

Α. ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ

1 Μονάδες - Τυπικά μεγέθη

$1 \text{ light year} = 0.951 \times 10^{16} \text{ m}$
 $1 \text{ AU} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$
 $1'' = 4.85 \times 10^{-6} \text{ rad}$
 $1 \text{ pc} \equiv 1 \text{ parsec} \equiv 1 \text{ AU} / (1'' \text{ in rad}) = 3.1 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ light years}$

Διαστάσεις του Γαλαξία μας: (διάμετρος 30 kpc) \times (2 kpc πάχος)
 Ο κοντινότερος σε εμάς γαλαξίας, η Ανδρομέδα, απέχει από εμάς 0.7 Mpc.

2. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 Mpc η κατανομή της ύλης στο Σύμπαν μοιάζει ομοιογενής και ισότροπη. Όλες οι περιοχές στο Σύμπαν είναι ισοδύναμες και δεν υπάρχει προεξάρχουσα κατεύθυνση σε μεγάλες κλίμακες.

2 Η Διαστολή και η Ηλικία του Σύμπαντος

Ο Olbers απέδειξε ότι ένα ομογενές και ισότροπο σύμπαν ΔΕΝ μπορεί να είναι άπειρης ηλικίας, άπειρο σε μέγεθος και στατικό.

Ας υποθέσουμε ότι το ομογενές και ισότροπο Σύμπαν μας έχει άπειρη ηλικία και μέγεθος και επιπλέον είναι στατικό.

Εστω αστέρας με λαμπρότητα L (εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) σε απόσταση r από εμάς. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που στέλνει σε εμάς ο αστέρας αυτός είναι $f(r) = L / 4\pi r^2$. Οπότε η ολική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που δεχόμαστε από όλους τους αστέρες, πυκνότητας $n(r)$ είναι

$$I = \int n(r) f(r) dV = n L \int_{r_1}^{\infty} dr = \infty \quad (1)$$

Χρησιμοποίησα την ομοιογένεια του σύμπαντος για να πάρω $n(r)$ ανεξάρτητο του r και για απλότητα μια μέση τιμή για τη λαμπρότητα των αστερων.

Προφανώς, κάποια από τις υποθέσεις δεν είναι σωστή. Σήμερα ξέρουμε ότι το Σύμπαν ΔΕΝ ικανοποιεί καμία από τις υποθέσεις του προηγούμενου υπολογισμού.

2.1 Ο νόμος του Hubble

Πράγματι, ο Hubble απέδειξε ήδη το 1930 ότι το Σύμπαν δεν είναι στατικό, αλλά διαστέλλεται. Συγκεκριμένα, ώρισε για κάθε παρατηρούμενο Γαλαξία την αντίστοιχη ερυθρόπηση

$$z \equiv \frac{\lambda_{rec} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad (2)$$

όπου λ_{rec} και λ_{em} το μήκος κύματος ακτινοβολίας που προέρχεται από τον εν λόγω γαλαξία, όπως το μετράει ο γήινος παρατηρητής και παρατηρητής ακίνητος στον γαλαξία, αντίστοιχα. Από το διάγραμμα της ερυθρόπησης συναρτήσει της απόστασης d του γαλαξία συμπεράνε ότι

$$z \simeq \frac{H_0}{c} d \quad (3)$$

ή, ισοδύναμα, αφού από το φαινόμενο Doppler ξέρουμε ότι (για μικρές ταχύτητες της πηγής)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \simeq \frac{v}{c} \quad (4)$$

συμπέρανε ότι οι γαλαξίες κατά κανόνα ¹ απομακρύνονται από εμάς με ακτινικές ταχύτητες ανάλογες της απόστασής τους από εμάς, δηλαδή

$$v \simeq H_0 d \quad (5)$$

Όπως θα εξηγήσω παρακάτω, ο συντελεστής H_0 δεν μπορεί να είναι σταθερός στο χρόνο. Η H_0 είναι σταθερά με την έννοια ότι ΔΕΝ εξαρτάται από το σημείο του χώρου όπου βρίσκεται ο παρατηρητής, σύμφωνα με την Αρχή του Κοπέρνικου, ή ισοδύναμα την Κοσμολογική Αρχή. Αρα, ο Νόμος του Hubble ισχύει για κάθε χρονική στιγμή και συνδέει τις ταχύτητες με τις αποστάσεις των γαλαξιών, με συντελεστή αναλογίας την σταθερά του Hubble $H(t)$.

$$v(t) \simeq H(t) d(t) \quad (6)$$

Σήμερα ισχύει

$$H(t_0) \equiv H_0 = (72 \pm 7) \text{ km/sec/Mpc} = \frac{1}{(13.6 \pm 1.4)\text{Gyr}} \equiv \frac{1}{t_H} \quad (7)$$

• Ο νόμος του Hubble μοιάζει να προσδίδει σε εμάς μοναδική θέση στο Σύμπαν, τοποθετώντας μας στο “κέντρο” του Κόσμου. Παρά ταύτα, η γραμμικότητα του νόμου τον κάνει απολύτως συμβατό με την Αρχή του Κοπέρνικου, ότι δηλαδή η θέση μας στο Σύμπαν ΔΕΝ είναι προεξάρχουσα. Πράγματι, ας πάρουμε τρεις γαλαξίες A, B και C, και ας υποθέσουμε ότι για τους παρατηρητές στον A ισχύει ο Νόμος του Hubble, δηλαδή ότι οι γαλαξίες B και C απομακρύνονται από τον A σύμφωνα με το νόμο του Hubble. Τότε ισχύουν

$$\mathbf{v}_{AB} \equiv \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A \simeq H_0 \mathbf{r}_{AB} \equiv H_0 (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) \quad (8)$$

και, αντίστοιχα

$$\mathbf{v}_{AC} \equiv \mathbf{v}_C - \mathbf{v}_A \simeq H_0 \mathbf{r}_{AC} \equiv H_0 (\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_A). \quad (9)$$

Όμως αφαιρώντας κατά μέλη τις δύο προηγούμενες βρίσκω ότι θα ισχύει και η σχέση

$$\mathbf{v}_{BC} \simeq H_0 \mathbf{r}_{BC} \quad (10)$$

δηλαδή ο Νόμος του Hubble με την ίδια σταθερά και για τον παρατηρητή B. Αν για τους παρατηρητές σε κάποιο γαλαξία ισχύει ο νόμος του Hubble, τότε τον ίδιο νόμο διαπιστώνουν και οι παρατηρητές κάθε γαλαξία. Ο,τι ακριβώς θα προέβλεπε και ο Κοπέρνικος.

2.2 Η ηλικία του Σύμπαντος

Οπότε, είναι λογικό να συμπεράνει κανείς ότι πηγαίνοντας πίσω το χρόνο, το Σύμπαν είχε κάποια αρχή. Οτι, δηλαδή, κάποτε στο παρελθόν όλα αυτά που βλέπουμε ήταν σε ένα και το αυτό “σημείο”. Αυτή ήταν η Αρχή του Σύμπαντος.

Ποιά είναι η ηλικία του Σύμπαντος; Για μια πρώτη εκτίμηση θα υποθέσουμε ότι οι ταχύτητες των γαλαξιών, που μετράμε σήμερα ήταν οι ίδιες από την Αρχή. Οτι, δηλαδή, καθωρίστηκαν με κάποιο τρόπο από τις αρχικές συνθήκες και ότι ΔΕΝ υπήρχαν δυνάμεις στο μεταξύ να τις αλλάξουν και επομένως κάθε γαλαξίας έκανε μια ομαλή ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή ταχύτητα μέχρι να φτάσει εκεί που βρίσκεται σήμερα. Τότε, ένας γαλαξίας που κινείται ως προς εμάς με

¹Υπάρχουν εξαιρέσεις στον γενικό κανόνα. Για παράδειγμα ο πύκνωτος μας γαλαξίας, η Ανδρομέδα μας πλησιάζει.

ταχύτητα v θα είχε απομακρυνθεί από το αρχικό σημείο (εμάς) απόσταση d , που σχετίζεται με την σταθερή ταχύτητά του και την ηλικία t_H του Σύμπαντος με τη σχέση

$$d = v t_H. \quad (11)$$

Συγκρίνοντας τη σχέση αυτή με το Νόμο του Hubble (5), συμπεράνει κανείς ότι η έτσι ωρισμένη ηλικία του Σύμπαντος είναι

$$t_H \simeq \frac{1}{H_0} \simeq (13.6 \pm 1.4) \text{ Gyr}. \quad (12)$$

Η εκτίμηση αυτή είναι ενδεικτική και έχει πολλές υποθέσεις. Οι γαλαξίες υπόκεινται στη δύναμη της βαρύτητας. Αρα, ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος ΔΕΝ μπορεί να είναι σταθερός. Η χωρικά σταθερή H_0 με βεβαιότητα εξαρτάται από το χρόνο. Για παράδειγμα, αν η ύλη στο Σύμπαν είναι αστέρες και πλανήτες, τότε κάθε γαλαξίας υπόκειται σε ελκτική δύναμη από τους υπόλοιπους και περιμένουμε την ταχύτητά του να μειώνεται. Αντίθετα, σήμερα μοιάζει το “περιεχόμενο” του Σύμπαντος να είναι κύρια αυτό που λέγεται “Σκοτεινή ενέργεια”, που έχει σαν αποτέλεσμα να *επιταχύνει* την απομάκρυνση των γαλαξιών. Ένα είδος “αντιβαρύτητας” για το οποίο θα μιλήσουμε παρακάτω.

Επομένως, η ηλικία του Σύμπαντος εξαρτάται από την συνολική ιστορία του και επομένως είναι απαραίτητο να χρησιμοποιεί κανείς ό,τι μέθοδο μπορεί να επιπλέον ελέγχους.

Για παράδειγμα, με λογικές υποθέσεις για τη Γη, συμπεραίνει κανείς ότι η ηλικία της είναι

$$t_E \simeq 4.6 \text{ Gyr} \quad (13)$$

Επίσης, συνδυάζοντας αστροφυσικά μοντέλα για την εξέλιξη των αστερών και παρατηρήσεις των γαλαξιακών σημνών, συμπεραίνουμε ότι η ηλικία τους είναι

$$t_{gc} \simeq 12.5 \pm 1.5 \text{ Gyr}. \quad (14)$$

Προφανώς, η ηλικία του Σύμπαντος δεν μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή την τιμή. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η παραπάνω τιμή t_H για την ηλικία του Σύμπαντος είναι πολύ κοντά στην τιμή 13.5 Gyr, που είναι η “πραγματική” ηλικία του Σύμπαντος, και στην οποία έχουν ληφθεί υπ’ όψιν όλες οι πληροφορίες που διαθέτουμε σήμερα. Επομένως η τιμή t_H χρησιμοποιείται σε σύντομους υπολογισμούς και εκτιμήσεις.

3 Η Μάζα και η Ενέργεια στο Σύμπαν

3.1 Η Λαμπερή και η Σκοτεινή Ύλη

Σήμερα πιστεύουμε ότι μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της μάζας του σύμπαντος ακτινοβολεί. Το ονομάζουμε Λαμπερή Ύλη (Luminous Matter (LM)) και είναι άμεσα ορατό. Το υπόλοιπο το λέμε Σκοτεινή Ύλη (Dark Matter (DM)). Οπότε, για τη συνολική πυκνότητα μάζας γράφουμε

$$\rho_M = \rho_{LM} + \rho_{DM} \quad (15)$$

Χρησιμοποιώντας την σταθερά του Hubble και αυτήν του Νεύτωνα, μπορούμε να γράψουμε μια ποσότητα με διαστάσεις πυκνότητας μάζας. Για λόγο που θα γίνει σαφής παρακάτω, ορίζω την **κρίσιμη πυκνότητα μάζας** $\rho_c(t)$

$$\rho_c(t) \equiv \frac{3H^2(t)}{8\pi G_N} \quad (16)$$

και αναφέρομαι σε όλες τις πυκνότητες μάζας σε μονάδες ρ_c , ορίζοντας από την πυκνότητα τύπου a ισοδύναμα το πηλίκον

$$\Omega_a(t) \equiv \frac{\rho_a(t)}{\rho_c(t)}. \quad (17)$$

Οπότε, η (15) γράφεται

$$\Omega_M = \Omega_{LM} + \Omega_{DM} \quad (18)$$

- Η σημερινή τιμή ² της κρίσιμης πυκνότητας είναι

$$\rho_{c,0} = (0.97 \pm 0.08) \times 10^{-29} \text{ g / cm}^3 = 5.5 \text{ GeV / m}^3 \simeq 6 \text{ H / m}^3 \quad (19)$$

• Μια εκτίμηση της λαμπερής ύλης στο Σύμπαν, δηλαδή των αστέρων, μπορούμε να κάνουμε χρησιμοποιώντας το ότι το παρατηρούμενο Σύμπαν έχει ακτίνα περί τα 13 δισεκατομμύρια έτη φωτός και έχει περί τους 10^{10} γαλαξίες, καθένας από τους οποίους έχει περί τους 10^{10} αστέρες με μέσο μέγεθος αυτό του Ηλιου μας, που έχει μάζα περί τα 2×10^{30} χιλιόγραμμα. Άρα,

$$\rho_{LM,0} \simeq \frac{10^{10} \times 10^{10} \times 2 \times 10^{30} \times 0.5 \times 10^{27} \text{ H}}{[4\pi(13 \times 10^9 \times \pi \times 10^7 \times 3 \times 10^8)^3/3]m^3} \simeq 13 \times 10^{-3} \text{ H/m}^3 \quad (20)$$

Κάπως ακριβέστερα, σήμερα πιστεύουμε ότι

$$\Omega_{LM,0} \simeq 0.005 \quad (21)$$

• Επίσης, είμαστε βέβαιοι ότι υπάρχει επιπλέον μη φωτεινή ύλη συγκεντρωμένη γύρω από τους γαλαξίες. Δύο είναι τα βασικά επιχειρήματα που οδηγούν σε αυτό το συμπέρασμα. Το πρώτο είναι η παρατήρηση ότι φωτεινές ακτίνες φαίνονται να καμπυλώνονται όταν περνάνε κοντά από γαλαξίες περισσότερο από όσο δικαιολογείται από την λαμπερή ύλη των τελευταίων. Το δεύτερο βασίζεται στις μετρήσεις των ταχυτήτων περιστροφής των αστέρων στους γαλαξίες. Οι αστέρες κινούνται υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης που οφείλεται στην μάζα $M(r)$ του γαλαξία, που περιέχεται μέσα σε σφαίρα ακτίνας ίσης με την ακτίνα r περιστροφής του αστέρα. Οπότε, η ταχύτητα v ενός αστέρα μάζας m , που εκτελεί κυκλική κίνηση ακτίνας r υπο την επίδραση της βαρυτικής δύναμης, που ασκεί πάνω του η συνολική μάζα $M(r)$ στο εσωτερικό της τροχιάς του, είναι

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}. \quad (22)$$

Από αυτήν προκύπτει ότι για αποστάσεις μέσα στο σώμα του γαλαξία ακτίνας R , για τις οποίες $M(r) \sim r^3$, θα ισχύει

$$v(r) \sim r, \quad r < R, \quad (23)$$

ενώ για αστέρες έξω από το κυρίως σώμα του γαλαξία, όπου $M(r)=M$ =συνολική μάζα του γαλαξία, θα έχουμε

$$v(r) \sim \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad r > R. \quad (24)$$

Σε αντίθεση με το τελευταίο οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι

$$v(r) \sim \text{constant}, \quad r > R, \quad (25)$$

και υποδεικνύουν ότι υπάρχει “σκοτεινή ύλη” στους γαλαξίες κατανεμημένη γύρω τους, που καλύπτουν κατά πολύ το ορατό μέγεθός τους. Αστέρες που θα νόμιζε κανείς με βάση την κατανομή της λαμπερής ύλης ότι είναι έξω από το κύριο σώμα του γαλαξία, στην πραγματικότητα, αν ληφθεί υπ’ όψιν και η σκοτεινή ύλη, βρίσκονται στο εσωτερικό του, με συνέπεια την αλλαγή στην κατανομή των ταχυτήτων.

• Βοηθάει να χωρίσουμε την ύλη στο σύμπαν σε λαμπερή ή σκοτεινή, σε βαρυονική ή εξωτική. Έτσι ορίζουμε τις ποσότητες

$$\begin{aligned} \Omega_M &= \Omega_{LM} + \Omega_{DM} \\ &= \Omega_B + \Omega_{exotic} \\ &= \Omega_{LM} + \Omega_{BDM} + \Omega_{exotic} \end{aligned} \quad (26)$$

²Ο δείκτης 0 σε κάποια ποσότητα υποδηλώνει τη σημερινή τιμή της ποσότητας αυτής.

Συνδυάζοντας τη μελέτη των αστρικών ταχυτήτων στους γαλαξίες και τις παρατηρήσεις της καμπύλωσης του φωτός από τους γαλαξίες (gravitational lensing), συμπεραίνουμε ότι η Σκοτεινή Ύλη είναι κατανομημένη γύρω από τους γαλαξίες σε αποστάσεις δεκαπλάσιες της ακτίνας του ορατού γαλαξία και ότι σήμερα έχουμε περίπου

$$\Omega_{M,0} \simeq 0.30 \pm 0.05, \quad \Omega_{LM,0} \simeq 0.005, \quad \Omega_{B,0} \simeq 0.04, \quad \Omega_{exotic,0} \simeq 0.26 \quad (27)$$

Υπάρχουν διάφορες θεωρητικές προτάσεις για το τί μπορεί να είναι η Σκοτεινή Ύλη. Νετρίνα, νετραλίνα, ιονισμένα αέρια, μελανές οπές, ή ασθηνικά αλληλεπιδρώντα βαριά σωματίδια που προβλέπουν διάφορες θεωρίες στη Σωματιδιακή Φυσική.³ Ωστόσο, εμάς εδώ δεν θα μας απασχολήσει τόσο το είδος των σωματίων, που συνιστούν τη Σκοτεινή Ύλη. Θα υποθέσουμε ότι υπάρχει στις παραπάνω ποσότητες και αυτό είναι αρκετό για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης του Σύμπαντος, με την οποία θα ασχοληθούμε.

3.2 Η Ακτινοβολία και η Σκοτεινή Ενέργεια

• Κατά τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης του σύμπαντος αυτό που έχει σημασία είναι, όπως περιμένει κανείς από τη Θεωρία της Σχετικότητας, η συνολική ενεργειακή πυκνότητα και όχι απλά η πυκνότητα μάζας. Στο ενεργειακό περιεχόμενο του Σύμπαντος κάθε χρονική στιγμή συνεισφέρει και η ακτινοβολία (R), που αποτελείται από φωτόνια, ή άλλα σωματίδια φορείς με αμελητέα μάζα. Η ενεργειακή πυκνότητα u_R της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως ξέρετε από τη θεωρία του μέλανος σώματος, είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας

$$u_R = \sigma_B T^4 \quad (28)$$

Σήμερα, που η θερμοκρασία αυτή είναι

$$T_0 \simeq 2.7^\circ K \quad (29)$$

έχουμε

$$\Omega_{R,0} \ll \Omega_{M,0} \quad (30)$$

Φυσικά, όπως θα δούμε, στα αρχικά στάδια της ζωής του Σύμπαντος, όπου οι θερμοκρασίες ήταν πολύ υψηλές, η κύρια συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο ήταν αυτή της ακτινοβολίας.

• Στην ενεργειακή πυκνότητα του Σύμπαντος συνεισφέρει κάθε είδος ενέργειας. Εκτός από την ενέργεια ενός ρευστού σωματιδίων ή ακτινοβολίας, μπορεί να υπάρχουν και μορφές ενέργειας και ορμής, που δεν μπορούν αναγκαστικά να περιγραφούν σαν ένα σύνηθες ρευστό. Όπως θα δούμε, πιστεύουμε ότι το 70% της ενεργειακής πυκνότητας του Σύμπαντος σήμερα είναι ένα τέτοιο είδος ενέργειας, για το οποίο ΔΕΝ γνωρίζουμε τίποτε περισσότερο από το ότι πρέπει να υπάρχει και, μάλιστα, στην ποσότητα που προανέφερα. Η άγνοιά μας αυτή για τη φύση και τη προέλευση αυτής της ενέργειας αποτυπώνεται στο όνομα **Σκοτεινή Ενέργεια**, που της έχουμε δώσει. Όπως και στη περίπτωση της Σκοτεινής Ύλης, υπάρχουν διάφορες προτάσεις για εναλλακτικές “αιτίες”, που θα οδηγούσαν στην ίδια συμπεριφορά του Σύμπαντος, χωρίς να είναι ενέργεια. Θα ασχοληθούμε όμως με αυτά πολύ αργότερα.

³Υπάρχουν και προσπάθειες να εξηγήσει κανείς τις καμπύλες των αστρικών ταχυτήτων στους γαλαξίες με αλλαγή στο νόμο της βαρύτητας σε γαλαξιακές αποστάσεις. Σύγχρονες θεωρίες των Στοιχειωδών Σωματιδίων δίνουν κατ’ αρχήν τέτοια δυνατότητα. Η προσέγγιση αυτή όμως είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

4 Η Κοσμολογική Αρχή (ΚΑ)

**Σε κάθε χρονική στιγμή
το Σύμπαν
είναι ομοιογενές και ισότροπο.**

Ισοδύναμα: δεν υπάρχει καμμία προνομιά θέση ή προνομιά κατεύθυνση στο Σύμπαν. Με άλλα λόγια, πρόκειται για την αρχή όπως την είχε διατυπώσει ο Κοπέρνικος.

Η αρχή έχει επιβεβαιωθεί παρατηρησιακά. Σήμερα ξέρουμε ότι η κατανομή της ύλης σε κλίμακες μεγαλύτερες των 100 Mpc είναι πράγματι ομογενής και ισότροπη. Επίσης, οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του Σύμπαντος σε ηλικία μόλις 10^5 ετών, δείχνουν διακυμάνσεις

$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5} \quad (31)$$

σε εξαιρετική συμφωνία με την Κοσμολογική Αρχή (ΚΑ). Αρα, μοιάζει ότι σε όλη τη διάρκεια της ζωής του το Σύμπαν ήταν πράγματι ομογενές και ισότροπο. Οι ανομοιογένειες που βλέπουμε σήμερα σε μικρότερες κλίμακες, καθώς και αυτές τάξης 10^{-5} που υπήρχαν στο νεαρό σύμπαν, πρέπει φυσικά να εξηγηθούν σαν διαταραχές από την ιδεατή εικόνα, που οφείλονται σε βαρυτικές, θερμοδυναμικές ή κβαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες είναι αναπόφευκτες στη Φύση. Στο ζήτημα αυτό θα επανέλθουμε όταν μιλήσουμε για το Πληθωριστικό Σύμπαν. Θα δούμε ότι το Πληθωριστικό Μοντέλο εξηγεί τις αποκλίσεις από την ομοιογένεια και ισότροπία του νεαρού σύμπαντος την εποχή της αποσύνδεσης της ακτινοβολίας από την ύλη, ως οφειλόμενες στις θεμελιώδεις κβαντικές διακυμάνσεις, που υπήρχαν σε χρόνους της τάξης των 10^{-35} δευτερολέπτων την εποχή του “πληθωρισμού”.