, με σχεδόν σφαιρική συμμετρία, και στις δύο πλευρές του δίσκου σε αποστάσεις από 5 έως 30 kpc. Όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, παρατηρήσεις τόσο της ύλης του δίσκου όσο και αυτής που εμπεριέχεται στα σφαιρικά σμήνη των γαλαξιών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά κοσμολογικά δεδομένα.

Οι γαλαξίες με τη σειρά τους σχηματίζουν ομάδες, τα λεγόμενα clusters. Σε μικρή κλίμακα, συναντούμε μικρές ομάδες που περιέχουν μερικές δεκάδες το πολύ γαλαξίες και καταλαμβάνουν χώρο μερικών κυβικών Mpc ( $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$ ). Υπάρχουν όμως και οι



Σχήμα 2: (α) Χάρτης γαλαξιών, σε περιοχή του ορατού σύμπαντος ακτίνας 200 Mpc, σύμφωνα με το Center for Astrophysics τη δεκαετία του '80. (β) Παρόμοιος χάρτης του 2001, κλίμακας 1000 Mpc, από το 2dF Galaxy Redshift Survey.

μεγάλες ομάδες (super-clusters) που αριθμούν δεκάδες χιλιάδες γαλαξίες και έχουν ακτίνα έως και 100 Mpc. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας ομάδας είναι η ομάδα Coma που φαίνεται στο κεντρικό μέρος της κατανομής γαλαξιών του Σχήματος 2.α. Το σχήμα αυτό δίνει ένα 'χάρτη' γαλαξιών όπως προέκυψε από τη μελέτη της χωρικής κατανομής των γαλαξιών, σε μέρος του ορατού σύμπαντος, από το Center for Astrophysics (CfA) τη δεκαετία του '80. Σημερινές παρατηρήσεις από το 2dF Galaxy Redshift Survey και το Sloan Digital Sky Survey έχουν βελτιώσει κατά πολύ τον χάρτη αυτό και μια μοντέρνα έκδοσή του φαίνεται στο Σχήμα 2.β. Από τον χάρτη αυτόν γίνεται φανερό ότι η κατανομή των γαλαξιών στο σύμπαν δεν είναι τελείως ομοιόμορφη: μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε περιοχές με πυκνή συγκεντρωση γαλαξιών που σχηματίζουν 'ίνες' (filaments) και 'κόμπους' (knots) αλλά και περιοχές με πολύ χαμηλή συγκεντρωση, τα λεγόμενα 'κενά' (voids) με μέγεθος μέχρι και 50 Mpc.

Αυτοί όμως οι σχηματισμοί φαίνεται να είναι και οι μεγαλύτεροι που υπάρχουν στο σύμπαν. Οποιαδήποτε παρατήρηση σε κλίμακα μήκους μεγαλύτερη των μερικών εκατοντάδων Mpc παρουσιάζει το σύμπαν ομοιογενές και ισότροπο: εάν ξεκινήσουμε από οποιοδήποτε σημείο του σύμπαντος και κινηθούμε προς ένα άλλο ακολουθώντας οποιαδήποτε κατεύθυνση μέσα στον τριδιάστατο χώρο, η εικόνα που θα παρουσιάζει το σύμπαν στο καινούριο αυτό σημείο δεν θα διαφέρει σε τίποτα από αυτή στο αρχικό. Αν και η κατανομή ύλης στο σύμπαν δεν είναι ομοιόμορφη, σε μεγάλη κλίμακα, το σύμπαν είναι και ομοιογενές και ισότροπο: δεν υπάρχουν ούτε προτιμητέα σημεία αλλά ούτε και προτιμητέες κατευθύνσεις. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά αποτελούν την βάση της Κοσμολογικής Αρχής (Cosmological Principle) για το σύμπαν.

Εάν βεβαίως επικεντρωθούμε σε μελέτες και παρατηρήσεις σε μικρότερες κλίμακες μήκους, παρεκλίσεις από την Κοσμολογική Αρχή εμφανίζονται ευθύς αμέσως. Η χωρική κατανομή των γαλαξιών εμφανίζει παρέκλιση της τάξης του 35%, μετρήσεις της σταθεράς Hubble κατά 25%, κατανομή ακτινοβολίας στην περιοχή των ραδιοκυμάτων κατά 5%, στην περιοχή των ακτίνων X επίσης κατά 5%, και στην περιοχή των μικροκυμάτων λιγότερο από 1%. Όσο μεγαλώνει η κλίμακα των παρατηρήσεων και των μελετών μας οι στατιστικές αποκλίσεις μειώνονται, και η Κοσμολογική Αρχή από προσεγγιστική υπόθεση γίνεται ακριβής περιγραφή του σύμπαντος. Είναι επομένως εύκολο να καταλάβουμε γιατί η Κοσμολογική Αρχή έγινε η βάση πάνω στην οποία χτίστηκε η σύγχρονη Κοσμολογία, η επιστήμη που μελετά την εξέλιξη του σύμπαντος στην ολότητά του, άρα στη μεγαλύτερη δυνατή κλίμακα μήκους.

### 1.3 Τα συστατικά του σύμπαντος

Η περιγραφή της κατανομής των διαφόρων πηγών φωτός στο σύμπαν της προηγούμενης παραγράφου αποτελεί και την απαρχή της συζήτησης για το ποια ακριβώς είναι τα συστατικά του σύμπαντος. Στα επόμενα κεφάλαια θα ασχοληθούμε αναλυτικά με το ερώτημα αυτό, μπορούμε όμως να δώσουμε μια μικρή περίληψη του θέματος στο σημείο αυτό.

Η ύλη που αποτελεί τις πηγές φωτός αποκαλείται ‘ορατή ύλη’, και αποτελείται από συμβατικά στοιχειώδη σωματίδια: πρωτόνια, νετρόνια, ηλεκτρόνια κ.τ.λ.. Στην Κοσμολογία, σε όλα τα παραπάνω σωματίδια αποδίδεται, για συντομία, το κοινό όνομα ‘βαρυόνια’, παρ’ όλο που στην ακριβή του έννοια ο όρος βαρυόνιο είναι η δέσμια κατάσταση τριών κουάρκς (quarks), και έτσι περιγράφει με ακρίβεια μόνο το πρωτόνιο και νετρόνιο. Τα δύο όμως αυτά είδη στοιχειωδών σωματιδίων είναι και αυτά που σχηματίζουν τους πυρήνες των ατόμων, και σε συνεργασία με τα ηλεκτρόνια, τα άτομα των διαφόρων στοιχείων. Για τον λόγο αυτό, θεωρείται ότι είναι τα σωματίδια που κυρίως απαρτίζουν την ορατή ύλη του σύμπαντος. Θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η ορατή ύλη εκπέμπει ακτινοβολία όχι μόνο στο οπτικό μέρος του φάσματος αλλά και σε πολλές άλλες περιοχές: ακτίνες X, υπεριώδες, υπέρυθρο, ραδιοκύματα και μικρο-κύματα. Παρατηρήσεις σε όλες ανεξαιρέτως τις παραπάνω περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος οδηγούν σε πολύτιμες πληροφορίες για τη δομή και εξέλιξη τόσο των διαφόρων αστροφυσικών σωμάτων όσο και του σύμπαντος.

Ένα άλλο βασικό συστατικό του σύμπαντος είναι η λεγόμενη ‘ακτινοβολία’. Αποτελείται από σωματίδια με μηδενική μάζα, όπως τα φωτόνια, βαρυτόνια και, σε ορισμένες περιπτώσεις, νετρίνα. Τα νετρίνα είναι μια ειδική κατηγορία στοιχειωδών σωματιδίων με πολύ μικρή, σύμφωνα με τα πειράματα, μάζα που αλληλεπιδρούν με τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια μόνο μέσω των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων. Η ανακάλυψη ότι τα νετρίνα έχουν μάζα έγινε μόλις στα τέλη της δεκαετίας του ’90. Μέχρι τότε, τα νετρίνα θεωρούνταν άμαζα και επομένως μέρος της ‘ακτινοβολίας’ του σύμπαντος. Ακόμα όμως και σήμερα, η πολύ μικρή

τους μάζα τα τοποθετεί με φυσικό τρόπο πιο κοντά στα άμαζα σωματίδια του σύμπαντος παρά στα βαριά βαρυόνια. Τα βαρυτόνια, από την άλλη πλευρά, αποτελούν τους φυσικούς βαθμούς ελευθερίας του βαρυτικού πεδίου. Παρ' όλο που στην Κοσμολογία οι βαρυτικές δυνάμεις παίζουν τον πρωταρχικό ρόλο, σε επίπεδο στοιχειωδών σωματιδίων, είναι ιδιαίτερα ασθενείς. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την μηδενική τους μάζα, καθιστά την ανίχνευση των βαρυτονίων, εάν όχι αδύνατη, πολύ δύσκολη· μέχρι σήμερα, κανένα από τα πειράματα ανίχνευσης βαρυτονίων δεν έχει δώσει θετικά αποτελέσματα. Το σημαντικότερο σωματίδιο όμως αυτής της κατηγορίας είναι το φωτόνιο. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, το φωτόνιο έχει παίξει ένα πολύ βασικό ρόλο στην εξέλιξη και διαμόρφωση του σύμπαντος, ειδικά στην Αρχέγονη Εποχή. Ακόμα και σήμερα όμως, συνεχίζει να μας δίνει πολύτιμες πληροφορίες μέσω της Κοσμικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου. Η ακτινοβολία αυτή αντιστοιχεί στην περιοχή των μικρο-κυμάτων και είναι διάχυτη σε όλο το σύμπαν. Η συνεισφορά της ακτινοβολίας αυτής στη συνολική ενέργεια του σύμπαντος, τη σημερινή εποχή, είναι πολύ μικρή: η αντίστοιχη πυκνότητα ενέργειας προκύπτει να είναι  $\rho \sim 10^{-34} \text{ gr/cm}^3$ , και είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της ορατής ύλης [βλέπε Εξ. (1.2)]. Όπως θα δούμε όμως αργότερα, η αναλογία αυτή ήταν κατά πολύ ανεστραμμένη στην Αρχέγονη Εποχή.

Στα επόμενα κεφάλαια θα χρειαστεί να κάνουμε ένα σαφή διαχωρισμό ανάμεσα στην ορατή ύλη και στην ακτινοβολία, ή ισοδύναμα ανάμεσα στα μη-ρελατιβιστικά και στα ρελατιβιστικά σωματίδια. Ο παράγοντας που διαφοροποιεί τα δύο αυτά είδη σωματιδίων είναι η μάζα τους, και κατ' επέκταση η ταχύτητα με την οποία μπορούν να κινηθούν. Η συνολική ενέργεια ενός σωματιδίου δίνεται από την έκφραση:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (1.3)$$

Ο πρώτος όρος στην παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί στην μάζα ηρεμίας του σωματιδίου ενώ ο δεύτερος στην κινητική του ενέργεια. Ένα άμαζο σωματίδιο, όπως το φωτόνιο και το βαρυτόνιο, έχει μόνο κινητική ενέργεια, και η ταχύτητά του είναι η ανώτερη δυνατή,  $v = c$ , σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας. Ένα έμμαζο σωματίδιο όμως κινείται με ταχύτητα πάντα μικρότερη από αυτή του φωτός,  $v < c$ . Το πόσο μικρότερη καθορίζεται από το μέγεθος της μάζας ηρεμίας του: ένα βαρύ σωματίδιο (όπως το βαρυόνιο) κινείται με ταχύτητα πολύ μικρότερη από αυτή του φωτός, ενώ ένα ελαφρύ σωματίδιο (όπως το νετρίνο) μπορεί να κινηθεί με ταχύτητα ίση σχεδόν με αυτή του φωτός.

Δέκα χρόνια πριν, η περιγραφή των συστατικών του σύμπαντος θα είχε σταματήσει κάπου εδώ. Σήμερα όμως υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις, προερχόμενες από κοσμολογικές παρατηρήσεις, ότι στο σύμπαν υπάρχουν άλλα δύο πολύ βασικά συστατικά. Το πρώτο είναι αυτό της 'σκοτεινής ύλης', μιας ύλης αρκετά παρόμοιας με την ορατή, με την έννοια ότι συναντάται και αυτή σε δέσμιες βαρυτικές καταστάσεις όπως οι γαλαξίες, αλλά και αρκετά διαφορετικής, μια που δεν ακτινοβολεί. Στο παρελθόν προτάθηκαν διάφορες εξηγήσεις οι οποίες έκαναν χρήση

της συνηθισμένης ύλης αλλά σε ασυνήθιστες καταστάσεις, όπως βαρυόνια εγκλωβισμένα είτε σε μαύρες τρύπες είτε σε πολύ αμυδρά αστέρια. Η άποψη όμως που επικρατεί σήμερα είναι ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από ένα ή περισσότερα καινούρια είδη σωματιδίων που μέχρι στιγμής δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ στη γειτονιά μας.

Το τελευταίο συστατικό, που μάλιστα δείχνει να κυβερνά την εξέλιξη του σύμπαντος στη σημερινή εποχή και να συνεχίζει να το καθορίζει στο μέλλον, είναι αυτό της ‘σκοτεινής ενέργειας’. Το συστατικό αυτό, αν και επίσης σκοτεινό, διαφέρει ριζικά από αυτό της σκοτεινής ύλης. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, δεν αποτελεί μέρος δέσμιων βαρυτικών συστημάτων αλλά είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο το σύμπαν. Για τον λόγο αυτό ονομάζεται και ‘ενέργεια κενού’ ή ακόμα και ‘κοσμολογική σταθερά’, αν και δεν έχει αποδειχθεί ότι παραμένει αμετάβλητο στον χρόνο. Τόσο η φύση της σκοτεινής ενέργειας όσο και αυτή της σκοτεινής μάζας αποτελούν θέματα εντατικής έρευνας για εκατοντάδες κοσμολόγους στον κόσμο.

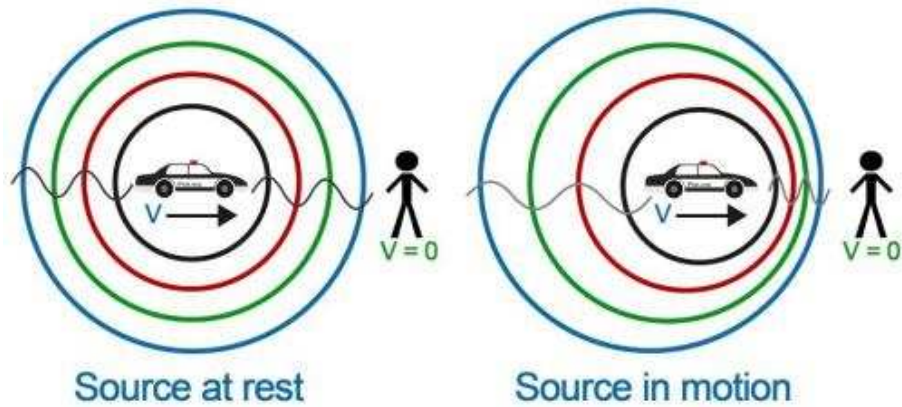
## 1.4 Η διαστολή του σύμπαντος

Επιστρέφοντας στο παράδοξο του Olbers, ας επικεντρωθούμε στην παραδοχή (i): “το σύμπαν είναι στατικό”. Σύμφωνα με τους κοσμολόγους της εποχής εκείνης, το σύμπαν δεν παρουσίαζε καμμία δυναμική εξέλιξη στον χρόνο, και επομένως δεν μεταβαλλόταν με τον χρόνο. Οι πρώτες όμως πραγματικές κοσμολογικές παρατηρήσεις που έγιναν στις αρχές του 20ου αιώνα φανέρωσαν μια τελείως διαφορετική εικόνα για το σύμπαν μας.

Το 1912 ο Vesto Slipher χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το φαινόμενο Doppler για να μετρήσει την ταχύτητα κίνησης ενός γαλαξία μέσα στο σύμπαν. Η φυσική του φαινομένου Doppler, η επίδραση δηλαδή της ταχύτητας μιας πηγής ήχου ή φωτός στην συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος – όπως αυτή μετράται από έναν ακίνητο παρατηρητή – ήταν ήδη γνωστή, και περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 3: μια πηγή που απομακρύνεται από εμάς εκπέμπει σήμα του οποίου η συχνότητα την στιγμή της ανίχνευσής του είναι μικρότερη από αυτή που είχε όταν εκπέμφθηκε, και αντίστροφα. Ο Slipher πρότεινε στον Edward Hubble να χρησιμοποιήσει την ίδια μέθοδο για να μελετήσει τις κινήσεις των γαλαξιών στο σύμπαν γενικότερα. Μετά από χρόνια παρατηρήσεων και μετρήσεων, το 1929, ο Hubble ανακάλυψε ότι τα φάσματα ακτινοβολίας που εκπέμπονταν από όλους σχεδόν τους γαλαξίες που μελέτησε ήταν μετατοπισμένα προς το ερυθρό μέρος, δηλαδή σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και επομένως σε μικρότερες συχνότητες (βλέπε Σχήμα 4). Η μετατόπιση προς το ερυθρό εκφράζεται μέσω της παραμέτρου  $z$ , η οποία ορίζεται ως

$$z = \frac{\lambda_{\text{παρ}} - \lambda_{\text{εκπ}}}{\lambda_{\text{εκπ}}}, \quad (1.4)$$





Σχήμα 3: Το φαινόμενο Doppler της μεταβολής του μήκους κύματος ενός εκπεμπόμενου σήματος λόγω της κίνησης της πηγής.

συναρτήσει του μηκών κύματος του φωτεινού σήματος τη στιγμή της εκπομπής  $\lambda_{εκπ}$  και της παρατήρησής του  $\lambda_{παρ}$ . Η ακριβής τιμή του  $z$  εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης της πηγής και, σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, δίνεται από την έκφραση

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}. \quad (1.5)$$

Για πηγές με σχετικά μικρές ταχύτητες,  $v \ll c$ , η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην ακόλουθη

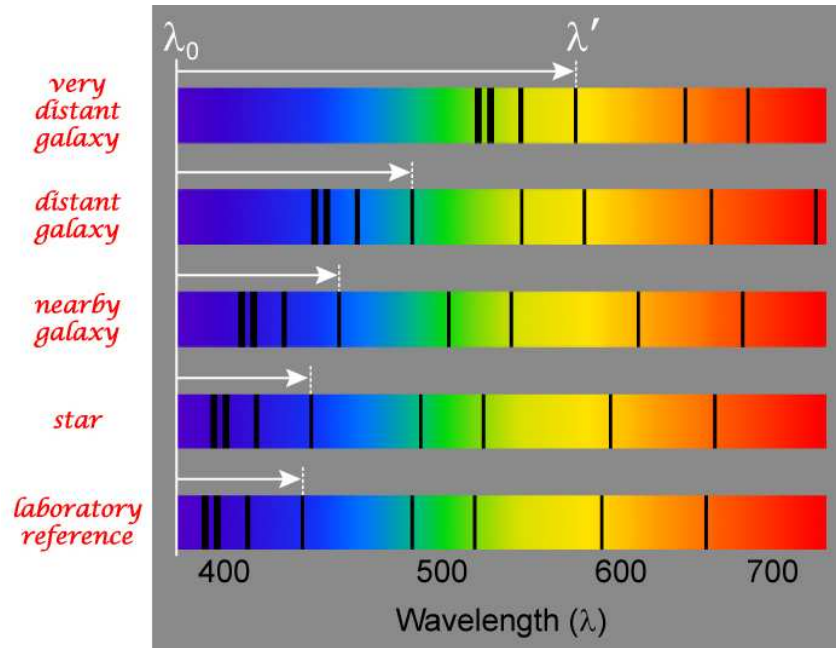
$$z = \frac{v}{c}, \quad (1.6)$$

όπου έχουμε αγνοήσει όρους ίσους ή ανώτερους από  $(v/c)^2$ .

Ο Hubble ανακάλυψε επίσης ότι οι πιο αμυδροί γαλαξίες, αυτοί δηλαδή που βρίσκονταν μακρύτερα από την Γη, παρουσίαζαν μεγαλύτερη μετατόπιση προς το ερυθρό στα φάσματά τους, ενώ οι κοντινότεροι σε εμάς μικρότερη. Η εμπειρική αυτή σχέση αναπαρίσταται στο Σχήμα 5, και δίνει την ταχύτητα του γαλαξία, όπως αυτή προκύπτει μέσω της Εξ. (1.6), συναρτήσει της απόστασής του από την Γη. Η σχεδόν γραμμική σχέση που μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε

$$\vec{v} = H \vec{d}, \quad (1.7)$$

είναι γνωστή ως νόμος του Hubble, και η ποσότητα  $H$  ως παράμετρος Hubble. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, η παράμετρος  $H$  δεν είναι σταθερά αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η τιμή της την σημερινή εποχή,  $H_0$ , αποκαλείται σταθερά του Hubble, και είναι



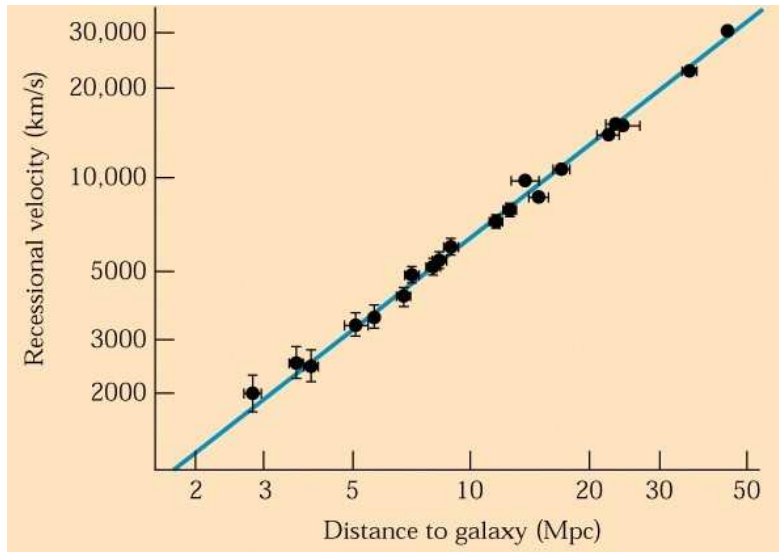
Σχήμα 4: Η κοσμολογική μετατόπιση προς το ερυθρό όπως παρατηρείται στα φάσματα σειράς γαλαξιών που βρίσκονται σε διαδοχικά μεγαλύτερες αποστάσεις από την Γη.

αντικείμενο εντατικής έρευνας μια που αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην Κοσμολογία.

Η απομάκρυνση όλων των γαλαξιών από εμάς είχε μία και μοναδική εξήγηση: το σύμπαν διαστέλεται, όπως συμπέρανε ο Lemaitre λίγο αργότερα. Αφού όμως όλοι οι υπόλοιποι γαλαξίες φαίνονται να κινούνται μακριά από εμάς, μήπως είμαστε όντως στο κέντρο του σύμπαντος; Η απάντηση είναι, πολύ απλά, όχι. Λόγω της συνολικής διαστολής του σύμπαντος, κάθε παρατηρητής, σε οποιοδήποτε σημείο, έχει την ίδια εικόνα για το σύμπαν. Ας θεωρήσουμε δύο γαλαξίες σε αποστάσεις (ή αλλιώς, με διανύσματα μετατόπισης)  $\vec{d}_1$  και  $\vec{d}_2$  από εμάς, και με ταχύτητες  $\vec{v}_1$  και  $\vec{v}_2$ , αντίστοιχα. Μια που, για καθένα από τους δύο γαλαξίες, ο νόμος του Hubble ισχύει ανεξάρτητα, μπορούμε να γράψουμε

$$(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = H_0 (\vec{d}_1 - \vec{d}_2). \quad (1.8)$$

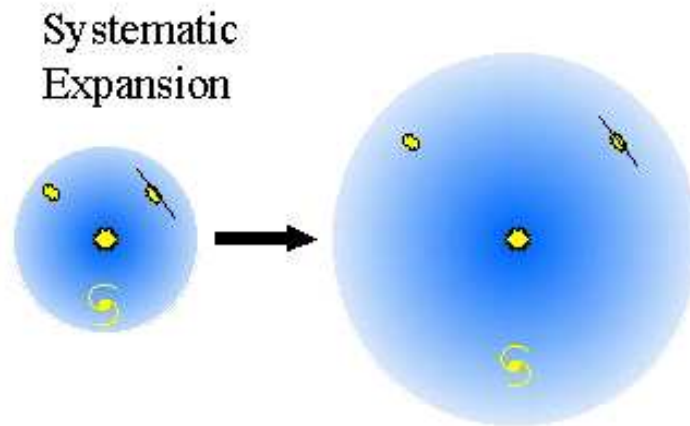
Όμως,  $\vec{d}_1 - \vec{d}_2 = \vec{d}_{12}$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης του γαλαξία 1 από τον γαλαξία 2, και  $\vec{v}_1 - \vec{v}_2 = \vec{v}_{12}$  η σχετική ταχύτητα. Επομένως και ο παρατηρητής στον γαλαξία 2 (όπως και στον γαλαξία 1) βλέπει όλους τους άλλους γαλαξίες να απομακρύνονται από τον δικό του σύμφωνα με τον νόμο του Hubble και μάλιστα με τον ίδιο ρυθμό  $H_0$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη γραμμική σχέση μεταξύ ταχύτητας και απόστασης που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε απλή διανυσματική ανάλυση.



Σχήμα 5: Οι ταχύτητες απομάκρυνσης των γαλαξιών συναρτήσει της απόστασής τους από την Γη. Ο προσεγγιστικός νόμος του Hubble για τη διαστολή του σύμπαντος δίνεται από την ευθεία γραμμή.

Ο νόμος του Hubble περιγράφει την κίνηση των γαλαξιών σε ένα πολύ ικανοποιητικό βαθμό, σε καμία όμως περίπτωση δεν αποτελεί ακριβή νόμο του σύμπαντος. Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι ο νόμος αυτός είναι προσεγγιστικός: η Εξ. (1.6) ισχύει μόνο για γαλαξίες με ταχύτητες πολύ μικρότερες αυτής της ταχύτητας του φωτός. Όταν η ταχύτητα ενός γαλαξία βρίσκεται να είναι σημαντική σε σχέση με αυτή του φωτός, ανώτεροι όροι στην ανάπτυξη της Εξ. (1.5) πρέπει να παρθούν υπόψη. Και αυτή δεν είναι η μόνη επιπλοκή: γαλαξίες που έχουν μεγάλη ταχύτητα βρίσκονται και πολύ μακριά από την Γη. Η Εξ. (1.5) δίνεται από την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, και επομένως ισχύει μόνο για επίπεδο χωρόχρονο. Είναι όμως το σύμπαν μέσα στο οποίο ζούμε επίπεδο; Εάν όχι, τότε ο ρόλος της καμπύλωσης του χωρόχρονου στην συμπεριφορά των γαλαξιών που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από εμάς αναμένεται να είναι σημαντικός. Από το Σχήμα 5 παρατηρούμε ότι αποκλίσεις από τον νόμο του Hubble εμφανίζονται και για γαλαξίες που βρίσκονται κοντά σε εμάς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι κοντινοί μας γαλαξίες, έχουν ιδιαίτερα μεγάλες ‘επιμέρους ταχύτητες’ (peculiar velocities), σε σύγκριση με αυτή της κοσμολογικής διαστολής, ως αποτέλεσμα των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων που ασκούνται ανάμεσα στους γαλαξίες-μέλη των τοπικών ομάδων.

Το σύμπαν μας, επομένως, δεν είναι στατικό, και αυτή είναι η (πρώτη;) λανθασμένη παραδοχή του κοσμολογικού μοντέλου του 18ου αιώνα που οδήγησε στο παράδοξο του Olbers. Λόγω της διαστολής του σύμπαντος, η ακτινοβολία από τους μακρινούς γαλαξίες



Σχήμα 6: Η διαστολή του σύμπαντος με τον χρόνο και η απομάκρυνση των γαλαξιών.

είναι σημαντικά μετατοπισμένη προς το ερυθρό μέρος του φάσματος και επομένως πολύ μικρότερη ενέργεια από αυτή που εκπέμφθηκε φτάνει τελικά σε εμάς. Μάλιστα, οι πιο μακρινοί από τους γαλαξίες απομακρύνονται τόσο γρήγορα που το φως τους δεν πρόκειται να μας φτάσει ποτέ!

## 1.5 Το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Μοντέλο

Τα συμπεράσματα που βγάλαμε, από την ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων, για την δομή και δυναμική του σύμπαντος αποτελούν και τους δομικούς λίθους του μοντέρνου Καθιερωμένου Κοσμολογικού Μοντέλου (ή Προτύπου), όπως λέγεται. Αυτοί οι δομικοί λίθοι συνοψίζονται παρακάτω:

- Το σύμπαν αποτελείται από ορατή ύλη, διάχυτη ακτινοβολία, σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια.
- Το σύμπαν διαστέλεται.
- Σε μεγάλη κλίμακα μήκους, το σύμπαν είναι και ομοιογενές και ισότροπο.

Άμεση συνέπεια του τελευταίου συμπεράσματος είναι ότι δεν υπάρχει προτιμητέο σημείο για έναν παρατηρητή στο σύμπαν. Η δυναμική διαστολή του σύμπαντος με τον χρόνο αναπαρίσταται, με αρκετά ακριβή τρόπο, με το παράδειγμα του μπαλονιού (Σχήμα 6): εάν φανταστούμε τους γαλαξίες κατανεμημένους στην επιφάνεια του μπαλονιού, καθώς το μπαλόνι διαστέλεται, όλα τα σημεία της επιφάνειάς του απομακρύνονται από όλα τα άλλα με

τον ίδιο ακριβώς ρυθμό, και χωρίς η διαστολή να χαρακτηρίζεται από κάποιο κέντρο. Το παράδειγμα με το μπαλόνι μας αποκαλύπτει και μια άλλη πλευρά της δυναμικής εξέλιξης του σύμπαντος: εάν αντιστρέψουμε τη διαδικασία, το μπαλόνι, άρα και το σύμπαν, συρρικνώνεται. Στην περίπτωση του πραγματικού σύμπαντος, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, εάν αντιστρέψουμε το βέλος του χρόνου, η συστολή συνεχίζεται έως ότου το σύμπαν συρρικνωθεί σε ένα και μοναδικό σημείο. Το σημείο αυτό, που αντιστοιχεί χρονικά στο σημείο  $t = 0$ , χαρακτηρίζεται από άπειρη θερμοκρασία και πυκνότητα ενέργειας, και αποτελεί μια πραγματική χωροχρονική ανωμαλία του σύμπαντος. Αυτό είναι το σημείο της Μεγάλης Έκρηξης (Big-Bang), του σημείου μηδέν στην ιστορία του σύμπαντος, σύμφωνα με την κλασική βαρύτητα. Παραμένει άγνωστο το τι προκάλεσε την κατακλυσμική έκρηξη σε χρόνο  $t = 0$  από την οποία γεννήθηκε το σύμπαν, το οποίο εξελισσόμενο για δισεκατομμύρια χρόνια, έφτασε στη σημερινή του μορφή. Σύμφωνα με τον Lemaitre “η εξέλιξη του κόσμου μας μπορεί να συγκριθεί με μία επίδειξη πυροτεχνημάτων που έχει μόλις τελειώσει: μερικές κόκκινες αναλαμπές, στάχτες και καπνοί παραμένουν μόνο. Καθισμένοι σε μια γωνιά, παρατηρούμε το αργό ξεθώριασμα των εκλάμψεων, και προσπαθούμε να θυμηθούμε την χαμένη λάμψη της πρώτης στιγμής της δημιουργίας του κόσμου”. Παρά τον απαισιόδοξο τόνο των σχολίων του Lemaitre, που διατυπώθηκαν το 1931, πολλές και σημαντικές ανακαλύψεις έγιναν στον χώρο της Κοσμολογίας από τότε. Ακόμα περισσότερες αναμένονται να γίνουν στο μέλλον, που θα αφορούν όχι μόνο το χαμένο παρελθόν του σύμπαντός μας αλλά και το μέλλον του. Μερικές από αυτές θα καλύψουμε στα επόμενα κεφάλαια.

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, το σύμπαν δημιουργήθηκε πριν από ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Η ηλικία του  $t_0$ , επομένως, είναι πεπερασμένη και όχι άπειρη. Συναντούμε, λοιπόν εδώ, ακόμα ένα χαρακτηριστικό του σύμπαντος που διαφέρει ριζικά από την αντίστοιχη παραδοχή του 18ου αιώνα. Εάν το σύμπαν μας είναι σχετικά μικρής ηλικίας, είναι πολύ πιθανόν το φως από μερικούς απομακρυσμένους γαλαξίες να μην έχει καν προλάβει να φτάσει σε εμάς ακόμα. Αφήνουμε το παράδοξο του Olbers με μια ερώτηση: το άπειρο αποτέλεσμα για την ένταση ακτινοβολίας στο σημείο  $P$  προέκυψε ολοκληρώνοντας την ακτινική συντεταγμένη  $r$  έως το άπειρο· είναι όμως όντως το σύμπαν άπειρο; Μέχρι στιγμής, δεν έχουμε δώσει καμία πληροφορία για το θέμα αυτό που αποτελεί ένα από τα πιο επίκαιρα κοσμολογικά ερωτήματα – θα το κάνουμε όμως στα επόμενα κεφάλαια.

Τελειώνουμε το κεφάλαιο αυτό με ένα σύντομο σχόλιο. Στην εξερεύνηση του σύμπαντος, από την εποχή του πρώτου κοσμολογικού μοντέλου έως και σήμερα, ο άνθρωπος έχει κάνει χρήση των νόμων της φύσης που ισχύουν στη γειτονιά μας. Παρ’ όλο που μεταβολές και γενικεύσεις των νόμων της φύσης, όπως τους αντιλαμβανόμαστε σήμερα, δεν είναι απίθανο να συμβούν στο μέλλον, είναι αξιοθαύμαστο το πόσο αξιόπιστα αποτελέσματα για το σύμπαν παράγει η χρήση των νόμων αυτών. Ένα άλλο σημείο που θα πρέπει να αναφερθεί, ώστε να εκτιμηθεί ακόμα περισσότερο η επιτυχία της Κοσμολογίας στην περιγραφή του σύμπαντος,

είναι ότι, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες επιστήμες, το σύμπαν είναι μοναδικό στο είδος του και κανένα πείραμα δεν μπορεί να επινοηθεί και να εκτελεστεί κατ' επανάληψη στο 'εργαστήριο' έως ότου οι ιδιότητές του προσδιοριστούν με ακρίβεια. Οι επιτυχίες της Κοσμολογίας μέχρι τώρα οφείλονται στην βαθιά αντίληψη, σωστή κρίση, δημιουργική φαντασία, υπομονή και επιμονή των κοσμολόγων, θεωρητικών και παρατηρησιακών.