



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ ΚΑΙ ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Ο  
ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ  
ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ »**

**ΤΟΥΡΒΑ ΕΛΕΝΗ**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΣΦΕΤΣΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΜΑΪΟΣ 2026**

### **Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Ελένης Τουρβά που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοιχτής πρόσβασης η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος, για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας, αναφέροντας σε κάθε περίπτωση τον τίτλο και τον συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.

**«ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ ΚΑΙ ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Ο  
ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ  
ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ»**

**ΤΟΥΡΒΑ ΕΛΕΝΗ**

**Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Συν – Επιβλέπων Καθηγητής**

**Σφέτσος Κωνσταντίνος**

**Ζούπας Ανδρέας**

**Καθηγητής Θεωρητικής Φυσικής  
Στοιχειωδών Σωματιδίων  
Τμήμα Φυσικής  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών**

**ΣΕΠ της ΣΘΕΤ στο Ελληνικό Ανοικτό  
Πανεπιστήμιο**

**Μάιος 2026**

### **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Σφέτσο Κωνσταντίνο, για τη συνεχή καθοδήγηση στη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και την οικογένειά μου για την ενθάρρυνση και υποστήριξη.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη σύγχρονη κοσμολογία με έμφαση στη σκοτεινή ύλη και στη σκοτεινή ενέργεια, καθώς και τον ρόλο τους στην εξέλιξη και τη δομή του Σύμπαντος. Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο του Καθιερωμένου Προτύπου  $\Lambda$ CDM και οι βασικές αρχές της κοσμολογίας, όπως η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, οι αρχές της ομοιογένειας και ισοτροπίας, η μετρική FLRW και οι εξισώσεις Friedmann, που περιγράφουν τη δυναμική της κοσμικής διαστολής. Στη συνέχεια αναλύονται οι παρατηρησιακές ενδείξεις για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης σε γαλαξιακή και διαγαλαξιακή κλίμακα, οι κατανομές πυκνότητας, τα θεωρητικά πλαίσια και οι μέθοδοι ανίχνευσής της, καθώς και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα πρότυπα. Παράλληλα, εξετάζεται η σκοτεινή ενέργεια, οι αποδείξεις για την επιτάχυνση της διαστολής του Σύμπαντος, τα βασικά πρότυπα και η επίδρασή της στη γεωμετρία και την τελική μοίρα του Σύμπαντος. Η εργασία ολοκληρώνεται με παρουσίαση των σύγχρονων κοσμολογικών προτύπων, των πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους, καθώς και των εναλλακτικών θεωρητικών προσεγγίσεων. Τα συμπεράσματα συνοψίζουν τη σημασία της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας στη δυναμική, τη δομή και τη γεωμετρία του Σύμπαντος και προτείνουν κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Παραρτήματα περιλαμβάνουν τις μαθηματικές εξαγωγές των βασικών εξισώσεων και μια χρονολογική ανασκόπηση της ιστορίας του Σύμπαντος.

## Λέξεις – Κλειδιά

**Σκοτεινή Ύλη, Σκοτεινή Ενέργεια, Κοσμολογικές έννοιες, Γεωμετρία του χώρου, Εξισώσεις Friedmann, Διαστολή του Σύμπαντος**

## **Abstract**

This thesis examines modern cosmology, focusing on dark matter and dark energy, as well as their role in the evolution and structure of the Universe. It initially presents the theoretical framework of the  $\Lambda$ CDM Standard Model and the fundamental principles of cosmology, including General Relativity, the principles of homogeneity and isotropy, the FLRW metric, and the Friedmann equations, which describe the dynamics of cosmic expansion. Subsequently, observational evidence for the existence of dark matter on galactic and extragalactic scales is analyzed, along with density distributions, theoretical frameworks, detection methods, and the challenges faced by current models. At the same time, dark energy is examined, including evidence for the accelerated expansion of the Universe, the main theoretical models, and its impact on the geometry and ultimate fate of the Universe. The thesis concludes with a presentation of modern cosmological models, their advantages and limitations, and alternative theoretical approaches. The findings summarize the importance of dark matter and dark energy for the dynamics, structure, and geometry of the Universe and suggest directions for future research. Appendices include the mathematical derivations of the key equations and a chronological overview of the history of the Universe.

## **Keywords**

**Dark Matter, Dark Energy, Cosmological Concepts, Geometry of Space, Friedmann Equations, Expansion of the Universe.**

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b>	<b>5</b>
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>14</b>
1.1 Η γενική εικόνα.....	14
1.2 Το πλαίσιο της σύγχρονης κοσμολογίας και το Καθιερωμένο Πρότυπο (ΛCDM).....	17
1.3 Σκοπός – στόχος της παρούσης εργασίας.....	19
<b>2. Θεμελιώδεις Αρχές Κοσμολογίας</b>	<b>20</b>
2.1 Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας ως βάση της σύγχρονης κοσμολογίας.....	20
2.2 Οι αρχές της ομοιογένειας και ισοτροπίας.....	22
2.2.1 Αρχή της ομοιογένειας (Homogeneity Principle).....	22
2.2.2 Αρχή της ισοτροπίας (Isotropy Principle).....	23
2.2.3 Η Κοσμολογική Αρχή.....	24
2.3 Η μετρική FLRW και η καμπυλότητα του χώρου.....	25
2.3.1 Η μετρική FLRW.....	25
2.3.2 Ο μετρικός τανυστής $g_{\mu\nu}$ .....	26
2.3.3 Η παράμετρος καμπυλότητας $k$ .....	28
2.4 Οι εξισώσεις Friedmann και η εξίσωση συνέχειας ( ρευστού ).....	28
2.4.1 Ο τανυστής ενέργειας – ορμής.....	28
2.4.2 Η πρώτη εξίσωση Friedmann.....	29
2.4.3 Η εξίσωση συνέχειας (ρευστού).....	30
2.4.4 Η δεύτερη εξίσωση Friedmann.....	30
2.4.5 Η Συνθήκη επιτάχυνσης της κοσμικής διαστολής και ο ρόλος της πίεσης.....	32
2.4.6 Η εξέλιξη της πυκνότητας $\rho(a)$ και του παράγοντα κλίμακας.....	32
2.5 Θεμελιώδεις κοσμολογικές παράμετροι.....	36
2.5.1 Η παράμετρος Hubble $H(t)$ .....	37
2.5.2 Η κρίσιμη πυκνότητα $\rho_c$ .....	39
2.5.3 Η παράμετρος πυκνότητας $\Omega$ .....	40
2.5.4 Η παράμετρος πυκνότητας της κοσμολογικής σταθεράς $\Omega_\Lambda$ .....	40
2.5.5 Η παράμετρος επιβράδυνσης $q_0$ .....	41
<b>3. Σκοτεινή Ύλη</b>	<b>43</b>
3.1 Ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης.....	44



3.1.1 Η γαλαξιακή κλίμακα.....	45
α) Καμπύλες περιστροφής.....	45
β) Αποσύνθεση των καμπυλών περιστροφής.....	50
γ) Επιπρόσθετες ενδείξεις.....	52
3.1.2 Η κλίμακα των σμηνών γαλαξιών.....	52
α) Φαινόμενο βαρυτικού φακού σε σμήνη γαλαξιών.....	52
β) Το σμήνος “Bullet” (1E 0657–558).....	55
γ) CMB ανισοτροπίες.....	57
δ) Πρόσθετες ενδείξεις.....	60
3.2 Κατανομές πυκνότητας σκοτεινής ύλης.....	60
3.3 Θεωρητικά πλαίσια σκοτεινής ύλης.....	65
3.3.1 Ασθενώς Αλληλεπιδρώντα Σωματίδια Μεγάλης Μάζας.....	66
3.3.2 Αξιόνια (Axions).....	67
3.3.3 Αδρανή Νετρίνα (Sterile Neutrinos).....	67
3.3.4 Άλλες θεωρίες.....	67
3.4 Μέθοδοι ανίχνευσης.....	68
3.4.1 Άμεση ανίχνευση.....	68
3.4.2 Έμμεση ανίχνευση.....	70
3.4.3 Παραγωγή σε επιταχυντές.....	72
3.5 Ο ρόλος της σκοτεινής ύλης στην κοσμική εξέλιξη.....	73
3.6 Προβλήματα/προκλήσεις.....	75
3.6.1 Το πρόβλημα cusp – core.....	75
3.6.2 Το πρόβλημα της υποδομής των σκοτεινών άλω.....	77
3.6.3 Το πρόβλημα των υπερβολικά μαζικών δορυφόρων.....	78

#### **4. Σκοτεινή Ενέργεια**

**80**

4.1 Παρατηρησιακές αποδείξεις για την επιτάχυνση της διαστολής του Σύμπαντος.....	80
4.1.1 Υπερκαινοφανείς Τύπου Ia ως πρότυπα κεριά.....	80
4.1.2 Κοσμική Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου (CMB).....	85
4.1.3 Ταλαντώσεις Βαρυονικής Ύλης (BAO).....	85
4.1.4 Επιπλέον παρατηρησιακά δεδομένα.....	85
4.2 Πρότυπα Σκοτεινής Ενέργειας.....	86
4.2.1 Κοσμολογική Σταθερά ( $\Lambda$ ).....	87
4.2.2 Δυναμική Σκοτεινή Ενέργεια.....	88
α) Πεμπτουσία (quintessence).....	88
β) k – essence.....	90
γ) Ενέργεια φάντασμα (phantom energy).....	91
4.3 Η σκοτεινή ενέργεια στις εξισώσεις Friedmann.....	92
4.4 Επιπτώσεις της σκοτεινής ενέργειας στη γεωμετρία και στην τελική μοίρα του Σύμπαντος.....	96
4.4.1 Επιρροή στη γεωμετρία του Σύμπαντος.....	97

4.4.2 Η τελική μοίρα του Σύμπαντος και θεωρίες εξέλιξης.....	99
--	----

## **5. Η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια σε σύγχρονα κοσμολογικά πρότυπα** **103**

5.1 Ιστορική αναδρομή Κοσμολογικών Προτύπων.....	103
5.2 Η διαστολή του Σύμπαντος και η φυσική της σημασία.....	103
5.3 Το Καθιερωμένο Πρότυπο $\Lambda$ CDM.....	105
5.4 Βασικά χαρακτηριστικά του Σύμπαντος με βάση το Καθιερωμένο Πρότυπο.....	106
5.4.1 Η ηλικία του Σύμπαντος $t_0$ .....	107
5.4.2 Το μέγεθος του Σύμπαντος.....	109
5.4.3 Μάζα και θερμοκρασία.....	109
5.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του $\Lambda$ CDM.....	110
5.6 Εναλλακτικές προσεγγίσεις.....	112
5.6.1 Τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας.....	112
5.6.2 Θεωρίες βαρύτητας $f(R)$ .....	114
5.6.3 Άλλες προσεγγίσεις.....	115
5.7 Μελλοντικές προοπτικές και ανοιχτά προβλήματα.....	116

## **6. Συμπεράσματα** **118**

6.1 Σύνοψη παρατηρησιακών ενδείξεων.....	118
6.2 Συμβολή της Σκοτεινής Ύλης και της Σκοτεινής Ενέργειας στη δυναμική του Σύμπαντος.....	118
6.3 Ο ρόλος τους στον καθορισμό της γεωμετρίας του Σύμπαντος.....	119
6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	120

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄**

Εξαγωγή πρώτης εξίσωσης Friedmann.....	122
--	-----

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄**

Εξαγωγή εξίσωσης ρευστού.....	127
-------------------------------	-----

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ΄**

Η ιστορία του Σύμπαντος.....	130
------------------------------	-----

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>133</b>
---------------------------	------------



## Ευρετήριο Εικόνων

- **Εικόνα 1.1:** Υπολογιστική προσομοίωση του κοσμικού ιστού – η μεγάλη κλίμακα της δομής του Σύμπαντος, όπως σχηματίζεται από τη σκοτεινή ύλη και τους γαλαξίες.
- **Εικόνα 1.2:** Ο χάρτης του Σύμπαντος από το SDSS (Sloan Digital Sky Survey).
- **Εικόνα 2.1:** Χάρτης ολόκληρου ουρανού των ανισοτροπιών του Κοσμικού Μικροκυματικού Υποβάθρου (CMB)
- **Εικόνα 2.2:** Στα τρία αυτά σχήματα βλέπουμε τη διαφορά μεταξύ ισοτροπίας και ομοιογένειας.
- **Εικόνα 2.3:** Αναπαράσταση της διαστολής του χώρου σε ένα πλέγμα συνεπιβατικών συντεταγμένων.
- **Εικόνα 2.4:** Απεικόνιση των τριών δυνατών γεωμετριών του Σύμπαντος ανάλογα με την τιμή της καμπυλότητας  $k$ .
- **Εικόνα 3.1:** Χάρτης σκοτεινής ύλης, από το Διαστημικό Τηλεσκόπιο James Webb της NASA.
- **Εικόνα 3.2:** Εικόνα του Σμήνους της Κόμης (Abell 1656)
- **Εικόνα 3.3:** Γαλαξίες που παρουσιάζουν το φαινόμενο βαρυτικού φακού και αποτελούν ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης.
- **Εικόνα 3.4:** Απεικόνιση του Bullet Cluster (1E 0657-56) σε διάφορα μήκη κύματος.
- **Εικόνες 3.5 και 3.6: Αριστερή εικόνα:** Φωτογραφία ακτίνων – X του συγχωνευόμενου σμήνους “Bullet”, από το διαστημικό τηλεσκόπιο Chandra. **Δεξιά εικόνα:** Άμεση οπτική εικόνα του σμήνους.
- **Εικόνα 3.7:** Σχηματική αναπαράσταση των προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από την αλληλοεξουδετέρωση ή τη διάσπαση υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης, όπως τα υπερσυμμετρικά neutralinos.
- **Εικόνα 3.8:** Σχηματική αναπαράσταση ανίχνευσης υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης στον ATLAS.
- **Εικόνα 3.9:** Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου «από κάτω προς τα πάνω» (bottom – up) στη δημιουργία δομών στο Σύμπαν.
- **Εικόνα 3.10:** Το πρόβλημα των «χαμένων» δορυφόρων.
- **Εικόνα 4.1:** Οι πιθανοί μελλοντικοί δρόμοι του Σύμπαντος από το Big Bang έως το τέλος του, ανάλογα με τη σκοτεινή ενέργεια.
- **Εικόνα Παράρτημα Α΄:** Εξέλιξη ενός πλέγματος στο χρόνο, υποδεικνύοντας τη μεγέθυνση της κλίμακας και τη σύνδεση κόμβων.
- **Εικόνα Παράρτημα Γ΄ :** Η ιστορία του Σύμπαντος σε μία χρονογραμμή.

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

- **Διάγραμμα 1.1:** Η κατανομή βαρυονικής μάζας, σκοτεινής ύλης και σκοτεινής ενέργειας στο Σύμπαν.
- **Διάγραμμα 2.1:** Σύγκριση των μετρήσεων της τιμής της σταθεράς Hubble  $H_0$  σύμφωνα με το πρότυπο  $\Lambda$ CDM.
- **Διάγραμμα 3.1:** Καμπύλη περιστροφής του Ηλιακού Συστήματος.
- **Διάγραμμα 3.2:** Ταχύτητες περιστροφής των συμπλεγμάτων OB στον M31 ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο.
- **Διάγραμμα 3.3:** Αποσύνθεση της καμπύλης περιστροφής του NGC 891.
- **Διάγραμμα 3.4:** Καμπύλη περιστροφής του UGC 711.
- **Διάγραμμα 3.5:** Φάσμα γωνιακής ισχύος της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου (CMB).
- **Διάγραμμα 3.6:** Κατανομή πυκνότητας της άλω σκοτεινής ύλης ως συνάρτηση της ακτίνας για διαφορετικά θεωρητικά πλαίσια
- **Διάγραμμα 3.7:** Το πρόβλημα cusp – core. Καμπύλη περιστροφής του LSB γαλαξία F568 – 3.
- **Διάγραμμα 4.1:** Καμπύλες φωτεινότητας υπερκαινοφανών τύπου Ia και τύπου II, που δείχνουν την εξέλιξη της λαμπρότητάς τους μετά τη μέγιστη φωτεινότητα.
- **Διάγραμμα 4.2:** Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση φαινόμενης λαμπρότητας  $m_B$  και ερυθρομετάθεσης  $z$  για υπερκαινοφανείς τύπου Ia.
- **Διάγραμμα 4.3:** Διάγραμμα από παρατηρήσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia (SN Ia) όπου αποτυπώνεται η απόσταση – λαμπρότητα ( $m - M$ ) ως συνάρτηση της ερυθρομετατόπισης  $z$ .
- **Διάγραμμα 4.4:** Εξέλιξη των ενεργειακών πυκνοτήτων του Σύμπαντος ως συνάρτηση του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ .
- **Διάγραμμα 5.1:** Το ιστορικό διάγραμμα του Edwin Hubble (1929) που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας απομάκρυνσης γαλαξιών (κατακόρυφος άξονας) και απόστασής τους (οριζόντιος άξονας).

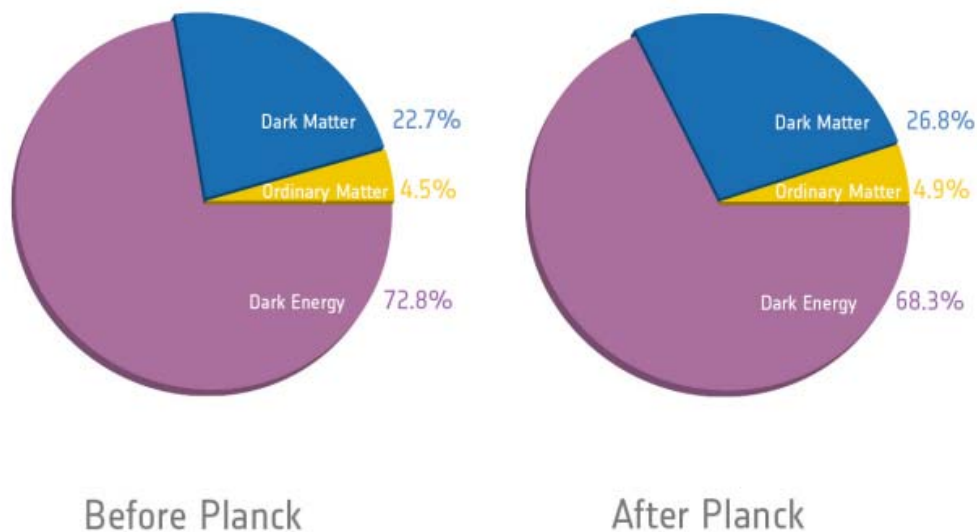
## Ευρετήριο Πινάκων

- **Πίνακας 2.1:** Εξάρτηση του ρυθμού κοσμικής διαστολής από την παράμετρο κατάστασης  $w$  διαφορετικών μορφών ρευστού στο Σύμπαν.
- **Πίνακας 3.1:** Κατανομές πυκνότητας σκοτεινής ύλης για διάφορα πρότυπα.
- **Πίνακας 4.1:** Η τιμή της παραμέτρου καμπυλότητας  $\Omega_k$  σε συνδυασμό με την ολική πυκνότητα  $\Omega_{total}$  καθορίζει τη γεωμετρία του Σύμπαντος.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Η γενική εικόνα

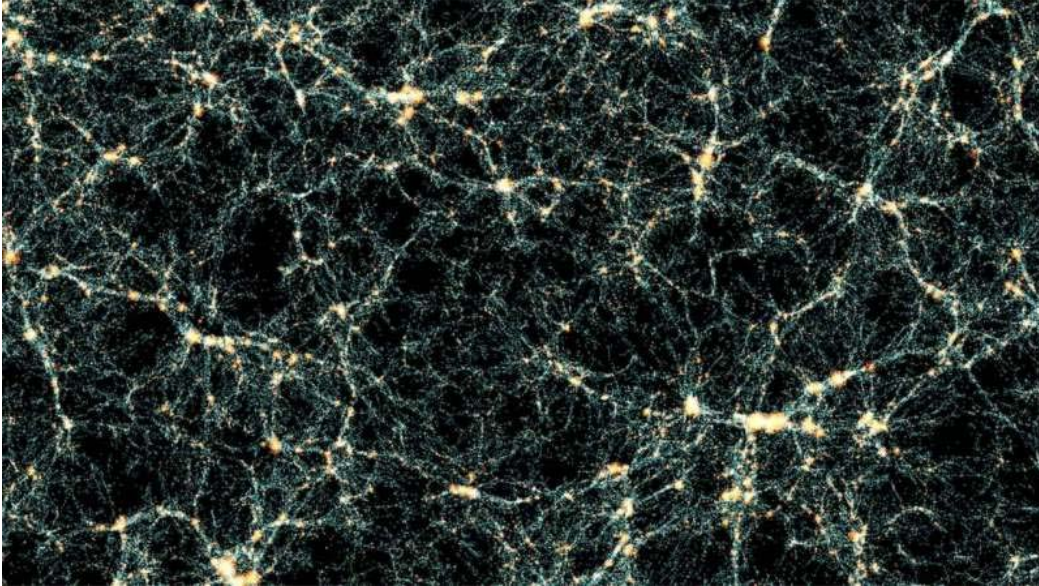
Η κατανόηση της φύσης και της εξελικτικής πορείας του Σύμπαντος αποτελεί έναν από τους πλέον θεμελιώδεις και διαχρονικούς στόχους της επιστημονικής κοινότητας. Από τις πρώτες φιλοσοφικές απόπειρες ερμηνείας του κόσμου έως τα σύγχρονα θεωρητικά και παρατηρησιακά πλαίσια, η μελέτη της κοσμικής δομής και δυναμικής κατέχει κεντρική θέση στις φυσικές επιστήμες. Αξίζει μάλιστα να σημειωθεί ότι η ίδια η λέξη «κόσμος» στην αρχαία ελληνική σήμαινε «στολίδι» ή «κόσμημα», υποδηλώνοντας την τάξη, την αρμονία και την ομορφιά του Σύμπαντος. Στο πλαίσιο αυτό, η κοσμολογία, με βάση την ετυμολογία της, μπορεί να συσχετιστεί και με την επιστήμη που μελετά το ωραίο στη δομή και την οργάνωση του Σύμπαντος. Τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί σε έναν επιστημονικό κλάδο, ο οποίος βασίζεται στην αξιοποίηση μαθηματικών προτύπων, θεμελιωδών φυσικών θεωριών και υψηλής ακρίβειας παρατηρησιακών δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, παρά την εντυπωσιακή πρόοδο των τελευταίων δεκαετιών, η εικόνα που διαθέτουμε σήμερα για το Σύμπαν παραμένει ελλιπής και, σε μεγάλο βαθμό, μυστηριώδης. Σύμφωνα με τα πιο αξιόπιστα παρατηρησιακά δεδομένα (Planck Collaboration, VI, 2021) μόλις ένα μικρό ποσοστό — περίπου 5 % — της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας του Σύμπαντος αποτελείται από τη γνωστή, βαρυονική ύλη που απαρτίζει τα άστρα, τους πλανήτες, τη μεσοαστρική ύλη και τους ζωντανούς οργανισμούς. Το υπόλοιπο 95 % αποδίδεται σε δύο αόρατα και ανεξερεύνητα συστατικά: τη **σκοτεινή ύλη** και τη **σκοτεινή ενέργεια** όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



**Διάγραμμα 1.1:** Η κατανομή βαρυονικής μάζας (πρωτόνια και νετρόνια), σκοτεινής ύλης και σκοτεινής ενέργειας στο Σύμπαν. Credit: ESA and the Planck Collaboration.

Το πρώτο από αυτά, η σκοτεινή ύλη, είναι μια μορφή ύλης που δεν εκπέμπει, δεν απορροφά και δεν ανακλά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, καθιστώντας την αόρατη στα συμβατικά μέσα παρατήρησης. Η έννοια της σκοτεινής ύλης διατυπώθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1930 μέσα από ανεξάρτητες μελέτες των Hendrik Oort και Fritz Zwicky. Το 1932, ο Oort, μελετώντας τις κατακόρυφες κινήσεις των άστρων κοντά στο Γαλαξιακό επίπεδο, διαπίστωσε πως η ορατή αστρική μάζα δεν επαρκούσε για να εξηγήσει τη βαρυτική δύναμη που συγκρατεί τα άστρα εντός του δίσκου του Γαλαξία. Για τον λόγο αυτό, πρότεινε την ύπαρξη πρόσθετης, αόρατης ύλης στον Γαλαξία (Oort, 1932). Πρόκειται για την πρώτη επιστημονική υπόδειξη ύπαρξης μη ορατής μάζας, αν και το εύρημα του Oort αφορούσε ένα τοπικό, γαλαξιακό φαινόμενο. Ένα χρόνο αργότερα, ο Fritz Zwicky επεξέτεινε αυτήν την ιδέα σε κοσμολογική κλίμακα, μελετώντας τη διασπορά των ταχυτήτων των γαλαξιών στο σμήνος της Κόμης. Έδειξε ότι η ορατή ύλη δεν επαρκούσε για να συγκρατήσει βαρυτικά το σμήνος, και πρότεινε την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων «*Dunkle Materie*» (σκοτεινής ύλης) (Zwicky, 1933). Αργότερα, η Vera Rubin και ο Kent Ford, μέσω των καμπυλών περιστροφής των σπειροειδών γαλαξιών, επιβεβαίωσαν ότι η ορατή ύλη δεν μπορεί να δικαιολογήσει τις παρατηρούμενες ταχύτητες των άστρων στις εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών (Rubin & Ford, 1970).

Έκτοτε, όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, σωρεία παρατηρησιακών ενδείξεων — όπως ο σχηματισμός των δομών μεγάλης κλίμακας, η κατανομή της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου (CMB) και φαινόμενα όπως οι βαρυτικοί φακοί — επιβεβαιώνουν την παρουσία ενός αόρατου, ψυχρού και βαρυτικά δραστικού συστατικού που ονομάζουμε σκοτεινή ύλη. Επιπλέον έχουμε τη δυνατότητα να καθορίσουμε την αφθονία της στο Σύμπαν με εξαιρετική ακρίβεια. Η κατανόησή μας για το πώς κατανέμεται η σκοτεινή ύλη —σε δομές που εκτείνονται από τους νάνους γαλαξίες έως τα σμήνη γαλαξιών— έχει βελτιωθεί χάρη στις αριθμητικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης που καθίστανται εφικτές από τους σύγχρονους υπερυπολογιστές. (Springel et al. 2005; Millennium Simulation, Max Planck Institute for Astrophysics / Virgo Consortium)



**Εικόνα 1.1:** Απεικόνιση της κοσμικής, μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος, όπως προκύπτει από υπολογιστική προσομοίωση: ο κοσμικός ιστός (cosmic web) με νημάτια σκοτεινής ύλης, γαλαξιακά σμήνη στις φωτεινές περιοχές και τεράστια κοσμικά κενά ανάμεσά τους. Credit: Jorge Carretero & Pau Tallada, Port d'Informació Científica / Euclid Consortium (Euclid Flagship Simulation, 2025).

Οι πρώιμες θεωρητικές προσεγγίσεις σχετικά με τη φύση της σκοτεινής ύλης επικεντρώνονταν στην υπόθεση ότι αυτή συνιστάται από βαρυονική ύλη, δηλαδή από σωματίδια που αποτελούνται από τρία κουάρκ, κινούμενα εν γένει μη σχετικιστικά και ότι αποτελείται από μεγάλα, συμπαγή αστροφυσικά αντικείμενα, όπως μαύρες τρύπες, αστέρες νετρονίων, λευκούς ή καφέ νάνους, αμυδρά αστέρια ή μη φωτεινά σώματα τύπου πλανητών. Τα αντικείμενα αυτά είναι γνωστά συλλογικά ως Μαζικά Αστροφυσικά Συμπαγή Αντικείμενα Άλω (Massive Astrophysical Compact Halo Objects – MACHOs). Ωστόσο, μια σειρά ερευνών, συμπεριλαμβανομένων των μελετών της Νουκλεοσύνθεσης της Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang Nucleosynthesis), καθώς και των παρατηρησιακών προγραμμάτων βαρυτικής μικροφακού, όπως το πείραμα EROS (Tisserand et al. 2007), σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του Διαστημικού Τηλεσκοπίου Hubble για τον εντοπισμό εξαιρετικά αμυδρών αστέρων (Graff & Freese, 1995), έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι τα MACHOs, ανεξαρτήτως κατηγορίας, δεν μπορούν να αντιστοιχούν παρά μόνο σε ένα μικρό ποσοστό της συνολικής σκοτεινής ύλης. Ως αποτέλεσμα, η σύγχρονη κοσμολογική έρευνα έχει στραφεί προς τη μελέτη μη βαρυονικής μορφής σκοτεινής ύλης, η οποία εκτιμάται ότι συγκροτείται από υποατομικά σωματίδια που μέχρι σήμερα δεν έχουν ανιχνευθεί πειραματικά.

Από την άλλη πλευρά, η σκοτεινή ενέργεια αποτελεί ακόμη πιο μυστηριώδες φαινόμενο. Η ανακάλυψή της συνδέεται με την παρατήρηση, στα τέλη της δεκαετίας

του 1990, ότι η διαστολή του Σύμπαντος δεν επιβραδύνεται, όπως αρχικά αναμενόταν, αλλά επιταχύνεται. Οι ανεξάρτητες έρευνες δύο ομάδων (Perlmutter et al. 1999; Riess et al. 1998) μέσω της μελέτης υπερκαινοφανών τύπου Ia, αποκάλυψαν ότι η βαρυτική έλξη της ύλης δεν επαρκεί για να ανακόψει τη διαστολή —αντίθετα, κάποια μορφή «αρνητικής πίεσης» φαίνεται να ωθεί τον χωρόχρονο σε επιταχυνόμενη διαστολή. Η άγνωστη αυτή μορφή ενέργειας, που διέπει σήμερα περίπου το 68,3% της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας του Σύμπαντος, ονομάστηκε σκοτεινή ενέργεια. Η φύση της παραμένει άγνωστη: μπορεί να συνδέεται με την κοσμολογική σταθερά ( $\Lambda$ ) που εισήγαγε ο Αϊνστάιν στις εξισώσεις της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, ή να αντιστοιχεί σε κάποια δυναμική πεδίου, όπως η ενέργεια του κβαντικού πεδίου ή ακόμη μπορεί να είναι μια ένδειξη ότι οι νόμοι της βαρύτητας χρειάζονται μια τροποποίηση σε κοσμικές κλίμακες.

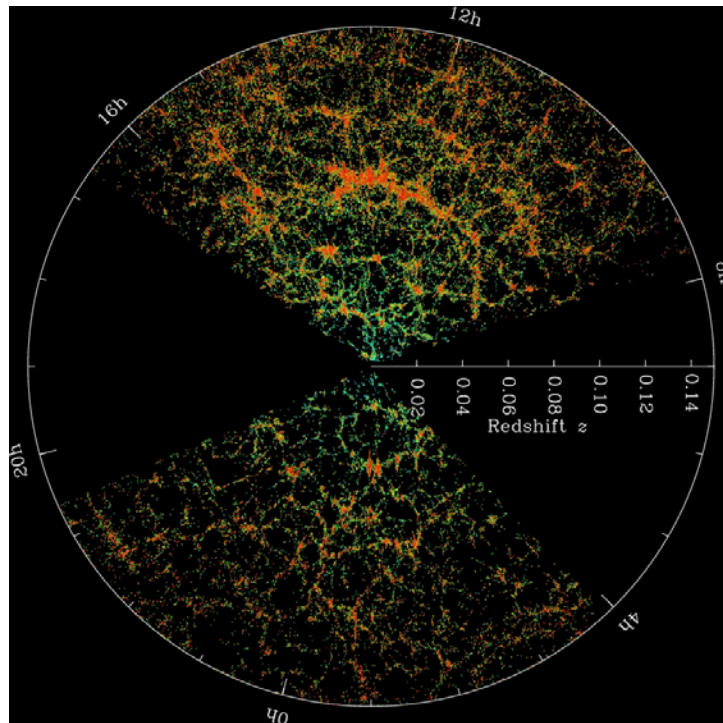
## 1.2 Το πλαίσιο της σύγχρονης κοσμολογίας και το Καθιερωμένο Πρότυπο ( $\Lambda$ CDM)

Τη δεκαετία του 1980 εμφανίστηκε από τρεις ανεξάρτητες ομάδες κοσμολόγων η θεωρία της Ψυχρής Σκοτεινής Ύλης (Cold Dark Matter – CDM). Το 1984 δημοσιεύτηκε ένα σημαντικό άρθρο ανασκόπησης το οποίο ανέπτυξε τις λεπτομέρειές της (Blumenthal et al. 1984). Η θεωρία προτείνει ότι η CDM είναι μια υποθετική μορφή ύλης, της οποίας τα σωματίδια είναι μη βαρυονικής φύσης, χωρίς συγκρούσεις (collisionless), κινούνται αργά σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός (επομένως είναι «ψυχρά») και αλληλεπιδρούν πολύ ασθενώς με την κανονική ύλη και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 προέκυψε μια επέκταση της θεωρίας CDM, το πρότυπο  $\Lambda$ CDM (Λάμδα – CDM). Το γράμμα  $\Lambda$  (λάμδα) αντιπροσωπεύει την κοσμολογική σταθερά, η οποία σήμερα συσχετίζεται με τη σκοτεινή ενέργεια που υπάρχει στο κενό του Σύμπαντος και είναι απαραίτητη για να εξηγηθεί η σύγχρονη επιταχυνόμενη διαστολή του, ενάντια στις ελκτικές επιδράσεις της βαρύτητας. Το πλαίσιο αυτό αναφέρεται συχνά ως το Καθιερωμένο Πρότυπο της Κοσμολογίας της Μεγάλης Έκρηξης, καθώς αποτελεί την απλούστερη θεωρία που δίνει μια ικανοποιητική περιγραφή των ιδιοτήτων του Σύμπαντος σε μεγάλες κλίμακες και σε διάφορες κοσμικές εποχές.

Η αναγκαιότητα ενσωμάτωσης αυτών των «σκοτεινών συνιστωσών» στο θεωρητικό πλαίσιο της κοσμολογίας οδήγησε λοιπόν στη διαμόρφωση του Καθιερωμένου Κοσμολογικού Προτύπου, γνωστού ως  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$  – Cold Dark Matter). Το πρότυπο αυτό βασίζεται στις εξισώσεις Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW), που περιγράφουν την εξέλιξη ενός επίπεδου, ομοιογενούς και ισότροπου Σύμπαντος, σύμφωνα με τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Η θεωρία  $\Lambda$ CDM πρεσβεύει ότι το Σύμπαν αναπτύχθηκε από μια ομαλή αρχική κατάσταση, στα πρώιμα στάδιά του (όπως φαίνεται από την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία

υποβάθρου), προς μια ανώμαλη – ανομοιογενή κατανομή γαλαξιών και σμηνών αυτών, δηλαδή προς τη μεγάλης κλίμακας δομή του Σύμπαντος. Τα παρατηρησιακά δεδομένα από το Sloan Digital Sky Survey (SDSS) έχουν αποκαλύψει αυτή τη μεγάλη δομή του παρατηρήσιμου Σύμπαντος, σε μια προσπάθεια χαρτογράφησης του Κόσμου.



**Εικόνα 1.2:** Ο χάρτης του Σύμπαντος όπως μετράται από την Επισκόπηση Ψηφιακού Ουρανού (Sloan Digital Sky Survey). Κάθε τελεία αντιπροσωπεύει έναν γαλαξία, με τον δικό μας να βρίσκεται στο κέντρο, ενώ η χρωματική κλίμακα δείχνει την τοπική πυκνότητα (περιοχές με περισσότερους ή λιγότερους γαλαξίες). Credit: Επισκόπηση Sloan Digital Sky, [www.sdss3.org/science/](http://www.sdss3.org/science/)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αριθμητικές προσομοιώσεις της μη γραμμικής βαρυτικής συσσώρευσης, σε Σύμπαντα όπου η ασθενώς αλληλεπιδρώσα ψυχρή σκοτεινή ύλη είναι άφθονη, οδήγησαν επίσης σε ανώμαλη κατανομή της σκοτεινής ύλης, με τον σχηματισμό νημάτων (filaments), υπερσμηνών από συσσωματώματα και εκτεταμένων περιοχών χαμηλής πυκνότητας (Davis et al. 1984). Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η βαρυονική ύλη (η κανονική ύλη) παγιδεύεται στο βαρυτικό δυναμικό που δημιουργεί η σκοτεινή ύλη και καταρρέει μέσα σε αυτό, οδηγώντας στον σχηματισμό γαλαξιών και σμηνών γαλαξιών. Το  $\Lambda$ CDM έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επιτυχές, καθώς ερμηνεύει με ενιαίο τρόπο τα περισσότερα σύγχρονα παρατηρησιακά δεδομένα, όπως το φάσμα ανισοτροπιών της CMB, τη στατιστική των γαλαξιών, τις μετρήσεις βαρυτικού φακού και τις αποστάσεις υπερκαινοφανών.

Ωστόσο, παρά την εντυπωσιακή του συμβατότητα με τα δεδομένα, το  $\Lambda$ CDM δεν παύει να είναι μια φαινομενολογική προσέγγιση, που περιγράφει μεν αλλά δεν εξηγεί σε θεμελιώδες επίπεδο τη φύση των σκοτεινών συνιστωσών. Το πρόβλημα της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας θέτει βαθιά ερωτήματα που αγγίζουν τα όρια της φυσικής των σωματιδίων, της θεωρίας των πεδίων και της βαρυτικής φυσικής. Τι είναι η σκοτεινή ύλη; Πρόκειται για άγνωστα σωματίδια πέραν του Καθιερωμένου Προτύπου της Σωματιδιακής Φυσικής, ή μήπως για κάποια τροποποίηση της ίδιας της βαρύτητας; Αντίστοιχα, είναι η σκοτεινή ενέργεια μια απλή κοσμολογική σταθερά ή μαρτυρά την ύπαρξη νέων πεδίων και μηχανισμών που δεν έχουμε ακόμη ανακαλύψει; Αυτά τα ερωτήματα παραμένουν ανοιχτά και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κατεύθυνση της σύγχρονης έρευνας.

### **1.3 Σκοπός – στόχος της παρούσης εργασίας**

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του ρόλου της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας στην εξέλιξη και τη γεωμετρία του Σύμπαντος, μέσα στο θεωρητικό πλαίσιο του Καθιερωμένου Κοσμολογικού Προτύπου  $\Lambda$ CDM. Η εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει με συστηματικό τρόπο τις θεωρητικές αρχές που διέπουν τη σύγχρονη κοσμολογία, να αναλύσει τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του χωροχρόνου και να εξετάσει τον τρόπο με τον οποίο οι σκοτεινές συνιστώσες καθορίζουν τη μορφολογία, την ανάπτυξη και την τελική μοίρα του Σύμπαντος.

Στόχος είναι η κατανόηση της συμβολής των σκοτεινών συστατικών στη συνολική κοσμική εξέλιξη —από τη δημιουργία των πρώτων δομών μέχρι τη σημερινή επιταχυνόμενη φάση διαστολής— καθώς και η διερεύνηση των θεωρητικών και παρατηρησιακών προεκτάσεων που απορρέουν από το Καθιερωμένο Πρότυπο. Παράλληλα, θα γίνει αναφορά στις σύγχρονες προσπάθειες ανίχνευσης της σκοτεινής ύλης, στις εναλλακτικές θεωρητικές προσεγγίσεις για τη σκοτεινή ενέργεια και στις αβεβαιότητες που εξακολουθούν να υφίστανται στη σημερινή κοσμολογική εικόνα.

Η κατανόηση της «σκοτεινής πλευράς» του Σύμπαντος δεν αποτελεί απλώς ένα επιμέρους ζήτημα της αστροφυσικής· είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα που συνδέει τη φυσική των πολύ μικρών κλιμάκων με τη φυσική των πολύ μεγάλων. Η επίλυσή του θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια βαθύτερη, ενοποιημένη περιγραφή της φύσης, αποκαλύπτοντας τις αρχές που διέπουν τόσο τη γέννηση όσο και την εξέλιξη του ίδιου του κοσμικού χώρου.

## 2. Θεμελιώδεις Αρχές Κοσμολογίας

### 2.1 Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας ως βάση της σύγχρονης κοσμολογίας

Όταν ο Einstein διαμόρφωσε τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΘΣ) το 1915, οι αστρονόμοι και ο ίδιος, θεωρούσαν ότι το Σύμπαν δεν μεταβάλλεται. Όμως, από τις εξισώσεις του προέκυψε ότι η βαρύτητα —προκαλώντας έλξη— θα οδηγούσε το Σύμπαν να καταρρεύσει, αν αυτό ήταν πραγματικά στατικό. Για να αποφύγει αυτό το αποτέλεσμα και να συμβιβάσει τη θεωρία του με την τότε επικρατούσα άποψη, ο Einstein πρόσθεσε το 1917 έναν νέο όρο στις εξισώσεις του: τη λεγόμενη κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ . Ο όρος αυτός λειτουργούσε σαν μία δύναμη που αντισταθμίζει τη βαρύτητα σε κοσμολογικές κλίμακες, επιτρέποντας ένα υποθετικό στατικό Σύμπαν. Όταν όμως ανακαλύφθηκε, από τον Edwin Hubble το 1929, ότι το Σύμπαν διαστέλλεται, ο Einstein τον αφαίρεσε και η εξίσωση πεδίου είχε την πιο απλή μορφή:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2.1)$$

Το 1998, μετά την ανακάλυψη ότι το Σύμπαν διαστέλλεται επιταχυνόμενα, η κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  επανεισήχθη στις εξισώσεις, περιγράφοντας το κυρίαρχο ενεργειακό συστατικό του Σύμπαντος – τη σκοτεινή ενέργεια. Η σύγχρονη κοσμολογία προκύπτει από τη σύνδεση της ΓΘΣ με την παρατηρησιακή αστρονομία μεγάλης κλίμακας. Σκοπός της κοσμολογίας είναι η κατανόηση της γεωμετρίας, της δυναμικής και της εξέλιξης του Σύμπαντος ως συνόλου. Σε κοσμολογικές κλίμακες, η ΓΘΣ αποτελεί το θεωρητικό πλαίσιο του Καθιερωμένου Προτύπου της Κοσμολογίας ( $\Lambda$ CDM), το οποίο ενσωματώνει τη σκοτεινή ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια ενώ ταυτόχρονα συνδέει τη γεωμετρία του χωροχρόνου με το περιεχόμενό του σε ύλη και ενέργεια μέσω των εξισώσεων πεδίου του Einstein (Grøn & Hervik, 2007; Peacock, 1999):

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

όπου

- $G_{\mu\nu}$ : ο τανυστής Einstein, με μονάδες  $1/\mu\eta\kappa\omicron\varsigma^2$ , που ενσωματώνει την καμπύλωση του χωροχρόνου και ισούται με  $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$ , όπου  $R_{\mu\nu}$  είναι ο τανυστής Ricci, που συνοψίζει την καμπύλωση του χωροχρόνου περιγράφοντας πώς συγκλίνουν ή αποκλίνουν οι γεωδαισιακές ροές σε κάποιο σημείο του χωροχρόνου και  $R$  είναι η βαθμωτή καμπυλότητα (scalar curvature), δηλαδή ένας μοναδικός αριθμός που ορίζεται σε κάθε σημείο του χωροχρόνου και συνοψίζει πώς αυτός καμπυλώνεται γύρω από το συγκεκριμένο σημείο.

- $\Lambda$ : η κοσμολογική σταθερά, με μονάδες  $1/\mu\eta\kappa\omicron\varsigma^2$ , που σχετίζεται με τη σκοτεινή ενέργεια (Dodelson & Schmidt, 2020),
- $T_{\mu\nu}$ : ο τανυστής ενέργειας – ορμής,
- $g_{\mu\nu}$ : ο μετρικός τανυστής, ένα θεμελιώδες μαθηματικό αντικείμενο που περιγράφει τη γεωμετρία του χωροχρόνου
- $G$ : η βαρυτική σταθερά του Νεύτωνα και
- $c$ : η ταχύτητα του φωτός.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να πάρει την τανυστική μορφή:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (2.3)$$

όπου

- $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$  η βαρυτική σταθερά του Einstein με τιμή περίπου  $2,07665 \cdot 10^{-43} \text{ m}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{s}^2$ .

Η έκφραση στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (2.1) αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα του χωροχρόνου όπως καθορίζεται από τη μετρική, η οποία περιγράφει τη γεωμετρία του χωροχρόνου, δίνοντας την απόσταση μεταξύ γειτονικών σημείων στον χωροχρόνο, ενώ η έκφραση στο δεξιό της μέρος αντιπροσωπεύει το περιεχόμενο ενέργειας – ορμής του χωροχρόνου. Ουσιαστικά αυτό που περιγράφουν οι εξισώσεις πεδίου είναι το γεγονός πως η ύλη και η ενέργεια καθορίζουν την καμπυλότητα του χωροχρόνου, ενώ η καμπυλότητα του χωροχρόνου υπαγορεύει τις γεωδαισιακές τροχιές των υλικών συστημάτων. Να σημειώσουμε ότι η παραπάνω τανυστική εξίσωση αντιστοιχεί ουσιαστικά σε 10 διαφορετικές διαφορικές εξισώσεις, λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν οι τανυστές που περιέχει. Παρ' όλα αυτά η ταυτότητα Bianchi,  $\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 0$ , επιβάλλει 4 περιορισμούς στον τανυστή  $G_{\mu\nu}$ . Έτσι υπάρχουν στην πραγματικότητα μόνο έξι ανεξάρτητες δυναμικές εξισώσεις στη σχέση (2.2) οι οποίες μας λένε πως η καμπυλότητα του χωροχρόνου αντιδρά στην παρουσία ενέργειας και ορμής. (Carroll, 1997).

Οι εξισώσεις πεδίου του Einstein δεν εισάγουν άμεσα τη σκοτεινή ύλη ή τη σκοτεινή ενέργεια. Ωστόσο, όταν εφαρμόζονται στην κοσμική δυναμική και συγκριθούν με τις παρατηρήσεις, προκύπτει ότι η ορατή ύλη και ενέργεια δεν επαρκούν για να εξηγήσουν την παρατηρούμενη καμπυλότητα και εξέλιξη του Σύμπαντος. Έτσι, η ύπαρξη σκοτεινής ύλης και σκοτεινής ενέργειας συμπεραίνεται έμμεσα.

Για να επιλυθούν οι εξισώσεις σε κοσμολογική κλίμακα, υιοθετούνται δύο θεμελιώδεις συμμετρικές αρχές που απλοποιούν το πρόβλημα χωρίς να αναιρούν την φυσική ρεαλιστικότητα. Αυτές είναι η **ομοιογένεια** και η **ισοτροπία**. Οι αρχές αυτές, γνωστές συλλογικά ως **Κοσμολογική Αρχή**, επιτρέπουν την αντικατάσταση της

πραγματικής, ανώμαλης κατανομής ύλης με ένα εξιδανικευμένο συνεχές μέσο. Υπό αυτές τις παραδοχές προκύπτει η μετρική **Friedmann – Lemaître – Robertson – Walker (FLRW)**, η οποία περιγράφει ένα Σύμπαν που διαστέλλεται ή συστέλλεται με τρόπο ανεξάρτητο του χωρικού σημείου και της διεύθυνσης. Η Κοσμολογική Αρχή έχει το εναλλακτικό όνομα «Αρχή του Κοπέρνικου», ως φόρο τιμής στον Κοπέρνικο, ο οποίος τόνισε ότι η Γη δεν είναι το κέντρο του σύμπαντος. Αργότερα, οι κοσμολόγοι επισήμαναν επίσης ότι ο Ήλιος δεν είναι το κέντρο, ότι ο Γαλαξίας μας δεν είναι το κέντρο και ότι η Τοπική Ομάδα Γαλαξιών δεν είναι το κέντρο. Στην πραγματικότητα, το Σύμπαν δεν διαθέτει προνομιούχο κέντρο ή κατεύθυνση (Ryden, 2017).

## 2.2 Οι αρχές της ομοιογένειας και ισοτροπίας

### 2.2.1 Αρχή της ομοιογένειας (Homogeneity Principle)

Η αρχή της ομοιογένειας διατυπώνει ότι:

Σε επαρκώς μεγάλες κλίμακες (άνω των  $\sim 100 - 150 \text{ Mpc}^1$ ), το Σύμπαν παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή ύλης και ενέργειας καθώς επίσης και τις ίδιες φυσικές ιδιότητες, χωρίς προνομιούχες περιοχές. Κάθε δεδομένη περιοχή του Σύμπαντος περιέχει περίπου την ίδια ποσότητα και τύπους ύλης με οποιαδήποτε άλλη αντίστοιχη περιοχή, και δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο κέντρο ή όριο.

Με άλλα λόγια, η μέση πυκνότητα ύλης και η ενεργειακή πυκνότητα είναι ίδιες σε οποιοδήποτε σημείο του χωροχρόνου, όταν θεωρηθούν σε κοσμικές κλίμακες. Παρότι σε μικρότερες κλίμακες υπάρχουν δομές — γαλαξίες, σμήνη και κενά — αυτές αποτελούν τοπικές αποκλίσεις που εξομαλύνονται στατιστικά.

Η ομοιογένεια επιβεβαιώνεται παρατηρησιακά μέσω:

- της κατανομής γαλαξιών σε κλίμακες άνω των  $\sim 100 - 150 \text{ Mpc}$ , όπου η δομή του Σύμπαντος προσεγγίζει στατιστική ομοιογένεια. (Hogg et al. 2005, DESI Collaboration 2025),
- και της ισοκατανομής της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου (CMB) (Partridge & Wilkinson 1967, Wilson & Penzias 1967)

Από μαθηματικής άποψης η ομοιογένεια εκφράζεται ως εξής:

$$\rho(\mathbf{r}) = \rho_0 = \text{σταθερή (στατιστικά, σε μεγάλες κλίμακες)}$$

όπου  $\rho(\mathbf{r})$  η πυκνότητα της ύλης στο σημείο  $\mathbf{r}$ .

---

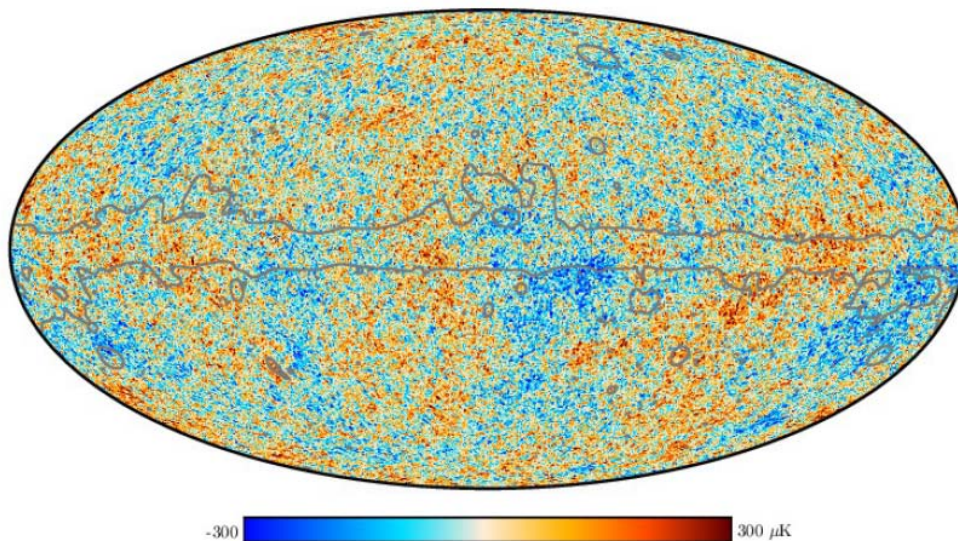
<sup>1</sup>  $1 \text{ Mpc} \approx 3,6 * 10^6$  έτη φωτός

### 2.2.2 Αρχή της ισοτροπίας (Isotropy Principle)

Η αρχή της ισοτροπίας δηλώνει ότι:

Οι ιδιότητες του Σύμπαντος είναι ανεξάρτητες της κατεύθυνσης: δηλαδή, το Σύμπαν εμφανίζεται ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις για έναν παρατηρητή που δεν έχει ιδία κίνηση ως προς το κοσμικό υπόβαθρο, δηλαδή για έναν παρατηρητή που δεν έχει σχετική ταχύτητα ως προς αυτό. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το Σύμπαν δεν φαίνεται καθόλου ισότροπο σε παρατηρητές που κινούνται με ταχύτητα συγκρίσιμη με την ταχύτητα του φωτός λόγω σχετικιστικών φαινομένων. Γι' αυτό στις κοσμολογικές εξισώσεις θεωρούμε παρατηρητές στο σύστημα ηρεμίας του CMB (Weinberg, 2008).

Η πιο ισχυρή επιβεβαίωση της κοσμικής ισοτροπίας προέρχεται από το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο, το οποίο εμφανίζει ανισοτροπίες της τάξης του  $10^{-5}$ , αφού αφαιρεθεί ο διπολικός όρος που οφείλεται στην κίνηση της Γης ως προς το σύστημα ηρεμίας του CMB (Planck Collaboration, VI, 2021). Οι ανισοτροπίες του κοσμικού μικροκυματικού υποβάθρου πρωτοανιχνεύθηκαν από τον δορυφόρο Cosmic Background Explorer (COBE) και σχετίζονται με την ύπαρξη σκοτεινής ύλης όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, (Smoot et al. 1992).

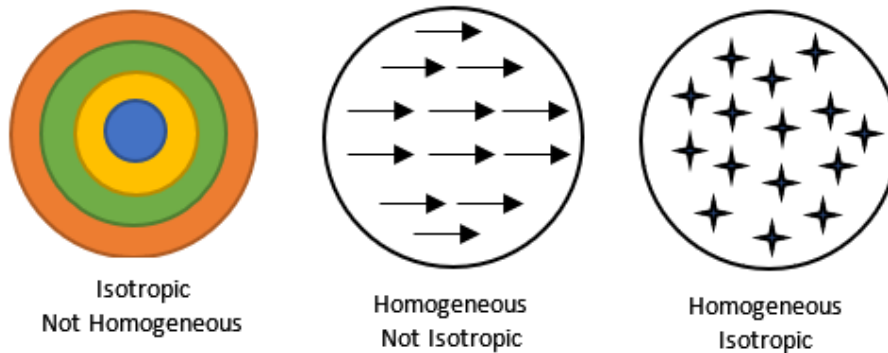


**Εικόνα 2.1:** Χάρτης ολόκληρου ουρανού των ανισοτροπιών του Κοσμικού Μικροκυματικού Υποβάθρου (CMB), που δείχνει τις μικρές διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία ( $\sim 2,725$  K). Τα μπλε χρώματα αντιστοιχούν σε ψυχρότερες περιοχές, ενώ τα κόκκινα σε θερμότερες, με διακυμάνσεις της τάξης των  $10^{-5}$ , μετά την αφαίρεση του διπολικού όρου που οφείλεται στην κίνηση της Γης. Αυτές οι ανισοτροπίες παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την αρχική κατάσταση και τη δομή του πρώιμου Σύμπαντος. Credit: Planck Collaboration, VI, (2021).

### 2.2.3 Η κοσμολογική αρχή

Ο συνδυασμός των δύο αυτών υποθέσεων συνιστά λοιπόν την Κοσμολογική Αρχή (Cosmological Principle), σύμφωνα με την οποία:

«Σε μεγάλη κλίμακα, το Σύμπαν είναι ομοιογενές και ισότροπο για όλους τους παρατηρητές που βρίσκονται σε αδρανειακή κίνηση μαζί με τη μέση ροή της ύλης (δηλαδή, με την κοσμική ροή).»



**Εικόνα 2.2:** Στα τρία αυτά σχήματα βλέπουμε τη διαφορά μεταξύ ισοτροπίας και ομοιογένειας. **Αριστερά** η εικόνα φαίνεται ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις, όμως σε διαφορετικά σημεία αλλάζει η κατανομή άρα δεν είναι ομοιογενής. **Στο κέντρο** όλα τα βέλη έχουν την ίδια κατανομή, αλλά υπάρχει μια προτιμώμενη κατεύθυνση, άρα όχι ισότροπο. **Δεξιά** τα σχήματα είναι κατανομημένα ομοιόμορφα και χωρίς καμία προτιμώμενη κατεύθυνση. Ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις (ισότροπο) και ίδια σε όλα τα σημεία (ομοιογενές). Credit: Forsyth Astronomical Society

Η υπόθεση της κοσμικής ομοιογένειας και ισοτροπίας περιορίζει δραστικά τις δυνατές γεωμετρίες του Σύμπαντος και επιτρέπει την περιγραφή του μέσω της μετρικής FLRW. Η μετρική αυτή εξαρτάται από μια συνάρτηση του χρόνου  $a(t)$ , που ονομάζεται παράγοντας κλίμακας (scale factor), η οποία περιγράφει τις χρονικά μεταβαλλόμενες αποστάσεις στο Σύμπαν και από μια σταθερή παράμετρο καμπυλότητας  $k$ , που καθορίζει την τρισδιάστατη χωρική γεωμετρία (επίπεδη, κλειστή ή ανοιχτή). Η FLRW μετρική δεν αποτελεί καθαυτή λύση των εξισώσεων πεδίου του Einstein, αλλά όταν εισαχθεί σε αυτές, σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο πρότυπο ύλης (π.χ. τέλειο ρευστό), οδηγεί στις δύο εξισώσεις Friedmann που θα συναντήσουμε σε επόμενη παράγραφο. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τη δυναμική του παράγοντα κλίμακας και δείχνουν ότι ένα Σύμπαν που ικανοποιεί τις υποθέσεις της ομοιογένειας και ισοτροπίας δεν μπορεί να παραμείνει στατικό, αλλά πρέπει να διαστέλλεται ή να συστέλλεται. Η πρόβλεψη της κοσμικής διαστολής του Σύμπαντος, την οποία ανέπτυξε θεωρητικά το 1927 ο George Lemaître, βασισμένος στις εξισώσεις του Einstein επιβεβαιώθηκε εμπειρικά από την παρατήρηση της ερυθρομετάθεσης των γαλαξιών από τον Edwin Hubble το 1929. Μέσω των παρατηρήσεων αυτών ανακάλυψε ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης ενός γαλαξία είναι

ανάλογη της απόστασης στην οποία βρίσκεται:  $\vec{v} = H_0 \vec{r}$ . Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως ο νόμος του Hubble και η σταθερά αναλογίας, για την οποία θα μιλήσουμε παρακάτω, είναι γνωστή ως σταθερά του Hubble. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε στη διαμόρφωση της σύγχρονης κοσμολογικής εικόνας της Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang), μαζί με πρόσθετες ενδείξεις όπως η κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου και η αφθονία των ελαφρών στοιχείων. Επιπλέον, η εισαγωγή της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$  στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας συνδέεται σήμερα με την έννοια της σκοτεινής ενέργειας, η οποία θεωρείται υπεύθυνη για την παρατηρούμενη επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος.

## 2.3 Η Μετρική FLRW και η Καμπυλότητα του Χώρου

### 2.3.1 Η μετρική FLRW

Η κοσμολογία, όπως αναφέραμε και στην παραπάνω παράγραφο, βασίζεται στην υπόθεση της κοσμικής ομοιογένειας και ισοτροπίας, γνωστή και ως Κοσμολογική Αρχή (**Cosmological Principle**), σύμφωνα με την οποία το Σύμπαν είναι ομοιογενές και ισότροπο σε μεγάλες κλίμακες. Επομένως ο χώρος σε κάθε χρονική στιγμή πρέπει να είναι τρισδιάστατος και με σταθερή καμπυλότητα. Αυτή η υπόθεση περιορίζει σημαντικά τις δυνατές γεωμετρίες του Σύμπαντος και επιτρέπει τη χρήση μιας απλής, αλλά ισχυρής μετρικής για την περιγραφή του: της **Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) μετρικής** η οποία εκφράζει τις συμμετρίες του.

Η μετρική FLRW έχει τη μορφή (Carroll, 2004) :

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad (2.4)$$

όπου πλέον έχει τεθεί  $c = 1$  για απλοποίηση των εξισώσεων και όπου:

- $a(t)$  : ο παράγοντας κλίμακας, που περιγράφει τη διαστολή του Σύμπαντος,
- $k$  : η παράμετρος καμπυλότητας του χωροχρόνου με τιμές:  $k = +1, 0, -1$ .
- $t$  : ο κοσμικός χρόνος
- $(r, \theta, \phi)$  : οι σφαιρικές χωρικές συντεταγμένες
- $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$  : το θεμελιώδες μέτρο απόστασης στον χωροχρόνο, που συνδυάζει μεταβολές στο χρόνο και στο χώρο λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα και τη διαστολή του Σύμπαντος (μέσω του  $a(t)$ ).

Χωρίζοντας το χωροχρόνο στις δύο του συνιστώσες, το χρόνο και το χώρο, έχουμε:

$$ds^2 = -dt^2 + g_{ij}(t, x^k) dx^i dx^j \quad (2.5)$$

Το πρώτο μέρος,

$$-dt^2$$

περιγράφει τη χρονική συνιστώσα, ενώ το χωρικό μέρος,

$$g_{ij}(t, x^k) dx^i dx^j \quad (\text{με } i, j = 1, 2, 3)$$

περιγράφει τη γεωμετρία του τρισδιάστατου χώρου, η οποία μεταβάλλεται με τον χρόνο μέσω του  $a(t)$ .

### 2.3.2 Ο μετρικός τανυστής $g_{\mu\nu}$

Για έναν επίπεδο (μη καμπύλο) χωροχρόνο η μετρική που χρησιμοποιούμε λέγεται μετρική Minkowski, χρησιμοποιώντας τη σύμβαση  $(-, +, +, +)$ . Σε καρτεσιανές συντεταγμένες γράφεται:

$$ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (2.6)$$

και επομένως ο μετρικός τανυστής είναι:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\{-1, 1, 1, 1\} \quad (2.7)$$

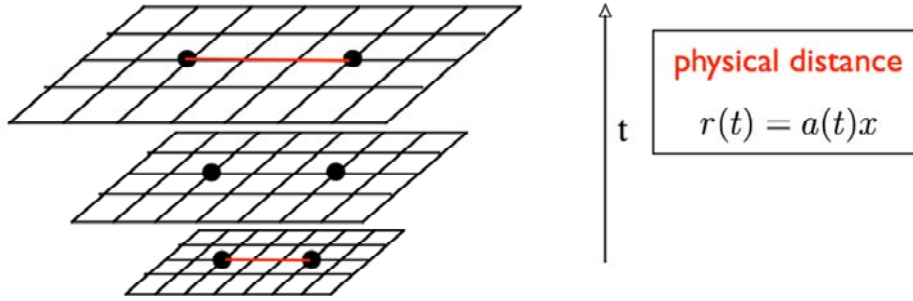
Εάν περιγράψουμε τον επίπεδο χωροχρόνο σε σφαιρικές συντεταγμένες ο χωρικός όρος γίνεται:

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (2.8)$$

οπότε:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\{-1, 1, r^2, r^2 \sin^2 \theta\} \quad (2.9)$$

Η Κοσμολογική Αρχή ενώ περιγράφει ένα Σύμπαν χωρικά ισοτροπικό και ομοιογενές επιβάλλει συμμετρίες μόνο ως προς τον χώρο, όχι ως προς τον χρόνο. Έτσι μπορούμε να επιτρέψουμε η κλίμακα του χώρου (δηλαδή η απόσταση μεταξύ σημείων στον χώρο) να αλλάζει με τον χρόνο.



**Εικόνα 2.3:** Αναπαράσταση της διαστολής του χώρου σε ένα πλέγμα συνεπιβατικών συντεταγμένων. Τα μαύρα σημεία παραμένουν σε σταθερές συνεπιβατικές θέσεις, ενώ οι κόκκινες γραμμές δείχνουν την φυσική απόσταση μεταξύ των ίδιων δύο σημείων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Καθώς ο παράγοντας κλίμακας  $a(t)$  αυξάνεται, η φυσική απόσταση  $r(t) = a(t)x$  μεγαλώνει, παρότι οι συνεπιβατικές συντεταγμένες  $x$  παραμένουν σταθερές. Η εικόνα αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο η διαστολή του Σύμπαντος τεντώνει τον χώρο και απομακρύνει αντικείμενα που δεν κινούνται το ένα ως προς το άλλο. Credit: Sean McGee, School of Physics and Astronomy – University of Birmingham.

Αυτή η αλλαγή περιγράφεται μαθηματικά με έναν «παράγοντα κλίμακας» (scale factor),  $a(t)$ , ο οποίος πολλαπλασιάζει το χωρικό μέρος του μετρικού τανυστή.

Για ένα επίπεδο (δηλαδή  $k = 0$ ) ισότροπο και ομοιογενές Σύμπαν:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\{-1, a^2(t), a^2(t)r^2, a^2(t)r^2 \sin^2\theta\} \quad (2.10)$$

Η γεωμετρία όμως ενός ισοτροπικού και ομοιογενούς Σύμπαντος εκτός από επίπεδη θα μπορούσε να είναι είτε σφαιρική (κλειστό σύμπαν) είτε υπερβολική (ανοιχτό σύμπαν). Για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει ο αντίστοιχος με τη σχέση (2.10) μετρικός τανυστής  $g_{\mu\nu}$ .

Εισάγοντας την παράμετρο  $k$ , όμως μας δίνεται η δυνατότητα να συνδιάσουμε τις τρεις μετρικές σε μία, ανάλογα με την τιμή αυτής της παραμέτρου. Οι δυνατές τιμές της, όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι  $\{+1, 0, -1\}$  και ο μετρικός τανυστής παίρνει τη μορφή:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\left\{-1, \frac{a^2(t)}{1-kr^2}, a^2(t)r^2, a^2(t)r^2 \sin^2\theta\right\} \quad (2.11)$$

Ο τανυστής  $g_{\mu\nu}$  λοιπόν είναι διαγώνιος με όλα τα στοιχεία εκτός διαγωνίου να ισούνται με μηδέν:  $g_{\mu\nu} = 0 \quad \mu \neq \nu$ . Αποτελείται από το χρονικό στοιχείο  $g_{00} = -1$  και τα χωρικά στοιχεία  $g_{rr}, g_{\theta\theta}, g_{\varphi\varphi}$  που βρίσκονται στη διαγώνιο του πίνακα.

### 2.3.3 Η παράμετρος καμπυλότητας $k$

Η παράμετρος καμπυλότητας  $k$  λοιπόν καθορίζει τη γεωμετρία του τρισδιάστατου χωρικού τμήματος, αναλόγως την τιμή της:

- $k = 0$  (Επίπεδη γεωμετρία): Το Σύμπαν είναι Ευκλείδειο, οι ευθείες παραμένουν παράλληλες σε μεγάλες αποστάσεις.
- $k = +1$  (Σφαιρική γεωμετρία): Ο χώρος είναι κλειστός και έχει πεπερασμένο όγκο, οι ευθείες τελικά τέμνονται.
- $k = -1$  (Υπερβολική γεωμετρία): Ο χώρος είναι ανοιχτός και άπειρος, οι ευθείες αποκλίνουν.

Η μετρική FLRW είναι η βάση της σύγχρονης κοσμολογίας και παρέχει την απλούστερη μαθηματική περιγραφή του Σύμπαντος υπό τις υποθέσεις ομοιογένειας και ισοτροπίας. Η καμπυλότητα  $k$  και ο παράγοντας κλίμακας  $a(t)$  περιγράφουν πλήρως την τρισδιάστατη γεωμετρία και την κοσμική διαστολή, επιτρέποντας τη διατύπωση των εξισώσεων Friedmann, οι οποίες συνδέουν τη δυναμική της διαστολής με το ενεργειακό περιεχόμενο του Σύμπαντος (ύλη, ακτινοβολία, σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια).

## 2.4 Οι εξισώσεις Friedmann και η εξίσωση συνέχειας ( ρευστού )

Αφού ορίσαμε τη μετρική Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW), είμαστε τώρα σε θέση να εξετάσουμε πώς η γεωμετρία του Σύμπαντος συνδέεται με το ενεργειακό του περιεχόμενο. Η δυναμική της κοσμικής διαστολής καθορίζεται από τις εξισώσεις πεδίου της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein που είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (2.12)$$

### 2.4.1 Ο τανυστής ενέργειας – ορμής

Στην κοσμολογία θεωρούμε ότι το περιεχόμενο του Σύμπαντος μπορεί να προσεγγιστεί ως **τέλειο ρευστό**, το οποίο χαρακτηρίζεται από ενεργειακή πυκνότητα  $\rho$  και πίεση  $p$ . Ένα τέλειο ρευστό είναι ομογενές και ισότροπο, δεν εμφανίζει ιξώδες, τριβές ή θερμική αγωγιμότητα, και μεταφέρει ενέργεια και ορμή αποκλειστικά μέσω της τετραταχύτητάς του  $u_\mu$ .

Η πίεση του ρευστού συμβάλλει στη βαρύτητα, και γι' αυτό ο τανυστής ενέργειας – ορμής περιλαμβάνει έναν όρο αναλογικό με το μετρικό τανυστή  $g_{\mu\nu}$ .

Έτσι, ο τανυστής ενέργειας – ορμής ενός τέλειου ρευστού είναι (Misner, Thorne & Wheeler, 1973; Carroll, 2004):

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu} \quad (2.13)$$

Ο πρώτος όρος  $(\rho + p)u_{\mu}u_{\nu}$  περιγράφει τη ροή ενέργειας και ορμής λόγω της κίνησης του ρευστού, ενώ ο δεύτερος όρος  $pg_{\mu\nu}$  εκφράζει την ισότροπη πίεση που ασκεί το ρευστό σε κάθε κατεύθυνση.

Στο σύστημα ηρεμίας του ρευστού, ο τανυστής ενέργειας – ορμής έχει διαγώνια μορφή:

$$T^{\mu}_{\nu} = \text{diag}\{-\rho, p, p, p\} \quad (2.14)$$

η οποία εκφράζει την ενεργειακή πυκνότητα στο χρονικό της μέρος και την ισότροπη πίεση στο χωρικό.

#### 2.4.2 Η πρώτη εξίσωση Friedmann

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις πεδίου (σχέση 2.12) τη μετρική FLRW (σχέση 2.4) και τον τανυστή ενέργειας – ορμής (σχέση 2.13), προκύπτει η πρώτη εξίσωση Friedmann<sup>2</sup>, που περιγράφει την ταχύτητα διαστολής/συστολής του Σύμπαντος μέσω της εξέλιξης του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ . Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο Friedmann δημοσίευσε τα πρώτα του αποτελέσματα, που υποδήλωναν ένα διαστελλόμενο ή συστελλόμενο Σύμπαν, επτά χρόνια πριν ο Hubble δημοσιεύσει τον νόμο του Hubble, το 1929 (Ryden, 2017).

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.15)$$

όπου:

- $\dot{a} = \frac{da}{dt}$ : ο ρυθμός μεταβολής του παράγοντα κλίμακας.
- $\frac{8\pi G}{3}\rho$ , όρος που περιγράφει τη συμβολή της ενεργειακής πυκνότητας της ύλης και της ακτινοβολίας που δρα βαρυτικά και τείνει να επιβραδύνει τη διαστολή (μεγαλύτερη τιμή της πυκνότητας  $\rho$  συνεπάγεται και μεγαλύτερη επιβράδυνση του Σύμπαντος).

<sup>2</sup> Μια πιο λεπτομερή εξαγωγή της πρώτης εξίσωσης Friedmann, μέσω της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας αλλά και μέσω της βαρύτητας του Νεύτωνα, θα βρείτε στο Α΄ Παράρτημα (Liddle, 2015).

- $-\frac{k}{a^2}$ , όρος που δείχνει πώς η καμπυλότητα  $k$  επηρεάζει τη διαστολή: θετική καμπυλότητα μειώνει την ταχύτητα διαστολής, ενώ αρνητική την αυξάνει.
- $\frac{\Lambda}{3}$ , όρος που αντιπροσωπεύει τη σκοτεινή ενέργεια που αντιστρατεύεται τη βαρύτητα και επιταχύνει τη διαστολή του Σύμπαντος. Στην εξίσωση αυτή εφόσον έχουμε θεωρήσει  $c = 1$ , η μονάδα μέτρησης του  $\Lambda$  είναι  $[\text{χρόνος}]^{-2}$  η οποία ταυτίζεται με τη μονάδα  $[\text{μήκος}]^{-2}$ . Η τιμή της είναι θετική και έχει υπολογιστεί ίση με  $1,0 \cdot 10^{-35} \text{ s}^{-2}$  όπως θα δούμε παρακάτω.

### 2.4.3 Η εξίσωση συνέχειας ( ρευστού )

Αν και θεμελιώδης, η εξίσωση Friedmann από μόνη της δεν αρκεί· χρειάζεται να συνοδεύεται από μια σχέση που να δείχνει πώς η πυκνότητα  $\rho$  της ύλης στο Σύμπαν αλλάζει και εξελίσσεται με τον χρόνο  $\rho \equiv \rho(t)$ . Η σχέση αυτή, η οποία περιλαμβάνει και την πίεση  $p$  της ύλης, είναι γνωστή ως εξίσωση συνέχειας. Ένας τρόπος για να εξαχθεί είναι μέσω της διατήρησης ενέργειας – ορμής:  $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$ .

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0 \quad (2.16)$$

Από τη στιγμή που θα καθοριστεί η καταστατική εξίσωση, η εξίσωση Friedmann και η εξίσωση συνέχειας αρκούν για να περιγραφεί η εξέλιξη του Σύμπαντος. Η συνήθης υπόθεση στην κοσμολογία είναι ότι υπάρχει μια μοναδική πίεση που σχετίζεται με κάθε πυκνότητα, έτσι ώστε  $p \equiv p(\rho)$ . Μια τέτοια σχέση είναι γνωστή ως καταστατική εξίσωση.

### 2.4.4 Η δεύτερη εξίσωση Friedmann

Η δεύτερη εξίσωση Friedmann, η οποία περιγράφει την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της διαστολής του Σύμπαντος, προκύπτει από την πρώτη εξίσωση Friedmann (σχέση 2.15) και από την εξίσωση συνέχειας (σχέση 2.16):

Παραγωγίζοντας τη σχέση (2.15) ως προς το χρόνο και αντικαθιστώντας το  $\dot{\rho}$  που εμφανίζεται στη σχέση (2.16), μετά από λίγες πράξεις λαμβάνουμε:

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.17)$$

όπου:

- $\ddot{a}$  η επιτάχυνση/επιβράδυνση της διαστολής και  $\frac{\ddot{a}}{a}$  ο ρυθμός επιτάχυνσης της διαστολής ανά μονάδα μεγέθους του Σύμπαντος.

- θετικός  $\Rightarrow$  η διαστολή επιταχύνεται
- αρνητικός  $\Rightarrow$  η διαστολή επιβραδύνεται
- $-\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$ , όρος που εμποδίζει τη διαστολή του Σύμπαντος λόγω της ύπαρξης ύλης και ενέργειας.
- $\frac{\Lambda}{3}$ , όρος που σχετίζεται με μια μορφή ενέργειας του κενού (σκοτεινή ενέργεια) που ενισχύει τη διαστολή.

#### 2.4.5 Η συνθήκη επιτάχυνσης της κοσμικής διαστολής και ο ρόλος της πίεσης

Η δεύτερη εξίσωση Friedmann (σχέση 2.17) δείχνει ότι η επιτάχυνση ή επιβράδυνση της διαστολής καθορίζεται από τον όρο  $(\rho + 3p)$ , γεγονός που αποτελεί άμεση συνέπεια της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, όπου τόσο η ενέργεια όσο και η πίεση συνεισφέρουν στη βαρυτική δυναμική (Carroll, 2004; Ryden, 2017). Συγκεκριμένα στη σχέση:

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.18)$$

ο όρος  $-\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$  εκφράζει τη βαρυτική επίδραση του περιεχομένου του Σύμπαντος. Η παρουσία του  $3p$  μαρτυρά ότι η πίεση δρα ως επιπλέον πηγή βαρύτητας (Mukhanov, 2005).

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι για να είναι η διαστολή επιταχυνόμενη απαιτείται:

$$\frac{\ddot{a}}{a} > 0 \Rightarrow \rho + 3p < 0 \quad (2.19)$$

Εισάγοντας την εξίσωση κατάστασης:

$$p = w\rho \quad (2.20)$$

όπου  $w$  μια σταθερά, η συνθήκη γράφεται:

$$w < -\frac{1}{3} \quad (2.21)$$

Το αποτέλεσμα αυτό είναι καθοριστικό για την κατανόηση της κοσμικής επιτάχυνσης: μόνο ρευστά με επαρκώς αρνητική πίεση μπορούν να την προκαλέσουν (Caldwell, Dave & Steinhardt, 1998). Έτσι:

- **Για τη μη σχετικιστική ύλη:**

$w = 0$  και  $\rho + 3p > 0$ : το Σύμπαν επιβραδύνει τη διαστολή του

- **Για την ακτινοβολία:**

$w = 1/3$ , και  $\rho + 3p > 0$ : το Σύμπαν επίσης επιβραδύνει τη διαστολή του

• Για τη σκοτεινή ενέργεια:

$w \simeq -1$  και  $\rho + 3p < 0$ : το Σύμπαν επιταχύνεται (Planck Collaboration, VI, 2021).

Η πίεση συνεπώς δεν είναι αμελητέα: σε κοσμολογικές κλίμακες αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της δυναμικής της διαστολής.

#### 2.4.6 Η εξέλιξη της πυκνότητας $\rho(a)$ και του παράγοντα κλίμακας

Για να κατανοήσουμε πώς μεταβάλλεται η πυκνότητα της ύλης και της ενέργειας καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται, συνδυάζουμε την εξίσωση συνέχειας (σχέση 2.16):

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0 \quad (2.22)$$

με την καταστατική εξίσωση (2.20):

$$p = w\rho$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη βασική περιγραφή ενός κοσμικού ρευστού (Dodelson & Schmidt, 2020· Mukhanov, 2005).

#### Εξέλιξη της πυκνότητας σε σχέση με το μέγεθος του Σύμπαντος

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.22) την καταστατική εξίσωση, παίρνουμε:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\rho(1 + w) = 0 \quad (2.23)$$

Για τον παράγοντα Hubble, όπως θα δούμε παρακάτω, γνωρίζουμε ότι:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \Rightarrow \frac{da}{dt} = Ha \quad (2.24)$$

Επομένως η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H\rho(1 + w) \quad (2.25)$$

Κάνοντας αλλαγή μεταβλητής  $t \rightarrow a$ , δηλαδή  $\frac{d\rho}{da} \frac{da}{dt}$ , αντικαθιστώντας τη σχέση 2.24 και απλοποιώντας έχουμε:

$$\frac{d\rho}{da} = -3(1 + w)\frac{\rho}{a} \quad (2.26)$$

Διαχωρίζοντας τις μεταβλητές,

$$\frac{d\rho}{\rho} = -3(1 + w)\frac{da}{a} \quad (2.27)$$

και ολοκληρώνοντας και τα δύο μέλη, παίρνουμε:

$$\int \frac{d\rho}{\rho} = -3(1+w) \int \frac{da}{a} \quad (2.28)$$

$$\ln \rho = -3(1+w) \ln a + C' \quad (2.29)$$

Χρησιμοποιώντας ιδιότητες εκθετικών, καταλήγουμε στη σχέση:

$$e^{\ln \rho} = e^{-3(1+w) \ln a + C'} \Rightarrow e^{\ln \rho} = e^{-3(1+w) \ln a} e^{C'} \Rightarrow \rho = a^{-3(1+w)} e^{C'} \quad (2.30)$$

και θέτοντας  $e^{C'} = C$ , καταλήγουμε:

$$\rho(a) = C a^{-3(1+w)} \quad (2.31)$$

Στις εξισώσεις που επιλύουμε (για  $k = 0$ ) εμφανίζεται μόνο ο συνδιασμός  $\frac{\dot{a}}{a}$ , γεγονός που αφήνει τη μορφή τους αμετάβλητη αν πολλαπλασιάσουμε τον παράγοντα κλίμακας  $a$  με μια σταθερά. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επαναβαθμίσουμε το  $a(t)$  όπως επιλέγουμε (Liddle, 2015). Στην κοσμολογία είναι σύνηθες να κανονικοποιούμε τον παράγοντα κλίμακας έτσι ώστε η σημερινή του τιμή να είναι ίση με τη μονάδα, δηλαδή:

$$a_0 = 1 \quad (2.32)$$

Με αυτήν την επιλογή, το φυσικό και το συν – κινούμενο σύστημα συντεταγμένων συμπίπτουν στο παρόν, αφού  $\vec{r} = a\vec{x}$  (εικόνα 2.3). Αν θεωρήσουμε τη σχέση για την πυκνότητα ενέργειας τη χρονική στιγμή  $t = t_0$  (σήμερα), όπου:

$$a = a_0 = 1 \quad (2.33)$$

και

$$\rho(a_0) = \rho_0 \quad (2.34)$$

τότε από τη γενική σχέση (2.31), προκύπτει:

$$\rho_0 = C a_0^{-3(1+w)} \quad (2.35)$$

Λόγω της κανονικοποίησης  $a_0 = 1$ , η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε:

$$\rho_0 = C \quad (2.36)$$

Επομένως, η σταθερά ολοκλήρωσης ταυτίζεται με τη σημερινή τιμή της ενεργειακής πυκνότητας. Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα αυτό στην αρχική σχέση, καταλήγουμε τελικά στην έκφραση:

$$\rho(a) = \rho_0 a^{-3(1+w)} \quad (2.37)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες της σύγχρονης κοσμολογίας (Liddle, 2015). Ορίζει τον τρόπο που μειώνεται η ενεργειακή πυκνότητα των βασικών συνιστωσών του Σύμπαντος, ακτινοβολία, ύλη και σκοτεινή ενέργεια:

- **Για τη μη σχετικιστική ύλη:**

ο όρος μη σχετικιστική ύλη αναφέρεται σε κάθε τύπο υλικού που ασκεί μηδενική πίεση,  $p = 0$ , επομένως  $w = 0$ . Ένα Σύμπαν χωρίς πίεση είναι η πιο απλή υπόθεση που μπορεί να γίνει. Είναι μια καλή προσέγγιση για τα άτομα στο Σύμπαν, εφόσον έχει ψυχθεί, καθώς έχουν διαχωριστεί και σπάνια αλληλεπιδρούν. Επομένως από τη σχέση (2.37) παίρνουμε:

$$\rho_{\text{ύλης}}(t) = \frac{\rho_0}{a^3} \quad (2.38)$$

Η παραπάνω σχέση ουσιαστικά μας λέει πως η πυκνότητα μειώνεται απλώς με την αύξηση του όγκου.

- **Για την ακτινοβολία:**

όπως αναφέραμε παραπάνω για την παράμετρο  $w$  ισχύει  $w = \frac{1}{3}$ , που προκύπτει χρησιμοποιώντας την καθιερωμένη θεωρία ακτινοβολίας (Liddle, 2015), κατά συνέπεια, η εξίσωση ρευστού αλλάζει σε σχέση με την περίπτωση που κυριαρχείται από την ύλη και από τη σχέση 2.37 θα πάρουμε:

$$\rho_{\text{ακτ}}(t) = \frac{\rho_0}{a^4} \quad (2.39)$$

Ο επιπλέον παράγοντας  $a^{-1}$  προκύπτει από την κοσμική ερυθρομετάθεση της ενέργειας των φωτονίων (Ryden, 2017), δηλαδή η ενέργεια κάθε φωτονίου μειώνεται λόγω ερυθρομετάθεσης.

Η διαφορετική εξάρτηση της ενεργειακής πυκνότητας από τον παράγοντα κλίμακας για τις διάφορες συνιστώσες του Σύμπαντος έχει σημαντικές κοσμολογικές συνέπειες. Επειδή η πυκνότητα της ακτινοβολίας μειώνεται ως  $a^{-4}$ , ταχύτερα από την πυκνότητα της ύλης που μειώνεται ως  $a^{-3}$ , η ακτινοβολία κυριαρχούσε στο ενεργειακό περιεχόμενο του πρώιμου Σύμπαντος. Καθώς όμως το Σύμπαν διαστελλόταν και ο παράγοντας κλίμακας αυξανόταν, η πυκνότητα της ύλης έγινε μεγαλύτερη από εκείνη της ακτινοβολίας, οδηγώντας στη λεγόμενη εποχή κυριαρχίας της ύλης περίπου 47.000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Planck Collaboration, VI, 2021).

- **Για σκοτεινή ενέργεια:**

Η απλούστερη μορφή σκοτεινής ενέργειας είναι η κοσμολογική σταθερά, για την οποία η εξίσωση κατάστασης δίνεται από την παράμετρο,  $w = -1$ , ώστε από την εξίσωση 2.37, να προκύψει σταθερή η πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας:

$$\rho_\Lambda = \rho_0 a^0 = \text{σταθερή} \quad (2.40)$$

Δηλαδή η ενεργειακή πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας παραμένει σταθερή καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται. Αυτό σημαίνει ότι, σε αντίθεση με την ύλη και την ακτινοβολία των οποίων η πυκνότητα μειώνεται με την αύξηση του παράγοντα κλίμακας, η σκοτεινή ενέργεια δεν αραιώνεται με τη διαστολή του Σύμπαντος. Ως αποτέλεσμα, σε αρκετά μεγάλους χρόνους η σκοτεινή ενέργεια κυριαρχεί στη δυναμική του Σύμπαντος και οδηγεί σε επιταχυνόμενη διαστολή.

Το αποτέλεσμα αυτό εξηγεί ποσοτικά τη διαδοχική ιστορία του Σύμπαντος: εποχή ακτινοβολίας  $\rightarrow$  εποχή ύλης  $\rightarrow$  εποχή σκοτεινής ενέργειας, όπως επιβεβαιώνεται και από παρατηρησιακά δεδομένα ([Planck Collaboration, VI, 2021](#)).

### Εξέλιξη του παράγοντα κλίμακας με τον χρόνο

Αντικαθιστώντας τη σχέση  $\rho(a)$  στην πρώτη εξίσωση Friedmann (2.15) για επίπεδο Σύμπαν ( $k = 0$ ), και για μηδενική κοσμολογική σταθερά ( $\Lambda = 0$ ), παίρνουμε:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \propto a^{-3(1+w)} \quad (2.41)$$

Μετά από ολοκλήρωση:

$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3(1+w)}} \quad (2.42)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει πώς μεταβάλλεται το μέγεθος του Σύμπαντος για διάφορα ρευστά. Μας δείχνει δηλαδή η παραπάνω εξίσωση την εξάρτηση του ρυθμού διαστολής του Σύμπαντος ανάλογα με το περιεχόμενό του.

- Για τη μη σχετικιστική ύλη:

$$w = 0 \Rightarrow a(t) \propto t^{2/3} \quad (2.43)$$

Στη λύση αυτή το Σύμπαν διαστέλλεται για πάντα, αλλά ο ρυθμός διαστολής  $H(t)$  μειώνεται με το χρόνο ως:

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a} = \frac{2}{3t} \quad (2.44)$$

και γίνεται απείρως αργός, καθώς το Σύμπαν γίνεται απείρως παλαιό.

- Για την ακτινοβολία:

$$w = 1/3 \Rightarrow a(t) \propto t^{1/2} \quad (2.45)$$

Στη λύση αυτή το Σύμπαν διαστέλλεται πιο αργά, εάν κυριαρχεί η ακτινοβολία παρά εάν κυριαρχεί η ύλη, συνέπεια της επιπλέον επιβράδυνσης την οποία τροφοδοτεί η πίεση. Ο ρυθμός διαστολής  $H(t)$  μειώνεται με το χρόνο ως:

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a} = \frac{1}{2t} \quad (2.46)$$

- Για τη σκοτεινή ενέργεια ( $\Lambda \neq 0$ ):

$$w = -1 \Rightarrow a(t) \propto e^{Ht} \quad (2.47)$$

Η λύση της πρώτης εξίσωσης Friedmann τείνει ασυμπτωτικά στην παραπάνω μορφή και μας δείχνει ότι το Σύμπαν εισέρχεται σε φάση εκθετικής διαστολής.

Ο παρακάτω πίνακας 2.1 συνοψίζει πώς το περιεχόμενο του Σύμπαντος καθορίζει τον ρυθμό διαστολής του.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1**

Ρευστό	$w$	$a(t)$	Διαστολή
Ύλη	0	$a(t) \propto t^{2/3}$	πιο γρήγορη
Ακτινοβολία	1/3	$a(t) \propto t^{1/2}$	πιο αργή
Σκοτεινή ενέργεια	-1	$a(t) \propto e^{Ht}$	πολύ γρήγορη

**Πίνακας 2.1:** Εξάρτηση του ρυθμού κοσμικής διαστολής από την παράμετρο κατάσταση  $w$  διαφορετικών μορφών ρευστού στο Σύμπαν. Η ύλη, η ακτινοβολία και η σκοτεινή ενέργεια οδηγούν σε διαφορετικούς νόμους εξέλιξης του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ , από αργή έως επιταχυνόμενη διαστολή.

## 2.5 Θεμελιώδεις κοσμολογικές παράμετροι

Οι κοσμολογικές παράμετροι αποτελούν θεμελιώδη μεγέθη που περιγράφουν τη δυναμική, τη γεωμετρία και την περιεκτικότητα του Σύμπαντος. Η σύγχρονη κοσμολογία, που βασίζεται στο καθιερωμένο κοσμολογικό πρότυπο  $\Lambda$ CDM, στηρίζεται σε ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την εξέλιξη της διαστολής, την κατανομή της ύλης και της ενέργειας, καθώς και τη μορφή των πρωταρχικών διαταραχών που οδήγησαν στη δομή μεγάλης κλίμακας. Στην παρούσα παράγραφο θα αναφερθούμε σε ορισμένες από αυτές.

### 2.5.1 Η παράμετρος Hubble $H(t)$

Η παράμετρος Hubble ορίζεται ως:

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \quad (2.48)$$

και αποτελεί μία χρονικά μεταβαλλόμενη ποσότητα που περιγράφει τον ρυθμό διαστολής του Σύμπαντος σε κάθε χρονική στιγμή. Η τιμή της στον παρόν κοσμικό χρόνο,  $H_0$ , καλείται σταθερά του Hubble. Η σταθερά Hubble συνήθως παραμετροποιείται ως:

$$H_0 = 100h \text{ Km} * s^{-1} * \text{Mpc}^{-1} \quad (2.49)$$

Στο τέλος της δεκαετίας του 1990 το Βασικό Έργο Διαστημικού Τηλεσκοπίου Hubble (Hubble Space Telescope Key Project), με επικεφαλής τον Wendy Freedman (Freedman et al. 2001) έδωσε:

$$h = 0,72 \pm 0,08 \quad (2.50)$$

με σφάλμα  $1 - \sigma$ . Αυτή θεωρήθηκε η πρώτη ακριβής άμεση μέτρηση της σταθεράς του Hubble.

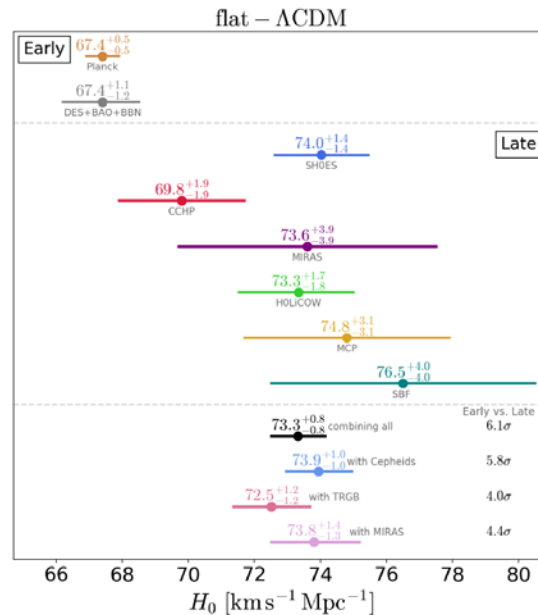
Σύμφωνα με πρόσφατη ανάλυση των D. Scolnic et al., (Scolnic et al. 2025), η οποία βασίζεται στη βαθμονόμηση του DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) μέσω ανεξάρτητων μετρήσεων της απόστασης του σμήνους της Κόμης, η τιμή αυτή προκύπτει ίση με:

$$H_0 \approx 76,5 \pm 2,2 \text{ Km} * s^{-1} * \text{Mpc}^{-1} \quad (2.51)$$

Ωστόσο, η τιμή αυτή δεν συμφωνεί με εκείνη που προκύπτει από την ανάλυση της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου από την αποστολή Planck στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Κοσμολογικού Μοντέλου  $\Lambda$ CDM, που δίνει σημαντικά χαμηλότερη τιμή,

$$H_0 \approx 67,4 \pm 0,5 \text{ Km} * s^{-1} * \text{Mpc}^{-1} \quad (2.52)$$

Η ασυμβατότητα των δύο αυτών υψηλής ακρίβειας εκτιμήσεων, η οποία υπερβαίνει τα 5 σίγμα, αποτελεί ένα από τα πιο διαφιλονικούμενα ζητήματα της κοσμολογίας, γνωστό ως «διαφοροποίηση του  $H_0$ » (Hubble constant tension) (Verde, Treu & Riess 2019).



**Διάγραμμα 2.1:** Σύγκριση των μετρήσεων της τιμής της σταθεράς Hubble  $H_0$  σύμφωνα με το πρότυπο  $\Lambda$ CDM. Οι εκτιμήσεις πρώιμου Σύμπαντος (Planck, DES+BAO+BBN) δίνουν χαμηλότερες τιμές, ενώ οι ύστερες μέθοδοι (SH0ES, CCHP, HOLiCOW, MIRAS, MCP, SBF κ.ά.) αποδίδουν σημαντικά υψηλότερες τιμές. Η διαφορά μεταξύ πρώιμων και ύστερων μετρήσεων φτάνει σε επίπεδο σημαντικότητας έως και  $\sim 6\sigma$ , υπογραμμίζοντας την ένταση του Hubble tension. Credit: Verde, Treu & Riess 2019.

Ένας ακόμη ανεξάρτητος τρόπος εκτίμησης της σταθεράς Hubble προκύπτει από τα βαρυτικά κύματα, μέσω της μεθόδου **dark siren**. Στις συγχωνεύσεις αυτού του τύπου δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητικός εντοπισμός της πηγής, σε αντίθεση με τα *bright sirens*<sup>3</sup>, επομένως η ερυθρομετατόπιση,  $z$ , δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Από το σήμα των βαρυτικών κυμάτων προσδιορίζεται η απόσταση φωτεινότητας,  $d_L$ , ενώ η ερυθρομετατόπιση εκτιμάται στατιστικά, συσχετίζοντας την πιθανή θέση του γεγονότος με καταλόγους γαλαξιών. Η μέθοδος παρουσιάζει σήμερα μεγάλες αβεβαιότητες, αλλά αποτελεί πλήρως ανεξάρτητη κοσμολογική βαθμονόμηση και αναμένεται, με μελλοντικούς ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων, να συμβάλει καθοριστικά στη διερεύνηση της έντασης στη μέτρηση της σταθεράς Hubble.

Σύμφωνα με τους [Alfradique et al. 2026](#), η ανάλυση 17 dark sirens δίνει τιμή για τη σταθερά του Hubble  $H_0 = 78.8_{-12.2}^{+14.6} \text{ km/s/Mpc}$  ενώ με πρόσθετη στάθμιση ως προς τη φωτεινότητα των γαλαξιών προκύπτει  $H_0 = 78.2_{-11.0}^{+12.0} \text{ km/s/Mpc}$ . Σε συνδυασμένη ανάλυση με το *bright siren* GW170817, δηλαδή τη συγχώνευση δύο αστέρων νετρονίων, η τιμή συγκλίνει στο  $H_0 = 69.9_{-4.0}^{+4.1} \text{ km/s/Mpc}$ , με σημαντικά μικρότερη αβεβαιότητα.

<sup>3</sup> Τα *bright sirens* είναι συγχωνεύσεις συμπαγών αντικειμένων που παράγουν βαρυτικά κύματα και ηλεκτρομαγνητικό σήμα.

Χρησιμοποιώντας την παράμετρο Hubble, η πρώτη εξίσωση Friedmann γράφεται ως εξίσωση εξέλιξης για το  $H(t)$ , ως:

$$(H(t))^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.53)$$

Εάν βάλουμε όπου  $t = t_0$  (σήμερα) στην εξίσωση Friedmann, παίρνουμε:

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 - \frac{k}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.54)$$

Αυτό μας λέει ότι η σημερινή διαστολή του Σύμπαντος ( $H_0$ ) εξαρτάται από:

- την τωρινή ενεργειακή πυκνότητα  $\rho_0$ , η οποία αντιπροσωπεύει όλη την ενέργεια/ύλη που υπάρχει στο Σύμπαν σήμερα, δηλαδή συνιστάται από διάφορα συστατικά, όπως βαρυονική ύλη, ακτινοβολία, σκοτεινή ύλη, σκοτεινή ενέργεια.
- την καμπυλότητα του Σύμπαντος
- την κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , η οποία σήμερα είναι η κυρίαρχη συνεισφορά στην τιμή της σταθεράς Hubble.

### 2.5.2 Η κρίσιμη πυκνότητα $\rho_c(t)$

Για μια δεδομένη τιμή της παραμέτρου  $H$ , μπορούμε να βρούμε την κρίσιμη πυκνότητα — δηλαδή πόση ύλη χρειαζόμαστε ώστε το Σύμπαν να είναι επίπεδο ( $k = 0$ ), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_c(t) = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (2.55)$$

Να παρατηρήσουμε ότι η τιμή της αλλάζει με τον χρόνο μιας και η τιμή του  $H$  αλλάζει. Γνωρίζοντας ότι  $G = 6,67 * 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$  και μετατρέποντας τα megaparsecs σε μέτρα υπολογίζουμε την τιμή της την παρούσα χρονική περίοδο η οποία είναι εντυπωσιακά μικρή και περίπου ίση με:

$$\rho_c(t_0) \approx 9,2 * 10^{-27} Kg * m^{-3} \quad (2.56)$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι η κρίσιμη πυκνότητα δεν είναι απαραίτητα και η πραγματική πυκνότητα του Σύμπαντος.

### 2.5.3 Η παράμετρος πυκνότητας $\Omega$

Οι κοσμολόγοι πολλές φορές αντί να αναφέρουν την πυκνότητα του Σύμπαντος άμεσα, χρησιμοποιούν μια αδιάστατη ποσότητα γνωστή ως παράμετρο πυκνότητας  $\Omega$ , η οποία ορίζεται ως:

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2.57)$$

Η παράμετρος αυτή επίσης είναι συνάρτηση του χρόνου, καθώς και το  $\rho$  και το  $\rho_c$  είναι χρονοεξαρτώμενα. Η παρούσα τιμή της παραμέτρου πυκνότητας υποδηλώνεται με  $\Omega_0$  ή  $\Omega(t_0)$ .

### 2.5.4 Η παράμετρος πυκνότητας της κοσμολογικής σταθεράς $\Omega_\Lambda$

Με τον ίδιο τρόπο που είναι χρήσιμο να εκφράζουμε την πυκνότητα ως κλάσμα της κρίσιμης πυκνότητας, είναι βολικό να ορίσουμε μια παράμετρο πυκνότητας για την κοσμολογική σταθερά, ως:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} \quad (2.58)$$

Αν περιγράψουμε το  $\Lambda$  ως ένα ρευστό με ενεργειακή πυκνότητα  $\rho_\Lambda$  και πίεση  $p_\Lambda$ , τότε (Liddle, 2015), ορίζοντας τη σχέση:

$$\rho_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad (2.59)$$

και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.54) και (2.58) καταλήγουμε στη σχέση:

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2} \quad (2.60)$$

Να σημειώσουμε ότι παρόλο που το  $\Lambda$  είναι σταθερά, το  $\Omega_\Lambda$  δεν είναι καθώς το  $H$  μεταβάλλεται με το χρόνο. Η τρέχουσα τιμή της παραμέτρου  $\Omega_\Lambda$  δηλαδή σήμερα, συμβολίζεται με  $\Omega_{\Lambda,0}$  και δίνεται από:

$$\Omega_{\Lambda,0} = \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad (2.61)$$

όπου  $H_0$  είναι η σταθερά Hubble σήμερα. Αν πάρουμε την παρατηρούμενη τιμή:

$$H_0 \approx 67,4 \pm 0,5 \text{ Km} * s^{-1} * \text{Mpc}^{-1} = 2,185 * 10^{-18} s^{-1} \quad (2.62)$$

και χρησιμοποιώντας την παρατηρούμενη τιμή της  $\Omega_{\Lambda,0} \approx 0,7$ , καθώς η κοσμολογική σταθερά συμβάλλει περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας του

Σύμπαντος, μπορούμε να αναδιατάξουμε τη σχέση για να υπολογίσουμε την αντίστοιχη τιμή της κοσμολογικής σταθεράς ίση με:

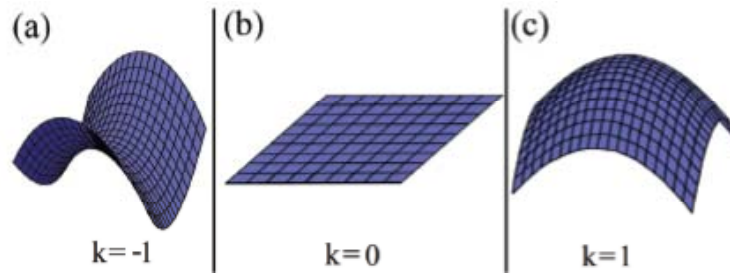
$$\Lambda \approx 1,0 * 10^{-35} \text{ s}^{-2} \quad (2.63)$$

Αντικαθιστώντας στην πρώτη εξίσωση Friedmann (σχέση 2.15) την πυκνότητα  $\rho$  με  $\Omega * \rho_c$  (σχέση 2.56) και τον όρο  $\frac{\Lambda}{3}$  με  $\Omega_\Lambda * H^2$ , παίρνουμε (Liddle, 2015):

$$\Omega + \Omega_\Lambda - 1 = \frac{k}{a^2 H^2} \quad (2.64)$$

Από την παραπάνω σχέση διαπιστώνουμε ότι η τιμή του  $\Omega + \Omega_\Lambda$ <sup>4</sup> είναι εκείνη που θα καθορίσει την καμπυλότητα. Έτσι μπορούμε να έχουμε τις τρεις παρακάτω περιπτώσεις:

- $0 < \Omega + \Omega_\Lambda < 1$  τότε  $k < 0$  επομένως ανοιχτό Σύμπαν
- $\Omega + \Omega_\Lambda = 1$  τότε  $k = 0$  επομένως επίπεδο Σύμπαν
- $\Omega + \Omega_\Lambda > 1$  τότε  $k > 0$  επομένως κλειστό Σύμπαν



**Εικόνα 2.4:** Απεικόνιση των τριών δυνατών γεωμετριών του Σύμπαντος ανάλογα με την τιμή της καμπυλότητας  $k$ . **(a)** αρνητική καμπυλότητα ( $k = -1$ ) – ανοιχτό, υπερβολικό Σύμπαν, **(b)** μηδενική καμπυλότητα ( $k = 0$ ) – επίπεδο Σύμπαν, **(c)** θετική καμπυλότητα ( $k = +1$ ) – κλειστό, σφαιρικό Σύμπαν. Credit: Reis et al., 2022

### 2.5.5 Η παράμετρος επιβράδυνσης $q_0$

Η παράμετρος επιβράδυνσης  $q$  είναι ένα μέγεθος της κοσμολογίας που περιγράφει το πώς αλλάζει ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος με τον χρόνο. Δεν μας λέει απλώς πόσο γρήγορα διαστέλλεται το Σύμπαν (όπως κάνει η σταθερά Hubble), αλλά αν η διαστολή επιταχύνεται ή επιβραδύνεται.

Ορίζεται ως (Liddle, 2015; Weinberg, 2008):

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}(t_0)}{a(t_0)H_0^2} = -\frac{a(t_0)\ddot{a}(t_0)}{\dot{a}^2(t_0)} \quad (2.65)$$

<sup>4</sup> Δηλαδή, το άθροισμα των πυκνοτήτων ύλης/ακτινοβολίας και σκοτεινής ενέργειας καθορίζει τη γεωμετρία του Σύμπαντος.

- $a(t_0)$  είναι ο συντελεστής κλίμακας του Σύμπαντος,
- $\dot{a}$  ο ρυθμός διαστολής,
- $\ddot{a}$  η επιτάχυνση της διαστολής.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από ανάπτυγμα Taylor του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$  γύρω από τον παρόντα χρόνο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $q_0$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η επιβράδυνση.

- Αν  $q > 0$ : το Σύμπαν επιβραδύνει – η βαρύτητα υπερισχύει.
- Αν  $q < 0$ : το Σύμπαν επιταχύνεται – η σκοτεινή ενέργεια κυριαρχεί.
- Αν  $q = 0$ : οριακή κατάσταση, ούτε επιβράδυνση ούτε επιτάχυνση.

Από τις εξισώσεις Friedmann προκύπτει ότι (Hobson, Efstathiou, & Lasenby, 2006):

$$q = \frac{1}{2}\Omega_m - \Omega_\Lambda \quad (2.66)$$

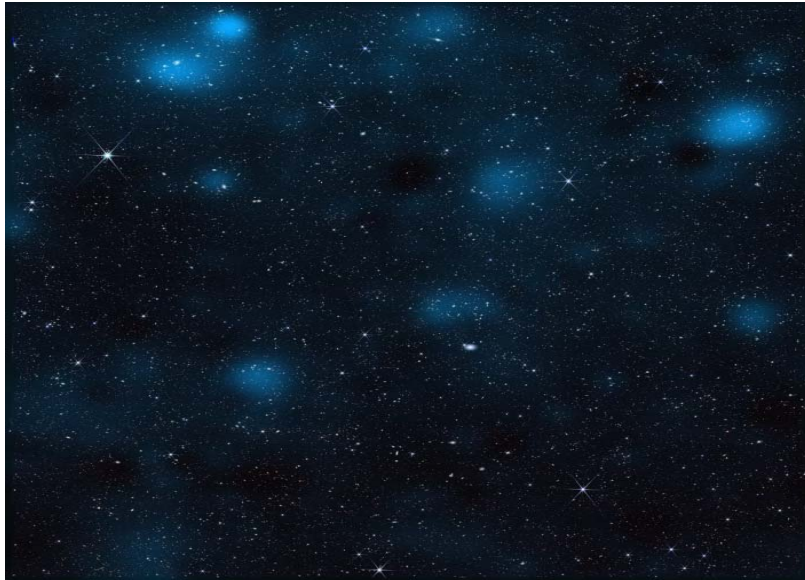
Χρησιμοποιώντας τις επικρατέστερες τιμές για τα  $\Omega_m$  και  $\Omega_\Lambda$  βασιζόμενοι στις μετρήσεις του Planck Collaboration, VI, 2021, δηλαδή για  $\Omega_m \approx 0.315$  και  $\Omega_\Lambda \approx 0.685$ , εξάγουμε μια τιμή για τον παράγοντα επιβράδυνσης ίση με:

$$q_0 \approx -0.53 \quad (2.67)$$

Η παραπάνω τιμή υποδηλώνει ότι το Σύμπαν σήμερα βρίσκεται σε φάση επιταχυνόμενης διαστολής.

### 3. Σκοτεινή ύλη (Dark Matter)

Η σκοτεινή ύλη αποτελεί ένα από τα πιο θεμελιώδη αλλά ταυτόχρονα και ένα από τα πιο αινιγματικά συστατικά του Σύμπαντος. Παρά το γεγονός ότι δεν αλληλεπιδρά ηλεκτρομαγνητικά και επομένως δεν μπορεί να ανιχνευθεί άμεσα μέσω της εκπομπής, απορρόφησης ή σκέδασης φωτός, η παρουσία της καθίσταται αναπόφευκτη από τα βαρυτικά της αποτελέσματα. Αστροφυσικές παρατηρήσεις όπως οι καμπύλες περιστροφής γαλαξιών, η δυναμική των σμηνών γαλαξιών, οι ανισοτροπίες της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου κ.α. συγκλίνουν στην ύπαρξη μιας μη φωτεινής συνιστώσας που κυριαρχεί στη μάζα του Σύμπαντος. Στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Κοσμολογικού Προτύπου  $\Lambda$ CDM, η σκοτεινή ύλη αντιπροσωπεύει περίπου το 26,8% της συνολικής ύλης και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία και εξέλιξη των κοσμικών δομών.



**Εικόνα 3.1:** Περιέχοντας σχεδόν 800.000 γαλαξίες, αυτή η εικόνα από το Διαστημικό Τηλεσκόπιο James Webb της NASA επικαλύπτεται με έναν χάρτη σκοτεινής ύλης, που εμφανίζεται με μπλε χρώμα. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν δεδομένα του Webb για να εντοπίσουν την αόρατη ουσία μέσω της βαρυτικής της επίδρασης στη κανονική ύλη. Credit: NASA/STScI/J. DePasquale/A. Pagan (2026).

Παρά την ισχυρή έμμεση απόδειξη της ύπαρξής της, η φύση της σκοτεινής ύλης παραμένει άγνωστη. Τα κύρια ερευνητικά προγράμματα επικεντρώνονται σε τρεις άξονες: **α) άμεση ανίχνευση**, μέσω της αναζήτησης ασθενών αλληλεπιδράσεων σκοτεινής ύλης με ανιχνευτές στη Γη, **β) έμμεση ανίχνευση**, μέσω πιθανών προϊόντων εξαυλώσεων ή διασπάσεων στο Γαλαξία και **γ) παραγωγή σε επιταχυντές**, όπου νέες σωματιδιακές θεωρίες προβλέπουν πιθανά υποψήφια σωματίδια όπως WIMPs, αξιόνια ή αδρανή νετρίνα. Εναλλακτικές προσεγγίσεις,

όπως τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας ή ρευστά με ασυνήθιστες ιδιότητες, έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τα φαινόμενα χωρίς προσφυγή σε μη βαρυτικά ανιχνεύσιμα σωματίδια, αλλά μέχρι σήμερα καμία από αυτές δεν έχει καταφέρει να αναπαράγει με συνέπεια το σύνολο των κοσμολογικών και αστροφυσικών δεδομένων.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές παρατηρησιακές ενδείξεις για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης, τις διάφορες κατανομές πυκνότητάς της, οι θεωρητικές προσεγγίσεις που επιχειρούν να ερμηνεύσουν τη φύση της, οι σύγχρονες μεθοδολογίες ανίχνευσης, αλλά και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει η συγκεκριμένη θεωρία. Στόχος είναι να δοθεί ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό υπόβαθρο, απαραίτητο για την κατανόηση του ρόλου της σκοτεινής ύλης στην εξέλιξη του Σύμπαντος, καθώς και για την αξιολόγηση των τωρινών και μελλοντικών ερευνητικών προσπαθειών.

### 3.1 Ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης

Τα θεμέλια του σύγχρονου προβλήματος της σκοτεινής ύλης τέθηκαν κυρίως τη δεκαετία του 1970, ύστερα από δεκαετίες σταδιακής συσσώρευσης παρατηρησιακών ενδείξεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τη δεκαετία του 1930 ο Fritz Zwicky παρατήρησε ότι η συνολική μάζα του Σμήνους της Κόμης (Coma Cluster<sup>5</sup>) φαινόταν να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ποσότητα που μπορούσε να εκτιμηθεί από τους ορατούς γαλαξίες.



---

<sup>5</sup> Το Coma Cluster (ή αλλιώς Abell 1656) είναι ένα από τα πλουσιότερα και πιο μελετημένα σμήνη γαλαξιών στο κοντινό Σύμπαν. Αποτέλεσε μία από τις πρώτες παρατηρήσιμες δομές όπου οι βαρυτικές ανωμαλίες ερμηνεύτηκαν ως ένδειξη ύπαρξης μη παρατηρούμενης μάζας. Το 1933, ο Fritz Zwicky απέδειξε ότι οι γαλαξίες του Σμήνους της Κόμης κινούνταν με ταχύτητες υπερβολικές για να διατηρηθεί η συνοχή του σμήνους υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης που προέρχεται μόνο από την ορατή μάζα των γαλαξιών. (Zwicky, 1933)

**Εικόνα 3.2:** Εικόνα του Σμήνους της Κόμης (Abell 1656), ενός πλούσιου γαλαξιακού σμήνους που περιέχει χιλιάδες γαλαξίες και είναι γνωστό για την ιστορική του σημασία στην απόδειξη της ύπαρξης σκοτεινής ύλης.

Λίγα χρόνια αργότερα κατέστη σαφές ότι ο γαλαξίας της Ανδρομέδας περιστρέφεται με πολύ υψηλές ταχύτητες σε μεγάλες ακτίνες, σαν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του να βρίσκεται στις εξωτερικές του περιοχές.

Πολλά ακόμη παρατηρησιακά δεδομένα παρείχαν πρόσθετη στήριξη στην υπόθεση της σκοτεινής ύλης, έως ότου τη δεκαετία του 1970 οι καμπύλες περιστροφής επεκτάθηκαν σε μεγαλύτερες ακτίνες και σε πολυάριθμους άλλους σπειροειδείς γαλαξίες, αποδεικνύοντας την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων μάζας σε κλίμακες πολύ μεγαλύτερες από το μέγεθος των γαλαξιακών δίσκων. Σήμερα, οι πιο άμεσες παρατηρησιακές ενδείξεις για τη σκοτεινή ύλη προέρχονται από ένα σύστημα γνωστό ως Σμήνος Bullet (Bullet Cluster).

### 3.1.1 Η γαλαξιακή κλίμακα

#### α) Καμπύλες περιστροφής

Η πιο πειστική και άμεση ένδειξη για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης σε γαλαξιακές κλίμακες προέρχεται από τις παρατηρήσεις των καμπυλών περιστροφής των σπειροειδών γαλαξιών, δηλαδή από τη γραφική παράσταση των κυκλικών ταχυτήτων των άστρων και του αερίου ως συνάρτηση της απόστασής τους από το γαλαξιακό κέντρο.

Οι καμπύλες αυτές συνήθως προκύπτουν από τη μέτρηση της μετατόπισης Doppler της ραδιογραμμής των 21 cm σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις (ιχνηθέτης του ουδέτερου υδρογόνου H). Στη συνέχεια, η περικλειόμενη μάζα μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση του τρίτου νόμου του Κέπλερ. Οι παρατηρούμενες καμπύλες περιστροφής παρουσιάζουν συνήθως μια χαρακτηριστική επίπεδη συμπεριφορά σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και πολύ πέρα από το όριο των ορατών δίσκων. Στους ελλειπτικούς γαλαξίες, όπου δεν υπάρχει αέριο, μετρώνται οι μέσες τροχιακές ταχύτητες των άστρων σε διάφορες αποστάσεις από το κέντρο, μέσω της διεύρυνσης των φασματικών γραμμών του γαλαξία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σκοτεινή ύλη εκτείνεται πέρα από τον ορατό γαλαξία.

Ο Horace W. Babcock (1912–2003), Αμερικανός αστρονόμος, γνωστότερος κυρίως για την καθοριστική συμβολή του στη μελέτη των μαγνητικών πεδίων των άστρων, το 1939, απέκτησε φάσματα του γαλαξία της Ανδρομέδας (M31) και ανακάλυψε ότι στις εξωτερικές περιοχές ο γαλαξίας περιστρέφεται με απροσδόκητα υψηλή ταχύτητα, πολύ μεγαλύτερη από την αναμενόμενη κεπλεριανή ταχύτητα. Ο

λόγος μάζας προς φωτεινότητα ( $M/L$ )<sup>6</sup> που υπολογίστηκε για τα πολύ εξωτερικά τμήματα του γαλαξία ήταν περίπου 60 σε ηλιακές μονάδες. Ερμήνευσε αυτό το αποτέλεσμα ως έντονη απορρόφηση από σκόνη ή ως την ανάγκη μιας νέας δυναμικής προσέγγισης, και όχι ως ένδειξη κάποιας μορφής «αόρατης» ύλης (Babcock, 1939).

Ο Jan Oort, το 1940, μελέτησε την περιστροφή και τη φωτεινότητα επιφάνειας του φακοειδούς (S0) γαλαξία NGC 3115 και διαπίστωσε ότι στις εξωτερικές περιοχές ο λόγος μάζας προς φωτεινότητα ήταν περίπου  $M/L \sim 250$  (Oort, 1940). Το 1944, ο Hendrik Christoffel van de Hulst, ένας από τους μαθητές του Oort, προέβλεψε την ύπαρξη της γραμμής των 21 cm του ουδέτερου διαστρικού υδρογόνου. Η εκπομπή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση του διαστρικού υδρογόνου και για τη μέτρηση της ταχύτητάς του. Ο αρχικός στόχος ήταν η μέτρηση της ραδιοεκπομπής από τον δικό μας Γαλαξία (Van de Hulst et al. 1954). Ο επόμενος στόχος ήταν ο γαλαξίας της Ανδρομέδας (Van de Hulst et al. 1957). Κατάφεραν να μετρήσουν την καμπύλη περιστροφής του M31 έως περίπου 30 kpc από το κέντρο, επιβεβαιώνοντας μια συνολική τιμή  $M/L \sim 20$ , σε αντίθεση με  $M/L \sim 2$  στην κεντρική περιοχή.

Περίπου δέκα χρόνια αργότερα, ο Morton Roberts πραγματοποίησε μια νέα έρευνα της γραμμής των 21 cm του υδρογόνου στον M31, χρησιμοποιώντας το τηλεσκόπιο των 300 ποδιών του National Radio Astronomy Observatory. Η επίπεδη καμπύλη περιστροφής σε μεγάλες ακτίνες επιβεβαιώθηκε με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, χαρτογράφησε τη συνολική μάζα του γαλαξία καθώς και τη δυναμική της κατανομή (Roberts, 1966).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, η Vera Rubin και ο Kent Ford πραγματοποίησαν τις δικές τους μετρήσεις με σκοπό την εξαγωγή της καμπύλης περιστροφής του M31. Η Rubin χρησιμοποίησε ένα νέο, ιδιαίτερα ευαίσθητο φασματογράφο, που είχε αναπτυχθεί από τον συνάδελφό της Kent Ford, ο οποίος τους επέτρεψε να προσδιορίσουν τις τροχιακές ταχύτητες των περιοχών HII και ορισμένες μεγάλης κλίμακας ομάδες πολύ νέων, πολύ θερμών και πολύ φωτεινών άστρων, κυρίως τύπων O και B, των λεγόμενων συμπλεγμάτων OB, σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο του γαλαξία της Ανδρομέδας, με ακρίβεια μεγαλύτερη από κάθε προηγούμενη. Προς έκπληξή τους, οι ταχύτητες που μετρήσαν δεν συμφωνούσαν με τη Νευτώνεια θεωρία, η οποία απαιτεί τα αντικείμενα που

---

<sup>6</sup> Mass – to – light ratio ( $M/L$ )

Ο λόγος μάζας προς φωτεινότητα είναι το πηλίκο της συνολικής μάζας ενός αστρονομικού αντικειμένου προς τη φωτεινότητά του, εκφρασμένο σε ηλιακές μονάδες. Ο λόγος μάζας προς φωτεινότητα του Ήλιου είναι, εξ ορισμού, ίσος με 1. Συνήθως συμβολίζεται με το σύμβολο  $Y$  (ή συχνότερα  $M/L$  στη διεθνή βιβλιογραφία). Καθώς στα εξωτερικά μέρη ενός γαλαξία η φωτεινή ύλη (αστέρες και αέριο) είναι πολύ αραιή, οι αναμενόμενες τιμές του λόγου αυτού είναι περίπου 1~10. Επομένως ένας λόγος μεγαλύτερος από τους αναμενόμενους δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από μόνο από τη συνεισφορά των αστεριών και του αερίου.

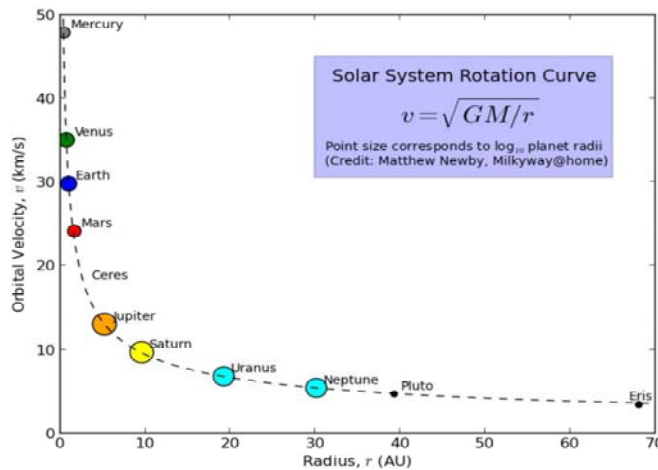
βρίσκονται μακριά από το κέντρο μιας δεδομένης μάζας να κινούνται πιο αργά από εκείνα που βρίσκονται πιο κοντά σε αυτό. Αντίθετα, διαπίστωσαν ότι η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται με την απόσταση από το κέντρο του γαλαξία και παραμένει σχεδόν σταθερή για ακτινικές αποστάσεις της τάξης των 20 – 30  $kpc$  (Rubin & Ford, 1970).

Σύμφωνα με τη Νευτώνεια Μηχανική, για μια σταθερή κυκλική τροχιά, όπως για παράδειγμα μια κλασική πλανητική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, η βαρυτική δύναμη εξισορροπείται από τη φυγόκεντρο δύναμη:

$$G * \frac{M(r)}{r^2} = \frac{u^2(r)}{r} \Rightarrow G \frac{M(r)}{r} = u^2(r)$$

$$\Rightarrow u(r) = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}} \Rightarrow u(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad (3.1)$$

όπου  $r$  είναι η ακτίνα της κυκλικής κίνησης,  $u$  η ταχύτητα,  $M$  η σταθερή μάζα που περιέχεται στο εσωτερικό της κυκλικής τροχιάς και  $G$  η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η ταχύτητα μειώνεται καθώς η ακτίνα αυξάνεται.

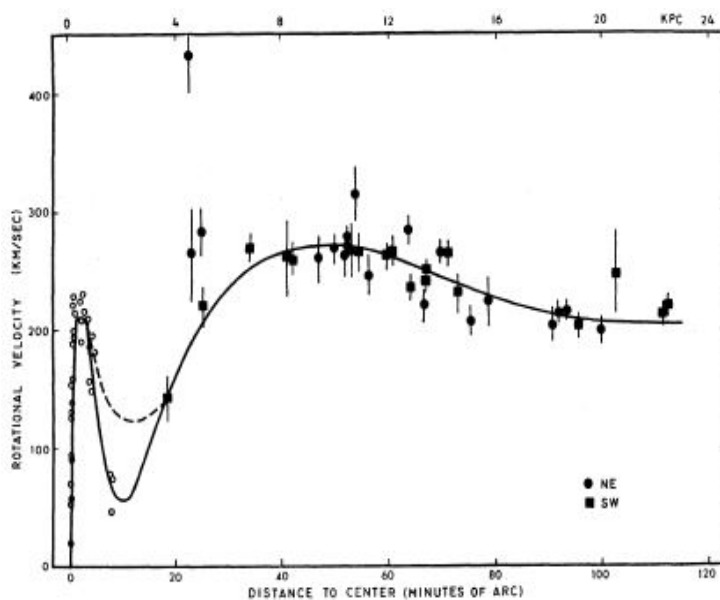


**Διάγραμμα 3.1:** Καμπύλη περιστροφής του Ηλιακού Συστήματος. Η τροχιακή ταχύτητα των πλανητών στο Ηλιακό Σύστημα ακολουθεί τη σχέση  $u(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$ , δείχνοντας τη χαρακτηριστική πτώση της ταχύτητας με την απόσταση από τον Ήλιο. Credit: Matthew Newby, Temple University.

Μετρώντας την  $u(r)$  μέσω του φαινομένου Doppler και χρησιμοποιώντας αυτή την απλή σχέση, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα  $M(r)$  που περικλείεται μέσα σε μια ακτίνα  $r$ :

$$M(r) = \frac{ru^2(r)}{G} \quad (3.2)$$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας των Vera Rubin και Kent Ford το 1969, δηλαδή η καμπύλη περιστροφής του M31. Αντί για την αναμενόμενη μείωση της τροχιακής ταχύτητας των συμπλεγμάτων OB, διαπίστωσαν ότι σε μεγάλες αποστάσεις η ταχύτητα παραμένει περίπου σταθερή. Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από την παραπάνω εξίσωση (3.2), εάν η ταχύτητα παραμένει σταθερή καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του γαλαξία, τότε η ολική μάζα θα πρέπει να αυξάνεται σύμφωνα με τη σχέση  $M(r) \propto r$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του γαλαξία πρέπει να βρίσκεται σε μια άγνωστη και αόρατη μορφή.



**Διάγραμμα 3.2:** Παρατηρούμενες ταχύτητες περιστροφής των συμπλεγμάτων OB στον M31 ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο. **Συνεχής καμπύλη:** Δείχνει το δυναμικό πλαίσιο που απαιτείται για να ταιριάζει τα παρατηρούμενα δεδομένα. Στις εξωτερικές περιοχές η παρατηρούμενη ταχύτητα παραμένει σχεδόν σταθερή (“flat”), ενώ η υπόθεση μόνο φωτεινής ύλης προβλέπει σημαντική πτώση. **Διακεκομμένη καμπύλη:** αντιστοιχεί στη θεωρητική καμπύλη περιστροφής που υπολογίζεται μόνο από τη φωτεινή (βαρυονική) ύλη — δηλαδή αστέρες και αέριο. (Rubin & Ford, 1970).

Το αποτέλεσμα αυτό προκάλεσε έκπληξη στην αστρονομική κοινότητα, καθώς, με βάση τη λαμπρότητα της κεντρικής διογκωμένης περιοχής, θεωρούνταν ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ήταν συγκεντρωμένο εκεί, γεγονός που θα οδηγούσε σε μια κατανομή ταχυτήτων παρόμοια με αυτή του Ηλιακού Συστήματος, όπου η ταχύτητα μειώνεται με την απόσταση από το κέντρο.

Καθώς οι καμπύλες περιστροφής μάζ επιτρέπουν να προσδιορίσουμε την κατανομή της μάζας και τα φωτομετρικά δεδομένα την κατανομή του φωτός, η σύγκριση των δύο αυτών κατανομών επιτρέπει τον υπολογισμό του λόγου μάζας προς

φωτεινότητα ( $M/L$ ). Το αποτέλεσμα είναι ότι για τον M31 και άλλους γαλαξίες που έχουν μελετηθεί, η τιμή του  $M/L$  προκύπτει μεγαλύτερη από τη μονάδα. Εντός της τροχιάς του Ήλιου (περίπου 8  $kpc$  από το γαλαξιακό κέντρο), για τον Γαλαξία μας ισχύει  $M/L = 6 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Αυτή είναι μια τυπική τιμή για τις εσωτερικές περιοχές των περισσότερων σπειροειδών γαλαξιών. Για τις εσωτερικές περιοχές των ελλειπτικών γαλαξιών,  $M/L = 10 M_{\odot}/L_{\odot}$ , κάτι που δεν προκαλεί έκπληξη, καθώς οι ελλειπτικοί γαλαξίες περιέχουν ασθενέστερα (γηραιότερα) άστρα.

Ωστόσο, όταν συμπεριληφθούν και οι εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών, το  $M/L$  αυξάνεται δραματικά. Για ολόκληρους σπειροειδείς γαλαξίες, μπορεί να φτάσει τιμές έως και  $50 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Στους νάνους γαλαξίες ο λόγος  $M/L$  μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερος. Η ερμηνεία ενός τέτοιου αποτελέσματος είναι ότι υπάρχει περισσότερη μάζα συνδεδεμένη με τους γαλαξίες από όση εκτιμάται από το φως τους. Ένας λόγος μάζας προς φωτεινότητα ενός γαλαξία ή ενός σμήνους πολύ μεγαλύτερος από 30 αποτελεί ισχυρή ένδειξη κυριαρχίας της σκοτεινής ύλης.

Η Vera Rubin και η ερευνητική της ομάδα ήταν οι πρώτοι που πραγματοποίησαν τόσο αξιόπιστες μετρήσεις, οι οποίες όχι μόνο υποδήλωναν την ύπαρξη σκοτεινής ύλης αλλά και τις απέδιδαν ρητά σε αυτήν. Μέσα σε μία δεκαετία εργασίας, η Rubin και οι συνεργάτες της έδειξαν ότι η Ανδρομέδα δεν αποτελούσε μεμονωμένη περίπτωση, αλλά ότι οι επίπεδες καμπύλες περιστροφής παρατηρούνταν σε όλους τους σπειροειδείς γαλαξίες που είχαν μελετήσει. Μια ιδιαίτερα επιδραστική εργασία, στην οποία παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των εκτεταμένων καμπυλών περιστροφής, δημοσιεύθηκε το 1980 (Rubin et al., 1980). Αυτά ήταν τα πρώτα αξιόπιστα αποτελέσματα που υποδήλωναν ότι είτε η Νευτώνεια βαρύτητα δεν εφαρμόζεται καθολικά, είτε ότι περισσότερο από το 50% της μάζας των γαλαξιών εντοπίζεται στη σχεδόν σκοτεινή, γαλαξιακή άλω. Παρότι αρχικά αντιμετωπίστηκαν με σκεπτικισμό, τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν σταδιακά και από άλλους αστρονόμους. Σύντομα κατέστη σαφές ότι οι περισσότεροι γαλαξίες κυριαρχούνται από τη σκοτεινή ύλη.

Ανάμεσα στα πιο ενδιαφέροντα αντικείμενα, από την άποψη της μελέτης των καμπυλών περιστροφής, συγκαταλέγονται οι λεγόμενοι γαλαξίες χαμηλής επιφανειακής λαμπρότητας (low surface brightness, LSB), κυρίως οι νάνοι σφαιροειδείς γαλαξίες (dSphs), οι οποίοι πιθανότατα κυριαρχούνται σχεδόν παντού από σκοτεινή ύλη, με τους παρατηρούμενους αστρικούς πληθυσμούς να συνεισφέρουν μόνο ελάχιστα στις καμπύλες περιστροφής (de Blok, McGaugh, & Rubin, 2001).

Αυτή η ιδιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι επιτρέπει την αποφυγή των δυσκολιών που σχετίζονται με τον διαχωρισμό των συνεισφορών της σκοτεινής και της ορατής ύλης στις καμπύλες περιστροφής. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις προβλέπουν αιχμηρές (cuspy) εσωτερικές κατανομές πυκνότητας, γεγονός που ευνοεί

την ανίχνευση ακτίνων  $\gamma$  από την εξαΰλωση σωματιδίων σκοτεινής ύλης (Berenzisky et al. 1992). Η Τοπική Ομάδα Γαλαξιών, η οποία είναι μια σχετικά χαλαρά δεσμευμένη βαρυτικά συλλογή με από πάνω από 80 γαλαξίες, που εκτείνονται σε μια περιοχή περίπου  $3 - 5 \text{ Mpc}$  σε διάμετρο, παρέχει έναν μεγάλο αριθμό νάνων σφαιροειδών γαλαξιών προς μελέτη.

### β) Αποσύνθεση των καμπυλών περιστροφής

Η αποσύνθεση των καμπυλών περιστροφής στα επιμέρους συστατικά μάζας αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη της δυναμικής δομής των σπειροειδών γαλαξιών (Rubin et al. 1980, 1982; Sofue, 2015). Αποσυνθέτοντας την καμπύλη περιστροφής ενός γαλαξία στα επιμέρους συστατικά της (π.χ. δίσκο (disk), διογκωμένο πυρήνα (bulge), άλω σκοτεινής ύλης (halo)), αντλούμε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την ποσότητα και την κατανομή μάζας της σκοτεινής ύλης που περιέχει. Η συνολική καμπύλη περιστροφής εκφράζεται ως το άθροισμα αυτών των συνιστωσών.

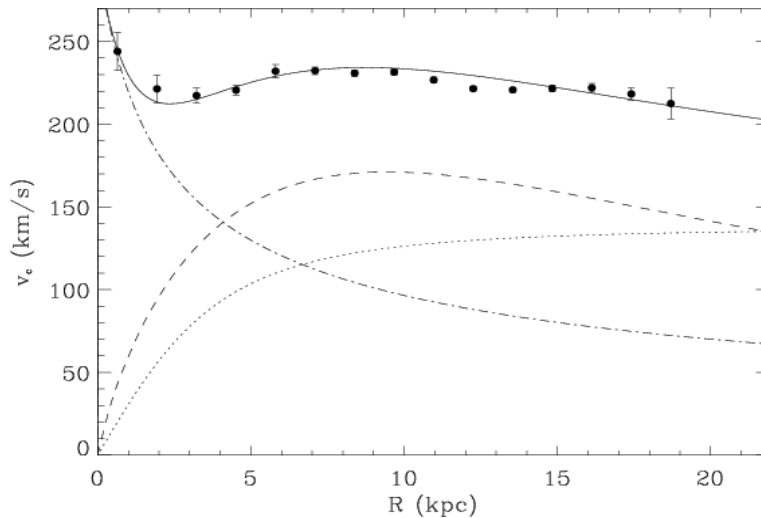
$$V_{total}^2(r) = V_b^2(r) + V_d^2(r) + V_h^2(r) \quad (3.3)$$

Όπου:

- $V_{total}^2(r)$  είναι η ολική ταχύτητα περιστροφής ενός άστρου ή αερίου σε απόσταση  $r$  από το κέντρο ενός γαλαξία η οποία προκύπτει αθροίζοντας τη συνεισφορά τριών διαφορετικών συστατικών μάζας.
- $V_b^2(r)$  η συμβολή του διογκωμένου κέντρου (bulge),
- $V_d^2(r)$  η συμβολή του δίσκου (disk) και
- $V_h^2(r)$  η συμβολή της άλω σκοτεινής ύλης (halo)

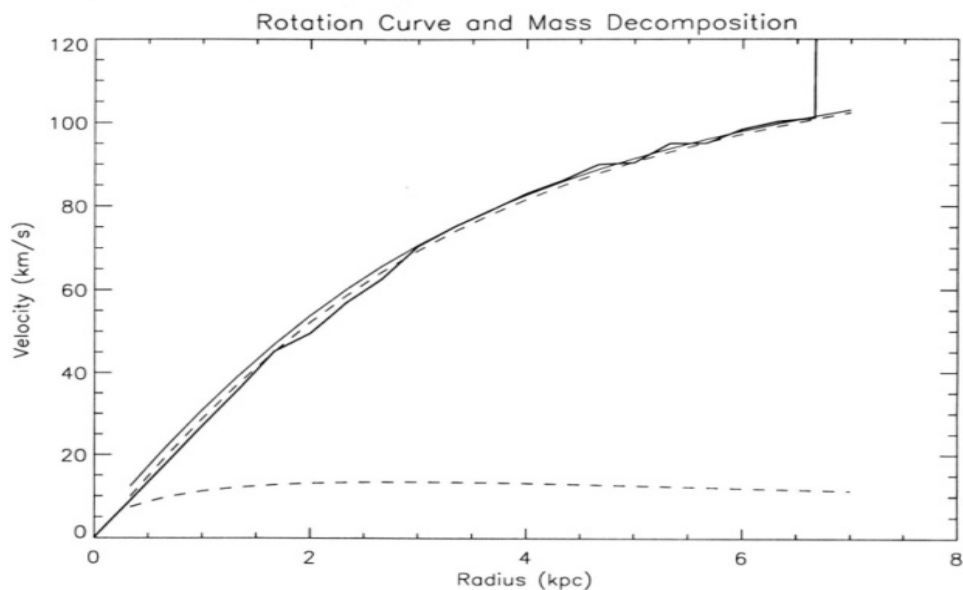
Καθώς τα  $V_{total}^2(r)$ ,  $V_b^2(r)$ ,  $V_d^2(r)$  μπορούν να εξαχθούν από παρατηρήσεις, η συμβολή της σκοτεινής ύλης στην συνολική καμπύλη περιστροφής μπορεί να προσδιοριστεί. Έτσι, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.2) αποκτούμε την κατανομή μάζας της σκοτεινής ύλης. Τέλος, με χρήση της εξίσωσης (3.5) μπορεί να προκύψει η κατανομή πυκνότητας της άλω, η οποία περιγράφει το πώς μεταβάλλεται η πυκνότητα της σκοτεινής ύλης μέσα σε μια γαλαξιακή άλω, ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο του γαλαξία.

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την αποσύνθεση της καμπύλης περιστροφής του NGC 891 σε συνιστώσες δίσκου, διογκωμένου πυρήνα και σκοτεινής ύλης.



**Διάγραμμα 3.3:** Αποσύνθεση της καμπύλης περιστροφής του NGC 891. Η συνεχής γραμμή δείχνει την καμπύλη περιστροφής του γαλαξία. Οι διακεκομμένες, οι με παύλες και οι με παύλες – τελείες γραμμές αντιστοιχούν στις συνεισφορές της σκοτεινής ύλης, του δίσκου και του διογκωμένου πυρήνα αντίστοιχα (Sofue, 2015).

Καθώς οι συνιστώσες του διογκωμένου κέντρου και του δίσκου μαζί δεν παρέχουν αρκετή μάζα για να εξηγήσουν τη συνολική παρατηρούμενη καμπύλη περιστροφής, απαιτείται η συνεισφορά της σκοτεινής ύλης. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι νάνοι γαλαξίες και οι γαλαξίες χαμηλής επιφανειακής φωτεινότητας (LSB), είναι ιδανικά αντικείμενα για τη μελέτη της σκοτεινής ύλης, καθώς σε αυτούς τους γαλαξίες η συνιστώσα της άλω αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης περιστροφής.



**Διάγραμμα 3.4:** Καμπύλη περιστροφής του UGC 711. Η κατώτερη γραμμή με παύλες δείχνει τη συνεισφορά από τα άστρα, η συνεχής γραμμή που ξεκινά από την αρχή των αξόνων είναι η παρατηρούμενη καμπύλη περιστροφής, η πάνω διακεκομμένη γραμμή είναι η συνεισφορά από την άλω και η άλλη συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει το συνολικό φως, δηλαδή το άθροισμα των συμβολών της αστρικής και της συνιστώσας από το περιβάλλον (Mendelowitz, 2000).

### γ) Επιπρόσθετες ενδείξεις

Άλλες ενδείξεις για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης τόσο σε υπογαλαξιακές όσο και σε διαγαλαξιακές κλίμακες, προέρχονται από μια μεγάλη ποικιλία δεδομένων. Παρακάτω συνοψίζουμε τις σημαντικότερες από αυτές:

**i)** Η λεγόμενη διαφορά Oort (Oort discrepancy) στον δίσκο του Γαλαξία μας. Το 1932, ο Oort μελετούσε τις κινήσεις των άστρων στη γειτονιά του Ήλιου. Ανακάλυψε ότι η μάζα στο γαλαξιακό επίπεδο έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρούσαμε, ώστε να εξηγούνται οι κινήσεις των άστρων.

**ii)** Η ασθενής βαρυτική εστίαση (weak gravitational lensing) γαλαξιών στο βάθος λόγω μαζικών δομών στο προσκείμενο πεδίο. Η καμπύλωση του φωτός αποκαλύπτει την παρουσία «αόρατης» μάζας.

**iii)** Οι ταχύτητες διασποράς (velocity dispersions) των νάνων σφαιροειδών γαλαξιών (dwarf spheroidal galaxies), οι οποίες υποδηλώνουν λόγους μάζας προς φωτεινότητα πολύ μεγαλύτερους από αυτούς που παρατηρούμε στη «γειτονιά» μας.

**iv)** Οι ταχύτητες διασποράς των ελλειπτικών γαλαξιών (Faber – Jackson, 1975). Παρόλο που ορισμένοι ελλειπτικοί γαλαξίες εμφανίζουν χαμηλότερους λόγους μάζας προς φωτεινότητα, οι μετρήσεις δείχνουν γενικά ότι οι περισσότεροι έχουν σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε σκοτεινή ύλη.

## 3.1.2 Η κλίμακα των σμηνών γαλαξιών

### α) Φαινόμενο βαρυτικού φακού<sup>7</sup> σε σμήνη γαλαξιών

<sup>7</sup> Τα σμήνη, οι γαλαξίες και ακόμη και τα άστρα είναι τόσο μεγάλης μάζας ώστε η βαρύτητά τους κάμπει και εστιάζει το φως από μακρινούς γαλαξίες, κβάρζαρς και άστρα που βρίσκονται πολύ πίσω τους. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως βαρυτικός φακός (gravitational lensing) και ο βαθμός της κάμψης αποτελεί μία από τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Albert Einstein.

Σε μεγαλύτερες κλίμακες, τα σμήνη γαλαξιών έχουν ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για τη μελέτη της σκοτεινής ύλης. Οι μάζες τους μπορούν να εκτιμηθούν με τρεις ανεξάρτητους τρόπους:

1. Από τη μέτρηση των ταχυτήτων και των θέσεων των γαλαξιών μέσα στο σμήνος, σε συνδυασμό με τον τρίτο νόμο του Kepler (Νόμος των αρμονικών περιόδων) που λέει ότι: Το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς ( $T$ ) ενός πλανήτη γύρω από τον Ήλιο είναι ανάλογο με τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα ( $a$ ) της τροχιάς του. Στην πιο σύγχρονη (νευτώνεια) μορφή για κάθε κεντρικό σώμα μάζας  $M$ :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

2. Από τις ακτίνες –  $X$  που εκπέμπονται από το πολύ θερμό αέριο μέσα στο σμήνος. Η θερμοκρασία και η πυκνότητα του αερίου μπορούν να εκτιμηθούν από την ενέργεια και τη ροή των ακτίνων –  $X$  και έτσι προκύπτει η πίεση του αερίου. Αν υποθέσουμε ισοροπία μεταξύ πίεσης και βαρύτητας, μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατανομή μάζας του σμήνους (Forman & Jones, 1982).

3. Από τα φαινόμενα βαρυτικού φακού που προκαλεί σε αντικείμενα του βάθους. Παρατηρείται ως έντονο το φαινόμενο (πολλαπλές εικόνες του αντικειμένου) κοντά στον πυρήνα του σμήνους και ασθενές (απλή παραμόρφωση του αντικειμένου) στα εξωτερικά του μέρη. Η παραμόρφωση των εικόνων των απομακρυσμένων αντικειμένων, λόγω της βαρύτητας του σμήνους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή του σχήματος του βαρυτικού δυναμικού και συνεπώς της μάζας του (Tyson et al. 1999; Bradač et al. 2005). Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τις μάζες των σμηνών χωρίς να στηρίζεται στις δυναμικές παρατηρήσεις των γαλαξιών.

Γενικά, αυτοί οι τρεις τρόποι συμφωνούν ικανοποιητικά στα εξής:

- i) Ο λόγος μάζας προς φωτεινότητα ( $M/L$ ) για τα περισσότερα σμήνη γαλαξιών είναι μεγαλύτερος από  $100 M_{\odot} / L_{\odot}$ , και
- ii) Τα σμήνη περιέχουν πολύ περισσότερη ύλη από όση δείχνουν τα ορατά συστατικά τους (γαλαξίες και αέριο).

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες βαρυτικού φακού:

- **Ισχυρός βαρυτικός φακός (Strong lensing)**

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εύκολα ορατές παραμορφώσεις. Το φαινόμενο του ισχυρού βαρυτικού φακού παρατηρείται σε πλούσια σμήνη γαλαξιών και μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την κατανομή της βαρυτικής μάζας μέσα στα σμήνη. Μαζικοί γαλαξίες μπορούν να παραμορφώσουν τις εικόνες μακρινών αντικειμένων, όπως τα κβάζαρς· το αποτέλεσμα είναι ότι παρατηρούμε πολλαπλές εικόνες του ίδιου

κβάζαρ. Για εκτεταμένες πηγές στο παρασκήνιο μπορεί να εμφανιστούν τόξα ή ακόμη και δακτύλιοι Αϊνστάιν.

#### • Ασθενής βαρυτικός φακός (Weak lensing)

Σε αυτή την περίπτωση οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρότερες και μπορούν να ανιχνευθούν μόνο μέσω ανάλυσης των παραμορφώσεων του σχήματος ενός μεγάλου αριθμού αντικειμένων. Το φαινόμενο εμφανίζεται στατιστικά ως μια προτιμητέα επιμήκυνση των αντικειμένων στο παρασκήνιο, κάθετα προς τη διεύθυνση του κέντρου μάζας του σμήνους (Clowe et al. 2006).

Ο ασθενής φακός μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την κατανομή σκοτεινής ύλης τόσο σε σμήνη όσο και σε υπερσμήνη γαλαξιών. Για το πιο φωτεινό σμήνος γαλαξιών στις ακτίνες – X που είναι γνωστό, RXJ 1347.5–1145, με ερυθρομετατόπιση  $z = 0.45$ , η εκτίμηση της μάζας του μέσω βαρυτικού φακού είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή που προκύπτει από τα δεδομένα ακτίνων – X (Fischer, 1996).

Η ασυμφωνία που παρατηρείται σε ορισμένες περιπτώσεις μεταξύ των μαζών των σμηνών (όπως προσδιορίζονται από τον ασθενή/ισχυρό φακό και από τα δεδομένα ακτίνων – X) δεν έχει πλήρως κατανοηθεί, αν και διάφορα σενάρια έχουν προταθεί για να την ερμηνεύσουν (Ettori & Lombardi, 2003). Ο εκτιμώμενος λόγος μάζας προς φωτεινότητα για αυτό το σμήνος είναι  $M/L = 200 \pm 50$  σε ηλιακές μονάδες.

#### • Μικροβαρυτική εστίαση (Microlensing)

Σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρείται παραμόρφωση του σχήματος, αλλά μεταβολή της ποσότητας φωτός που λαμβάνουμε από ένα αντικείμενο στο βάθος. Η πηγή του φωτός και ο φακός μπορεί να είναι άστρα στο Γαλαξία μας ή σε γειτονικούς γαλαξίες (M31, Μαγγελανικά Νέφη). Το φαινόμενο του βαρυτικού μικροφακού χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βαρυονικής σκοτεινής ύλης. Ένα MACHO μπορεί να ανιχνευτεί όταν περνά μπροστά από ένα άστρο και η βαρύτητά του καμπυλώνει το φως, κάνοντας το άστρο να εμφανίζεται πιο φωτεινό (Paczynski, 1986). Η λέξη MACHO είναι ακρωνύμιο του Massive Astrophysical Compact Halo Object. Πρόκειται για έναν τύπο υποψήφιου αντικειμένου που είχε προταθεί ως πιθανή μορφή σκοτεινής ύλης στη γαλαξιακή άλω (halo). Τα MACHOs είναι συμπαγή, αστροφυσικά αντικείμενα που δεν ακτινοβολούν αρκετά ώστε να είναι εύκολα ανιχνεύσιμα, αλλά έχουν μάζα ικανή να προκαλεί το φαινόμενο του βαρυτικού φακού. Διάφορες μελέτες όμως έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στο συμπέρασμα ότι τα αντικείμενα αυτά απλά αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό της σκοτεινής ύλης.

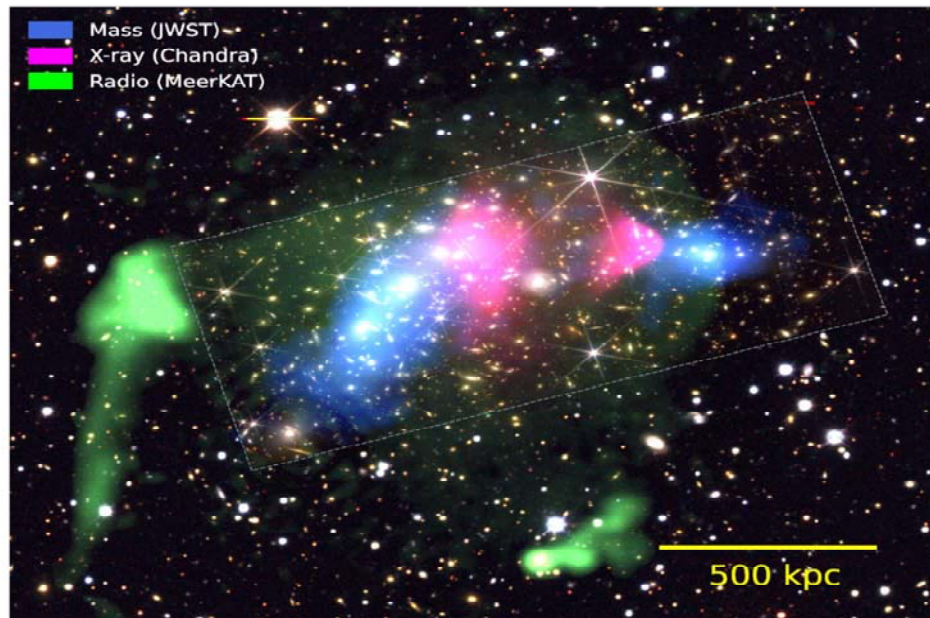
Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται το σμήνος κίτρινων, ελλειπτικών και σπειροειδών γαλαξιών με την ονομασία 0024+1654. Η μάζα των άστρων και του θερμού αερίου στο σμήνος είναι πολύ μικρή για να κάμψει το φως των γαλαξιών στο παρασκήνιο τόσο έντονα, οπότε απαιτείται μια μεγάλη συγκέντρωση σκοτεινής ύλης στο κέντρο του σμήνους για να εξηγηθούν αυτά τα δραματικά φαινόμενα βαρυτικού φακού (Tyson, 1998).



**Εικόνα 3.3:** Οι γαλαξίες που παρουσιάζουν φαινόμενα βαρυτικού φακού αποτελούν ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης. Στο σμήνος 0024+1654, οι κίτρινοι γαλαξίες ανήκουν στο ίδιο το σμήνος και αποτελούνται κυρίως από γηρασμένα άστρα, τα οποία εκπέμπουν ελάχιστα στο μπλε και στο υπεριώδες. Αντίθετα, οι αμυδροί μπλε γαλαξίες είναι μακρινοί γαλαξίες υψηλής ερυθρομετατόπισης, των οποίων το φως εκτρέπεται από τη μάζα του σμήνους στο προσκήνιο. Τα νεαρά άστρα τους εκπέμπουν στο υπεριώδες, το οποίο μετατοπίζεται προς μεγαλύτερα μήκη κύματος λόγω της διαστολής του Σύμπαντος και φτάνει σε εμάς ως ορατό μπλε φως. Ένας από αυτούς τους γαλαξίες παραμορφώνεται τόσο έντονα από τον βαρυτικό φακό ώστε εμφανίζεται ως πεπλατυσμένο «δαχτυλίδι», με τουλάχιστον τέσσερις πολλαπλές εικόνες του ίδιου αντικειμένου. Credit: W.N. Colley και E. Turner (Princeton University), J.A. Tyson (Bell Labs, Lucent Technologies) και NASA/ESA.

### β) Το σμήνος “Bullet” (1E 0657–558)

Ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τους Tucker et al. (Tucker et al. 1995) και αποτελεί την καλύτερη μέχρι σήμερα ένδειξη για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης. Αποτελείται από δύο σμήνη γαλαξιών: μία μεγάλη συγκέντρωση γαλαξιών και ένα λιγότερο μαζικό υποσμήνος, τα οποία συγκρούστηκαν πριν από περίπου 100 εκατομμύρια χρόνια. Λόγω της σύγκρουσης, το αστρικό συστατικό και το πλάσμα (που συμπεριφέρεται σαν ρευστό) διαχωρίστηκαν. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να τα μελετήσουμε ξεχωριστά.



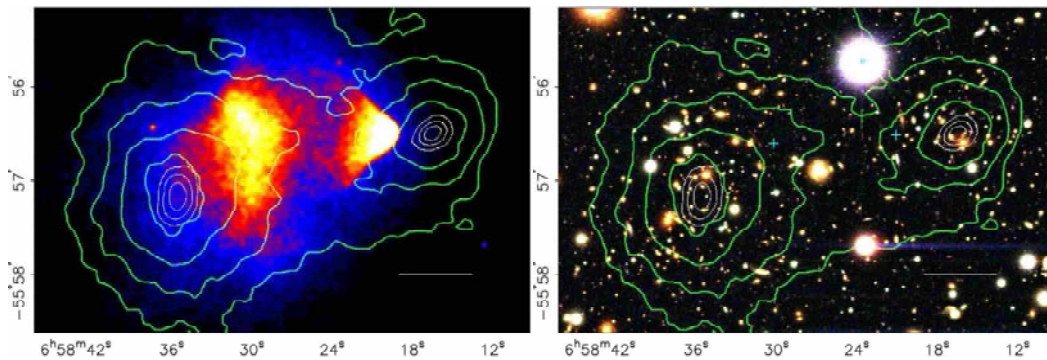
**Εικόνα 3.4:** Απεικόνιση του Bullet Cluster (1E 0657-56) σε διάφορα μήκη κύματος. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην κατανομή της ολικής μάζας (κυρίως σκοτεινή ύλη) (JWST) . Το ροζ χρώμα αντιστοιχεί στην εκπομπή ακτίνων – X από το θερμό ενδοσμηνιακό πλάσμα (Chandra). Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε ραδιοφωνική εκπομπή synchrotron (MeerKAT). Credit: (Cha et al. 2025)

Σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο ψυχρής σκοτεινής ύλης (CDM), κατά το αρχικό πέρασμα της σύγκρουσης, τα σωματίδια σκοτεινής ύλης και οι γαλαξίες συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως μη συγκρουόμενα (collisionless), ενώ το ενδοσμηνιακό πλάσμα που εκπέμπει ακτίνες – X επηρεάζεται από τη δυναμική πίεση (ram pressure). Ως αποτέλεσμα, οι γαλαξίες και η άλω σκοτεινής ύλης συμπίπτουν χωρικά μετά την αλληλεπίδραση, ενώ το αέριο που εκπέμπει ακτίνες – X μετατοπίζεται προς το κέντρο μάζας του συνολικού συστήματος.

Επιπλέον, σύμφωνα με τη θεωρία CDM, η μάζα του πλάσματος που εκπέμπει ακτίνες – X αποτελεί μικρό τμήμα της συνολικής μάζας του συστήματος. Πρόσφατες παρατηρήσεις σημανών υποδεικνύουν ότι η μάζα αυτή αποτελείται κατά προσέγγιση από (Rasia et al., 2025):

- 1~3% βαρυονική ύλη που είναι ορατή στα οπτικά και υπέρυθρα δεδομένα,
- 10~15% βαρυονική ύλη ορατή στα δεδομένα ακτίνων – X
- το υπόλοιπο 80 ~ 90% στη συνιστώσα σκοτεινής ύλης.

Επομένως, οι χαρτογραφήσεις μάζας που κατασκευάζονται με βάση τον ασθενή βαρυτικό φακό πρέπει να παρουσιάζουν τα κύρια μέγιστα μάζας σε καλή χωρική συμφωνία με τους γαλαξίες. Σε ένα σενάριο χωρίς σκοτεινή ύλη, όπως η θεωρία Τροποποιημένης Νευτώνειας Δυναμικής (MOND) (Milgrom, 1983), το αέριο των ακτίνων – X θα ήταν το κυρίαρχο συστατικό της συνολικής μάζας. Άρα, η ανακατασκευή της μάζας θα ανίχνευε ένα κύριο μέγιστο μάζας που θα συνέπιπτε χωρικά με το πλάσμα. Οι Douglas Clowe et al. (Clowe et al. 2006, 2008) παρουσίασαν νέα κατανομή μάζας μέσω του ασθενούς βαρυτικού φακού για το αλληλεπιδρών σμήνος 1E 0657–558. Όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες, εντόπισαν δύο διακριτά μέγιστα μάζας, καθένα εκ των οποίων ταυτίζεται χωρικά με μια υπερπύκνωση γαλαξιών. Αν θεωρήσουμε ότι το σύστημα αποτελείται μόνο από βαρυονική ύλη, το αέριο των ακτίνων – X και οι γαλαξίες θα παρέμεναν διαχωρισμένοι, αφού οι τελευταίοι συμπεριφέρονται ως μη συγκρούμενοι κατά τη συγχώνευση. Ωστόσο, δεδομένου ότι το θερμό πλάσμα θα αντιστοιχούσε στη συντριπτική πλειονότητα της μάζας του συστήματος, οποιαδήποτε προσπάθεια μέτρησης της μάζας θα ανίχνευε ένα υψηλότερο μέγιστο μάζας κοντά στην περιοχή όπου το αέριο των ακτίνων – X έχει αποσπαστεί, παρά γύρω από τους γαλαξίες. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται στο συγκεκριμένο σύστημα. Αντίθετα, το κέντρο της συνολικής μάζας που προκύπτει είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το κέντρο μάζας ενός αμιγώς βαρυονικού σεναρίου.



**Εικόνες 3.5 και 3.6: Αριστερή εικόνα:** Φωτογραφία ακτίνων – X του συγχωνευόμενου σμήνους “Bullet”, από το διαστημικό τηλεσκόπιο Chandra. **Δεξιά εικόνα:** Άμεση οπτική εικόνα του σμήνους, ληφθείσα με το τηλεσκόπιο Magellan των 6,5 m στο Αστεροσκοπείο Las Campanas. Και στις δύο εικόνες, οι πράσινες ισοϋψείς αντιστοιχούν σε επίπεδα ίσης πυκνότητας του βαρυτικού δυναμικού του σμήνους, όπως προέκυψαν μέσω ασθενούς βαρυτικού φακού από μακρινούς γαλαξίες. Οι λευκές ισοϋψείς δείχνουν τα σφάλματα στις θέσεις των μέγιστων μάζας. Η λευκή γραμμή αντιστοιχεί σε απόσταση 200 kpc. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ισοϋψείς του βαρυτικού δυναμικού συμπίπτουν με τη θέση των ορατών γαλαξιών, αλλά όχι με τη θέση του αερίου ακτίνων – X (Clowe et al. 2006).

### γ) CMB ανισοτροπίες

Η CMB είναι μια ασθενής αλλά ομοιόμορφη ακτινοβολία μικροκυμάτων που γεμίζει όλο το Σύμπαν. Προέρχεται από την εποχή που το Σύμπαν είχε ηλικία περίπου 380.000 χρόνια. Το Σύμπαν ήταν τόσο καυτό και πυκνό που τα φωτόνια συνεχώς σκεδάζονταν πάνω σε ελεύθερα ηλεκτρόνια – επομένως το φως δεν μπορούσε να ταξιδέψει ελεύθερα. Όταν η θερμοκρασία έπεσε στους ~3000 K, τα ηλεκτρόνια ενώθηκαν με τα πρωτόνια – δημιουργήθηκαν ουδέτερα άτομα – και τα φωτόνια μπόρεσαν επιτέλους να ταξιδέψουν ανεμπόδιστα. Αυτά τα φωτόνια, τα οποία ταξιδεύουν έκτοτε, τα ανιχνεύουμε σήμερα ως CMB.

Καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας υφίσταται μετατόπιση προς το ερυθρό, άρα η θερμοκρασία της μειώνεται. Σήμερα η CMB ακολουθεί φάσμα μέλανος σώματος, με τη θερμοκρασία της να ισούται με (Fixsen, 2009) :

$$T_{CMB} = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$$

Η παραπάνω τιμή προέκυψε από ακριβείς μετρήσεις της ακτινοβολίας υποβάθρου σε όλο το Σύμπαν, κυρίως με το όργανο FIRAS του δορυφόρου COBE. Τα δεδομένα επιβεβαίωσαν ότι η ακτινοβολία συμπεριφέρεται ως σχεδόν τέλειο μαύρο σώμα, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για τις πρώιμες φάσεις του σύμπαντος. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις από WMAP και Planck βελτίωσαν περαιτέρω την ακρίβεια της μέτρησης, αλλά η κεντρική τιμή δεν αλλάζει ουσιαστικά. Παρά την ομοιομορφία της υπάρχουν μεταβολές στη θερμοκρασία της για κάθε περιοχή του ουρανού με διακυμάνσεις της τάξεως  $\frac{\delta T}{T} = 1.1 * 10^{-5}$ . Οι μικρές αυτές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, γνωστές ως ανισοτροπίες της CMB, προκύπτουν από εξίσου μικρές διαφορές στην πυκνότητα και τη βαρύτητα του πρώιμου Σύμπαντος. Οι ψυχρότερες περιοχές αντιστοιχούν σε ελαφρώς πιο πυκνές περιοχές<sup>8</sup>, όπου η βαρύτητα ήταν ισχυρότερη, ενώ οι θερμότερες αντιστοιχούν σε λίγο αραιότερες περιοχές.

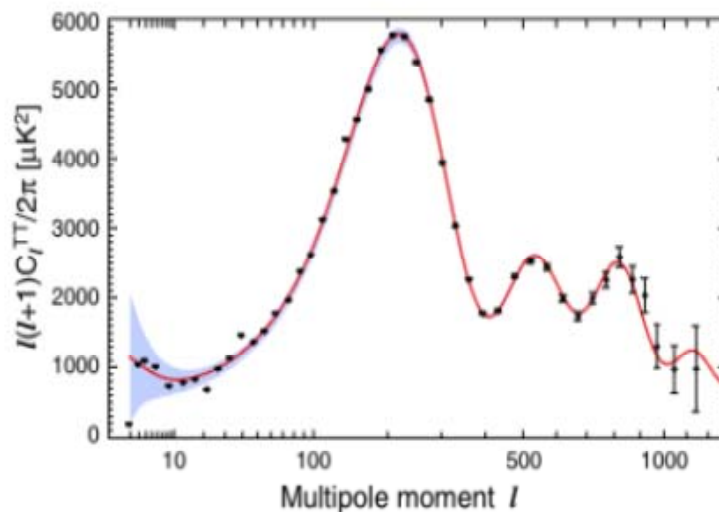
Αυτές οι αρχικές διακυμάνσεις στην πυκνότητα της ύλης αποτέλεσαν τους «σπόρους» της μελλοντικής κοσμικής δομής. Ακόμη και μικρές ανισότητες στην κατανομή της ύλης στο πρώιμο Σύμπαν ήταν αρκετές για να δημιουργήσουν βαρυτικά πεδία που επηρέαζαν την κίνηση της γύρω ύλης. Με την πάροδο του χρόνου, οι πυκνότερες περιοχές προσέλκυσαν συνεχώς περισσότερη ύλη, αυξάνοντας περαιτέρω την τοπική βαρύτητα και οδηγώντας σε βαρυτική κατάρρευση. Αυτή η διαδικασία δημιούργησε τα πρώτα σπειροειδή και ελλειπτικά πρωτο – γαλαξιακά σμήνη, τα οποία αποτέλεσαν τους βασικούς «πυρήνες» για τον σχηματισμό μεγαλύτερων γαλαξιών. Σταδιακά, μέσω συνεχούς συγχώνευσης και συσσώρευσης

<sup>8</sup> Όταν η βαρυτική δυναμική είναι ισχυρότερη, τα φωτόνια υποβάλλονται σε βαρυτική μετατόπιση προς το κόκκινο κατά την έξοδό τους από την βαρυτική πηγή, με αποτέλεσμα η παρατηρούμενη θερμοκρασία της περιοχής να μειώνεται.

ύλης, σχηματίστηκαν οι σύνθετες κοσμικές δομές που παρατηρούμε σήμερα, όπως γαλαξιακά σμήνη, υπερσμήνη και οι εκτεταμένοι ιστοί της κοσμικής ύλης.

Οι ανισοτροπίες δεν εμφανίζονται τυχαία: το μοτίβο τους αντανακλά τις ακουστικές ταλαντώσεις του πλάσματος πρωτονίων – ηλεκτρονίων στο πρώιμο Σύμπαν, λίγο πριν από την αποσύζευξη. Αυτές οι ταλαντώσεις καταγράφονται στο φάσμα ισχύος της CMB, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, όπου οι κορυφές (acoustic peaks) παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για βασικές παραμέτρους της κοσμολογίας, όπως:

- τη συνολική καμπυλότητα του Σύμπαντος
- την ποσότητα σκοτεινής και βαρυονικής ύλης
- το ποσοστό σκοτεινής ενέργειας
- την ηλικία και το ρυθμό διαστολής ( $H_0$ ) του Σύμπαντος



**Διάγραμμα 3.5:** Φάσμα γωνιακής ισχύος της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου (CMB): οι μαύρες κουκίδες και οι ράβδοι σφαλμάτων αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις του δορυφόρου WMAP. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο βέλτιστο θεωρητικό πρότυπο του  $\Lambda$ CDM που αποκαλύπτουν τις ακουστικές ταλαντώσεις στο πρώιμο Σύμπαν. Η μπλε ζώνη αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη διασπορά (κοσμική διακύμανση) λόγω της τυχαιότητας των πρώιμων διαταραχών. Credit: WMAP science team (Larson et al. 2011)

Από τις κορυφές της παράστασης μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα βαρυονικής μάζας και συνολικής μάζας,  $\Omega_b h^2 = 0.0227$ ,  $\Omega_m h^2 = 0.1334$ <sup>9</sup>. Επομένως αφού οι αριθμοί δεν είναι ίσοι η βαρυονική μάζα είναι μόνο ένα μέρος της συνολικής μάζας και η διαφορά τους είναι η σκοτεινή ύλη  $\Omega_{dm} h^2 = 0.1107$ . (Larson et al. 2011)

<sup>9</sup> Η τιμή αυτή είναι όλη η ύλη που χρειάζεται για να εξηγήσει τις κορυφές.

#### δ) Πρόσθετες ενδείξεις

Περαιτέρω ενδείξεις που υποδηλώνουν την πιθανή ύπαρξη της σκοτεινής ύλης μπορούν να προέλθουν από:

##### i) Σμήνη γαλαξιών.

Γνωρίζουμε από τη δεκαετία του 1930 ότι τα βαρυτικά δυναμικά των σμηνών γαλαξιών είναι πολύ βαθιά για να οφείλονται στη διαπιστωμένη βαρυονική μάζα και σε έναν νευτώνιο νόμο βαρύτητας που φθίνει ως  $r^{-2}$ . Το 1933 ο Fritz Zwicky μέτρησε τις ερυθρές μετατοπίσεις γαλαξιών στο σμήνος της Κόμης και διαπίστωσε ότι οι ταχύτητες των μεμονωμένων γαλαξιών σε σχέση με τη μέση ταχύτητα του σμήνους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που αναμένονταν βάσει της υπολογισμένης συνολικής μάζας του σμήνους, η οποία είχε εκτιμηθεί από τις μάζες των επιμέρους γαλαξιών.

Ο μόνος τρόπος να μη διαλυθεί γρήγορα το σμήνος λόγω διαστολής είναι να υποθέσουμε ότι περιέχει τεράστιες ποσότητες κάποιας άορατης σκοτεινής ύλης, της λεγόμενης “dunkle Materie”. Σύμφωνα με την εκτίμησή του, η ποσότητα της σκοτεινής ύλης στο σμήνος υπερβαίνει τη συνολική μάζα των γαλαξιών τουλάχιστον δέκα φορές, πιθανότατα ακόμα περισσότερο. Από τις μετρήσεις της διασποράς ταχυτήτων των γαλαξιών του σμήνους, υπολόγισε επίσης έναν λόγο μάζας προς φωτεινότητα περίπου 400 ηλιακών μαζών ανά ηλιακή φωτεινότητα (Zwicky, 1933). Η ίδια ανάλυση σήμερα δίνει μικρότερο συντελεστή, λόγω της καλύτερης εκτίμησης της μάζας του φωτεινού υλικού, αλλά παραμένει σαφές ότι η μεγάλη πλειονότητα της ύλης είχε σωστά συναχθεί ότι είναι σκοτεινή.

##### ii) Το βαρυτικά περιορισμένο μεσοσμηνιακό μέσο (ICM) στα σμήνη.

Οι ακτινογραφίες (X – ray) σμηνών γαλαξιών έχουν αποκαλύψει ότι περικλείουν, στους πυρήνες τους, μεγάλες ποσότητες πλάσματος θερμαινόμενου έως και 100 εκατομμύρια Κέλβιν. Χωρίς τη σκοτεινή ύλη, ούτε η βαρύτητα του σμήνους θα ήταν αρκετή για να συγκρατήσει αυτό το θερμό αέριο, ούτε η θερμοκρασία του θα μπορούσε να φτάσει τόσο υψηλές τιμές.

### 3.2 Κατανομές πυκνότητας σκοτεινής ύλης

Η κατανομή της σκοτεινής ύλης στους γαλαξίες και στα σμήνη αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση της δυναμικής τους, της διαδικασίας σχηματισμού δομών και της φύσης της ίδιας της σκοτεινής ύλης. Επειδή η σκοτεινή ύλη δεν εκπέμπει ακτινοβολία, οι κατανομές πυκνότητας προσδιορίζονται έμμεσα, είτε μέσω της βαρυτικής επίδρασης στη φωτεινή ύλη (καμπύλες περιστροφής, φαινόμενο

βαρυτικού φακού), είτε μέσω κοσμολογικών αριθμητικών προσομοιώσεων που αναπαράγουν τη μη – βαρυονική κατάρρευση υλικού σε σφαιρική άλω.

Η επικρατούσα άποψη της επιστημονικής κοινότητας είναι ότι δεν υπάρχουν «μοναχικοί» γαλαξίες· όλοι περιβάλλονται από εκατοντάδες νάνους – γαλαξίες, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι μέσα στην άλω της σκοτεινής ύλης που περικλείει τον κεντρικό γαλαξία. Σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο της Κοσμολογίας, οι δομές αναπτύσσονται ιεραρχικά: αρχικά καταρρέουν μικρότερες άλω υπό τη δική τους βαρύτητα και στη συνέχεια συγχωνεύονται σχηματίζοντας μεγαλύτερες και πιο μαζικές σφαιρικές κατανομές σκοτεινής ύλης . Η θεωρία υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο που έπαιξαν οι νάνοι – γαλαξίες, καθώς θεωρούνται φυσικά δομικά στοιχεία που συγκροτούν μεγαλύτερες δομές, τα οποία δημιουργήθηκαν από μικρής κλίμακας διακυμάνσεις πυκνότητας στο πρώιμο Σύμπαν. Επομένως, γαλαξίες όπως ο δικός μας θα πρέπει να περιβάλλονται από εκατοντάδες έως και χιλιάδες τέτοιες υποδομές (subhalos) (Moore et al. 1999a; Diemand et al. 2008).

Μια άλως σκοτεινής ύλης εκτείνεται πολύ πέρα από τα όρια του ορατού γαλαξία, σε αποστάσεις που μπορούν να φτάσουν ακόμα και τα 600 kpc, ενώ η μάζα της κυριαρχεί στη συνολική μάζα του συστήματος. Δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, αλλά η ύπαρξή της αποδεικνύεται έμμεσα από τις επιδράσεις της στις κινήσεις των άστρων και του αερίου μέσα στον γαλαξία. Ποικίλα παρατηρησιακά εργαλεία που αναλύσαμε παραπάνω —καμπύλες περιστροφής δίσκων, κινηματική άστρων, δακτύλιοι αερίου, κινήσεις σφαιρωτών σημών, πλανητικών νεφελωμάτων, καθώς και φαινόμενα βαρυτικού φακού— μας δίνουν τη δυνατότητα να περιγράψουμε λεπτομερώς τις κατανομές μάζας των άλω (Navarro, Frenk & White, 1996). Το συμπέρασμα είναι ότι οι άλως σκοτεινής ύλης που περιβάλλουν τους γαλαξίες δεν κατανέμονται ομοιόμορφα. Αντίθετα, είναι τριαξονικές και παρουσιάζουν πλούσια υποδομή (substructure).

Το 1996 οι Julio F. Navarro, Carlos S. Frenk και Simon D. M. White χρησιμοποίησαν προσομοιώσεις N – σωμάτων για να μελετήσουν τη δομή των σκοτεινών άλω στο Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο ψυχρής σκοτεινής ύλης. Μελέτησαν αντικείμενα με μάζες που κυμαίνονταν από αυτές των άλω νάνων γαλαξιών έως εκείνες πλούσιων σημών γαλαξιών. Η μελέτη τους έδειξε ότι οι κατανομές πυκνότητας της σκοτεινής ύλης χαρακτηρίζονται από λογαριθμικές κλίσεις που μεταβάλλονται ομαλά και ακολουθούν τον τύπο:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2} , \quad (3.4)$$

$\rho \propto r^{-1}$  για μικρές αποστάσεις και  $\rho \propto r^{-3}$  για μεγάλες αποστάσεις

Όπου  $r_s$  είναι η χαρακτηριστική ακτίνα (η ακτίνα όπου  $\rho(r) = \frac{\rho_0}{4}$ ) και  $\rho_0$  είναι η χαρακτηριστική εσωτερική πυκνότητα της άλω. Το προφίλ NFW έγινε δημοφιλές και ονομάστηκε «καθολικό» επειδή μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία μαζών των άλω, καλύπτοντας 4 τάξεις μεγέθους — από μεμονωμένους γαλαξίες έως άλω πλούσιων σμηγών — καθώς και σε μια μεγάλη ποικιλία κοσμολογικών σεναρίων.

Ολοκληρώνοντας την πυκνότητα  $\rho_{NFW}(r)$  πάνω σε έναν όγκο, προκύπτει η συνολική μάζα της ψυχρής σκοτεινής ύλης μέσα σε αυτόν τον όγκο, δηλαδή:

$$M(r) = \int_0^r \rho(r') 4\pi r'^2 dr' \quad (3.5)$$

Πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι η κατανομή NFW δεν είναι η μόνη που μπορεί να εφαρμοστεί σε μια δομή σκοτεινής ύλης. Ορισμένοι συγγραφείς (Avila – Reese et al. 1998) έβγαλαν το συμπέρασμα ότι η κατανομή πυκνότητας εξαρτάται από το περιβάλλον, με το NFW να είναι κατάλληλο μόνο για απομονωμένες άλω. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πιο γενική παραμετροποίηση για την πυκνότητα μιας άλω σκοτεινής ύλης (Kravtsov et al. 1998).

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\gamma \left(1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha\right)^{\frac{\beta-\gamma}{\alpha}}} \quad (r \leq r_{vir})^{10}, \quad (3.6)$$

Όπου  $\gamma$  είναι η ασυμπτωτική εσωτερική κλίση του προφίλ,  $\beta$  είναι η εξωτερική κλίση και το  $\alpha$  παραμετροποιεί τη μετάβαση μεταξύ των δύο κλίσεων, με μεγαλύτερες τιμές του  $\alpha$  να αντιστοιχούν σε πιο απότομες μεταβάσεις. Πρέπει να σημειώσουμε ότι για διαφορετικές τιμές των  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  προκύπτουν οι διαφορετικές κατανομές πυκνότητας που έχουν προταθεί κατά καιρούς.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 1

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Kra	2.0	3.0	0.4
NFW	1.0	3.0	1.0
Moore	1.5	3.0	1.5
G&G Iso	2.0	2.0	0

**Πίνακας 3.1: Στήλη (1):** Από πάνω προς τα κάτω: Kravtsov (Kravtsov et al. 1998), Navarro Frenk & White, Moore (Moore et al. 1999a), Isothermal (Gunn & Gott, 1972). **Στήλες (2, 3,**

<sup>10</sup> Η virial ακτίνα ( $r_{vir}$ ) είναι έννοια της αστροφυσικής και περιγράφει το «μέγεθος» ενός βαρυτικά δεσμευμένου συστήματος, όπως ένας γαλαξίας, ένα σμήνος γαλαξιών ή μια άλω σκοτεινής ύλης. Η συνθήκη  $r \leq r_{vir}$  σημαίνει ότι η κατανομή πυκνότητας ισχύει μόνο μέχρι το  $r_{vir}$ .

4): Οι διαφορετικές τιμές των τριών παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατανομές πυκνότητας.

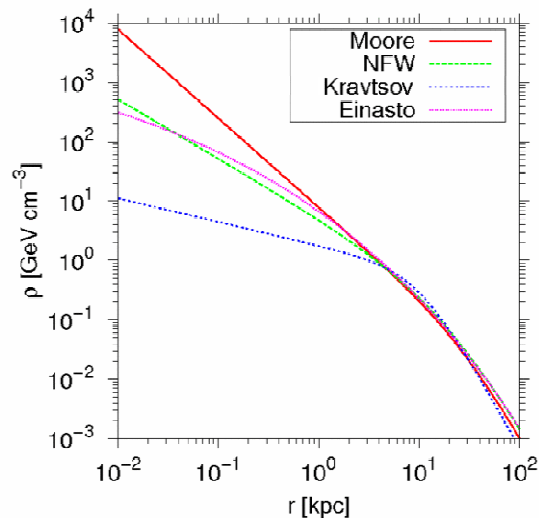
Ο Jaan Einasto<sup>11</sup> το 1965 (Einasto, 1965) πρότεινε μια απλή γενικευμένη εκθετική έκφραση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή όλων των γαλαξιακών πληθυσμών συμπεριλαμβανομένων των άλω σκοτεινής ύλης :

$$\rho(r) = \rho(0)\exp(-(r/r_0)^{1/N}) \quad (3.7)$$

Όπου  $r_0$  είναι η ακτίνα κλίμακας<sup>12</sup> του γαλαξιακού πληθυσμού και το  $N$  αποτελεί δομική παράμετρο που καθορίζει τη μορφή της κατανομής πυκνότητας.

Αρχικά η παραπάνω έκφραση χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη φωτεινή κατανομή αστερών σε γαλαξίες και όχι τη σκοτεινή ύλη. Η εφαρμογή του στη σκοτεινή ύλη και στις υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεις  $N$  – σωμάτων έγινε πολύ αργότερα, μετά το 2004–2010 (Navarro et al. 2010; Diemand et al. 2007; Diemand et al. 2008)

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.6, είναι σαφές ότι η κλίση της κατανομής πυκνότητας πρέπει να αυξάνεται καθώς μετακινείται κανείς από το κέντρο ενός γαλαξία προς τις εξωτερικές του περιοχές· ωστόσο, η ακριβής τιμή του νόμου δύναμης στις πιο εσωτερικές γαλαξιακές περιοχές εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο συζήτησης.



**Διάγραμμα 3.6:** Κατανομή πυκνότητας της άλω σκοτεινής ύλης ως συνάρτηση της ακτίνας για διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις (Moore, NFW, Kravtsov και Einasto). (ICE CUBE, 2009).

<sup>11</sup> Εσθονός αστροφυσικός και ένας από τους πρώτους υποστηρικτές της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος.

<sup>12</sup> Είναι η ακτίνα που καθορίζει σε ποια χωρική κλίμακα αρχίζει η πυκνότητα να μειώνεται σημαντικά από την κεντρική της τιμή.

Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι οι παλιρροϊκές δυνάμεις είναι υπεύθυνες για την αλλαγή τόσο της δομής όσο και της κατανομής μάζας των δορυφορικών γαλαξιών που περιφέρονται γύρω από έναν μεγαλύτερο. Ισχυρά παλιρροϊκά σοκ, τα οποία συμβαίνουν κατά τη διέλευσή τους από το περίκεντρο, οδηγούν τελικά σε απώλεια μάζας. Η δομή της πυκνότητας της εναπομείνουσας υποάλω μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τον τύπο (Kazantzidis et al. 2004):

$$\rho(r) \propto r^{-\gamma} \exp\left(-\frac{r}{r_b}\right), \quad (3.8)$$

Όπου η παράμετρος  $\gamma$  καθορίζει πόσο απότομα ανεβαίνει η πυκνότητα προς το κέντρο και το  $r_b$  είναι η αποτελεσματική «ακτίνα θραύσης» που περιγράφει την εξωτερική αποκοπή η οποία προκαλείται από τις παλιρροϊκές επιδράσεις<sup>13</sup>.

Πιο σύγχρονες υδροδυναμικές και βαρυτικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης (Aquarius Project 2010 (Navarro et al. 2010), Via Lactea (Diemand et al. 2007) και Via Lactea II (Diemand et al. 2008) ) έχουν καταλήξει ότι η παραπάνω κατανομή Einasto, που αναφέραμε, περιγράφει πιο πιστά τις άλω σκοτεινής ύλης από το καθολικό NFW, ιδιαίτερα σε μικρές και ενδιάμεσες ακτίνες.

Ακόμη πιο νέες παρατηρήσεις υψηλής ακρίβειας από αστρονομικές αποστολές όπως η GAIA<sup>14</sup> (Mondino et al. 2024) και τηλεσκόπια όπως το JWST<sup>15</sup> (Scognamiglio, et al. 2026) παρέχουν λεπτομερές μετρήσεις θέσεων, ταχυτήτων και ιδιοτήτων αερίου και αστρικών πληθυσμών σε γαλαξίες, αποκαλύπτοντας ότι η κατανομή της σκοτεινής ύλης δεν είναι ομοιογενής αλλά εμφανίζει σημαντική ποικιλία στις εσωτερικές κλίσεις των άλω. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα δείχνουν ότι οι κεντρικές περιοχές των γαλαξιών μπορεί να έχουν είτε ρηγά cores είτε πιο αιχμηρά cusps, ανάλογα με τη μάζα του γαλαξία, την ιστορία σχηματισμού του και τη δυναμική αλληλεπίδραση με βαρυονικά συστατικά, όπως αστέρια και αέριο. Επιπλέον, μεγάλες επίγειες έρευνες όπως LSST<sup>16</sup> (Legacy Survey of Space and Time) στο Vera Rubin Observatory (Blum et al. 2022), αναμένεται να θέσουν ακόμη αυστηρότερους περιορισμούς στην υποδομή των άλω και στην πρόβλεψη μικρότερων άλω του  $\Lambda$ CDM.

Συνοψίζοντας, οι κατανομές πυκνότητας της σκοτεινής ύλης αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο για την κατανόηση της εσωτερικής δομής και της εξελικτικής ιστορίας των γαλαξιών και των υποδομών τους. Παρά την ευρεία χρήση της

<sup>13</sup> Ουσιαστικά για  $r \gg r_b$  η πυκνότητα πέφτει γρήγορα.

<sup>14</sup> Διαστημικό τηλεσκόπιο της ESA (European Space Agency), εκτοξευμένο το 2013. Στόχος: Χαρτογράφηση πάνω από 1 δισεκατομμύριο αστέρια στον Γαλαξία με εξαιρετική ακρίβεια θέσης, απόστασης και σχετικής κίνησης.

<sup>15</sup> JWST (James Webb Space Telescope) : Εκτοξεύτηκε το 2021 από τη NASA, σε συνεργασία με ESA και CSA. Στόχος: Παρατήρηση του πρώιμου Σύμπαντος, πρώτων γαλαξιών, αστρικών σχηματισμών και της δυναμικής αερίου σε υψηλές ευκρίνειες και μήκη κύματος υπέρυθρου φωτός.

<sup>16</sup> Η έρευνα ξεκίνησε το 2024 και αναμένεται να κρατήσει για μια δεκαετία.

καθολικής κατανομής NFW και των γενικευμένων παραμετροποιήσεων που το περιλαμβάνουν, όπως οι μορφές των Kravtsov και Moore ή την εκθετική κατανομή Einasto, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με τη συμπεριφορά της σκοτεινής ύλης στις πιο εσωτερικές περιοχές των άλω. Επιπλέον, οι παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις αποδεικνύεται ότι μεταβάλλουν ουσιαστικά την εξωτερική δομή των υποάλω, οδηγώντας σε αποκοπές που αποτυπώνονται σε κατανομές όπως της μορφής της εξίσωσης (3.8).

Οι διάφορες αυτές κατανομές, οι οποίες προκύπτουν από συνδυασμό παρατηρησιακών δεδομένων και προσομοιώσεων N – σωμάτων, αναδεικνύουν ότι η σκοτεινή ύλη δεν κατανέμεται με έναν μοναδικό τρόπο, αλλά εμφανίζει μια πλούσια ποικιλία δομών που αντανakλούν τις παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις, το ιστορικό σχηματισμού και το κοσμολογικό της περιβάλλον.

### 3.3 Θεωρητικά πλαίσια σκοτεινής ύλης

Η φύση της σκοτεινής ύλης παραμένει ένα από τα σημαντικότερα ανοιχτά ζητήματα της σύγχρονης κοσμολογίας και σωματιδιακής φυσικής. Αν και η ύπαρξή της υποστηρίζεται από πληθώρα παρατηρησιακών ενδείξεων — όπως οι καμπύλες περιστροφής γαλαξιών, η δυναμική των γαλαξιακών σμηγών, τα φαινόμενα βαρυτικού φακού, το φάσμα ανισοτροπιών της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου (CMB) και ο σχηματισμός δομών μεγάλης κλίμακας — η μικροσκοπική της σύσταση παραμένει άγνωστη. Στο πλαίσιο αυτό έχουν προταθεί πολυάριθμα θεωρητικά μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ως προς τη μάζα των υποθετικών σωματιδίων, τις αλληλεπιδράσεις τους, καθώς και τους μηχανισμούς παραγωγής τους στο πρώιμο Σύμπαν.

Το πρότυπο της ψυχρής σκοτεινής ύλης (Cold Dark Matter, CDM) αποτελεί το βασικό σημείο αναφοράς της σύγχρονης κοσμολογίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η σκοτεινή ύλη αποτελείται από μη σχετικιστικά σωματίδια κατά την εποχή σχηματισμού των δομών. Η μικρή θερμική τους ταχύτητα συνεπάγεται μικρό μήκος ελεύθερης διάχυσης (free-streaming length), γεγονός που επιτρέπει τον σχηματισμό δομών με ιεραρχικό τρόπο (“bottom-up”), δηλαδή μέσω συγχώνευσης μικρότερων άλω σε μεγαλύτερες δομές.

Η θεωρία CDM ενσωματώνεται στο Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM, το οποίο περιλαμβάνει επίσης τη σκοτεινή ενέργεια και περιγράφει με εντυπωσιακή ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα παρατηρήσεων. Μεταξύ των επιτυχιών του συγκαταλέγονται η κατανομή της ύλης σε μεγάλες κλίμακες, το φάσμα ανισοτροπιών της CMB, ο λόγος βαρυονικής προς ολική ύλη και η στατιστική των γαλαξιακών σμηγών.

Ωστόσο, σε μικρότερες κλίμακες ( $kpc-Mpc$ ), το πρότυπο CDM παρουσιάζει ορισμένες εντάσεις με τις παρατηρήσεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το cusp-core problem και το missing satellites problem. Οι αποκλίσεις αυτές έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη εναλλακτικών θεωρητικών πλαισίων, τα οποία τροποποιούν είτε τις ιδιότητες είτε τις αλληλεπιδράσεις της σκοτεινής ύλης.

Στο πλαίσιο της σωματιδιακής φύσης της σκοτεινής ύλης, έχουν προταθεί διάφορα υποψήφια σωματίδια. Μεταξύ των σημαντικότερων συγκαταλέγονται τα ασθενώς αλληλεπιδρώντα μαζικά σωματίδια (WIMPs), τα αξιόνια, καθώς και τα αδρανή (sterile) νετρίνα. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί θεωρίες που επεκτείνουν το απλό σενάριο της CDM, όπως οι θεωρίες Self-Interacting Dark Matter, στις οποίες η σκοτεινή ύλη εμφανίζει μη αμελητέα αυτοαλληλεπίδραση.

Τέλος, μια ευρύτερη κατηγοριοποίηση της σκοτεινής ύλης βασίζεται στις κινηματικές της ιδιότητες, διακρίνοντάς την σε ψυχρή (CDM), θερμή (Warm Dark Matter, WDM) και θερμή/σχετικιστική (Hot Dark Matter, HDM), ανάλογα με το αν τα σωματίδια είναι μη σχετικιστικά, ημi – σχετικιστικά ή σχετικιστικά κατά την εποχή σχηματισμού των δομών.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα κυριότερα θεωρητικά πλαίσια, οι μηχανισμοί παραγωγής τους, τα θεωρητικά κίνητρα και οι παρατηρησιακοί περιορισμοί τους.

### **3.3.1 Ασθενώς Αλληλεπιδρώντα Σωματίδια Μεγάλης Μάζας (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs)**

Η πιο μελετημένη κατηγορία υποψηφίων, ωστόσο, είναι αυτή των Ασθενώς Αλληλεπιδρώντων Σωματιδίων Μεγάλης Μάζας (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs), που εισήχθη αρχικά από τους Steigman & Turner (Steigman & Turner, 1985). Ο λόγος που έγιναν τόσο δημοφιλή είναι ότι σωματίδια τύπου WIMP, όπως για παράδειγμα το υπερσυμμετρικό neutralino, προκύπτουν φυσιολογικά από θεωρίες που επιδιώκουν να επεκτείνουν το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής, όπως η Υπερσυμμετρία (SUSY) (Blumenthal et al. 1984, Jungman et al. 1996). Επιπλέον, τέτοιου είδους σωματίδια αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της ασθενούς πυρηνικής δύναμης και της βαρύτητας, ενώ η μάζα τους μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 50 GeV έως μερικά TeV (Bertone et al. 2005). Όμως, παρά την εκτεταμένη έρευνα, μέχρι σήμερα δεν έχουν εντοπιστεί ενδείξεις ύπαρξης WIMPs.

### 3.3.2 Αξιόνια (Axions)

Τα αξιόνια είναι υποθετικά, πολύ ελαφρά και εξαιρετικά ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματίδια. Προκύπτουν από την προσπάθεια επίλυσης ενός προβλήματος της κβαντικής χρωμοδυναμικής (Peccei & Quinn, 1977; Weinberg, 1978).

Τα σωματίδια αυτά έχουν εξαιρετικά μικρές μάζες, συνήθως στην περιοχή των:

$$10^{-12} - 10^{-3} \text{ eV}$$

είναι σταθερά σε κοσμικές χρονικές κλίμακες, αλληλεπιδρούν πάρα πολύ ασθενώς με φωτόνια, ηλεκτρόνια και νουκλεόνια. Παρόλη τη μικρή τους μάζα τα αξιόνια συμπεριφέρονται ως ψυχρή σκοτεινή ύλη. Δυστυχώς ακόμη και σήμερα δεν έχουμε καταφέρει να ανιχνεύσουμε τα σωματίδια αυτά. Ωστόσο λόγω έλλειψης σήματος από WIMP ανιχνευτές, τα σωματίδια αυτά θεωρούνται σήμερα εξίσου ή και περισσότερο πολλά υποσχόμενοι υποψήφιοι σε σχέση με τα WIMPs.

### 3.3.3 Αδρανή Νετρίνα (Sterile Neutrinos)

Μια άλλη κατηγορία υποψηφίων σωματιδίων που θα μπορούσαν να αποτελούν τη σκοτεινή ύλη είναι τα ελαφριά αδρανή νετρίνα<sup>17</sup> (Dodelson & Widrow, 1993–94). Τα σωματίδια αυτά δεν αλληλεπιδρούν μέσω των τυπικών ασθενών αλληλεπιδράσεων, παρά μόνο μέσω της βαρύτητας και μέσω μιας πολύ μικρής μίξης<sup>18</sup> με τα ενεργά νετρίνα. Τα σωματίδια αυτά παράγουν ένα «ενδιάμεσο» μοντέλο μεταξύ θερμής και ψυχρής σκοτεινής ύλης (Warm Dark Matter – WDM). Τα αδρανή νετρίνα, ως WDM μπορούν να λύσουν ορισμένα προβλήματα στο CDM πλαίσιο που θα δούμε παρακάτω, όπως το “cusp – core” πρόβλημα (προβλέψεις αιχμηρών πυρήνων σε άλω DM) και να μειώσουν την υπερβολική συσσώρευση μικρών δορυφόρων (missing satellites problem). Μέχρι σήμερα, η ύπαρξη των αδρανών νετρίνων δεν έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά, αλλά παραμένουν από τους πιο μελετημένους και θεωρητικά ελκυστικούς υποψηφίους Warm Dark Matter.

### 3.3.4 Άλλες θεωρίες

Οι θεωρίες αυτοαλληλεπιδρώσας σκοτεινής ύλης (Self-Interacting Dark Matter, SIDM) προτείνουν ότι τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με μη αμελητέα διατομή σκέδασης, τροποποιώντας την κατανομή πυκνότητας των γαλαξιακών άλω και προσφέροντας πιθανή λύση σε προβλήματα μικρής κλίμακας του CDM, όπως το cusp – core.

<sup>17</sup> Υπάρχουν πολλές πιθανές μάζες, ανάλογα με το μοντέλο. Τα υποψήφια για σκοτεινή ύλη έχουν μάζα που κυμαίνεται στην περιοχή των 1 – 50 KeV.

<sup>18</sup> Μέσω αυτής της μικρής μίξης τα αδρανή νετρίνα μπορούν να παραχθούν στο πρώιμο Σύμπαν, π.χ. μέσω ταλαντώσεων από ενεργά νετρίνα (Dodelson – Widrow mechanism).

Παράλληλα, η σκοτεινή ύλη ταξινομείται συχνά με βάση τη θερμική της ταχύτητα στο πρώιμο Σύμπαν: η ψυχρή (Cold Dark Matter, CDM) αποτελείται από βαριά, μη σχετικιστικά σωματίδια και αναπαράγει επιτυχώς τη δομή μεγάλης κλίμακας· η θερμή (Warm Dark Matter, WDM), με σωματίδια μάζας της τάξης των  $keV/c^{219}$ , καταστέλλει τη δημιουργία μικρών δομών και μπορεί να μετριάσει εντάσεις της CDM· ενώ η θερμή/σχετικιστική (Hot Dark Matter, HDM), όπως τα νετρίνα, κινείται αρχικά σχετικιστικά και εξομαλύνει υπερβολικά τις διαταραχές, μη μπορώντας να εξηγήσει την παρατηρούμενη ιεραρχική ανάπτυξη δομών. Συνδυαστικά, οι παραπάνω θεωρίες προσφέρουν διαφορετικούς τρόπους κατανόησης της κοσμικής δομής και των περιορισμών της σκοτεινής ύλης.

Νεότερες θεωρητικές προσεγγίσεις για τη σκοτεινή ύλη περιλαμβάνουν τη Fuzzy Dark Matter (FDM), που αποτελείται από υπερ – ελαφριά αξιόνια μάζας περίπου  $10^{-24} - 10^{-22} eV$  (Anchordoqui et al. 2024). Το πλαίσιο αυτό προσφέρει μια φυσική εξήγηση για την έλλειψη πυκνών κεντρικών cusp σε μικρούς γαλαξίες και τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις σε υπο – άλω (subhalos), προβλήματα που οι παραδοσιακές προσομοιώσεις Cold Dark Matter δυσκολεύονται να εξηγήσουν.

Τέλος, μία από τις θεωρητικά ενδιαφέρουσες προτάσεις για τη φύση της σκοτεινής ύλης είναι ότι μπορεί να αποτελείται από πρωτογενείς μελανές οπές (Primordial Black Holes, PBHs), δηλαδή μελανές οπές που σχηματίστηκαν στις πρώτες φάσεις του Σύμπαντος, πολύ πριν τη γέννηση των άστρων και των γαλαξιών. Σε αντίθεση με τις μελανές οπές που προκύπτουν από την κατάρρευση αστέρων, οι πρωτογενείς, μπορούν να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μαζών, από πολύ μικρές ( $\sim 10^{16} - 10^{17} g$ ) έως αρκετές φορές τη μάζα του Ήλιου ( $\sim 1 - 10^3 M_{\odot}$ ) (Carr et al. 2017). Η συγχώνευσή τους θα παρήγαγε βαρυτικά κύματα, τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν από τα LIGO/Virgo. Οι ανιχνεύσεις συγχωνεύσεων μελανών οπών χρησιμοποιούνται ήδη για να θέσουν περιορισμούς στην πιθανή κατανομή των PBHs, αν και μέχρι σήμερα δεν έχει επιβεβαιωθεί κάποιο γεγονός ως πρωτογενής μελανή οπή (Clesse & García – Bellido, 2017; Inomata et al. 2020).

### 3.4 Μέθοδοι ανίχνευσης

Παρά την ισχυρή αστροφυσική και κοσμολογική τεκμηρίωση της ύπαρξης της σκοτεινής ύλης, η άμεση ανίχνευσή της παραμένει ένα από τα κεντρικά ζητήματα της σύγχρονης φυσικής. Οι προσπάθειες ανίχνευσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) άμεση ανίχνευση, (β) έμμεση ανίχνευση και (γ) παραγωγή σε επιταχυντές. Κάθε κατηγορία στοχεύει σε διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της σκοτεινής ύλης με τη συνήθη ύλη ή με τον ίδιο της τον εαυτό.

#### 3.4.1 Άμεση ανίχνευση

---

<sup>19</sup> η μάζα αναφέρεται σε ενεργειακές μονάδες μέσω της σχέσης  $E = mc^2$ .

Τα πειράματα άμεσης ανίχνευσης αποτελούν σήμερα μία από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους για την ανίχνευση σωματιδιακής σκοτεινής ύλης<sup>20</sup>. Η άμεση ανίχνευση αποσκοπεί στην παρατήρηση σπάνιων ελαστικών σκεδάσεων σωματιδίων σκοτεινής ύλης με πυρήνες ύλης, σε ευαίσθητους ανιχνευτές οι οποίοι τοποθετούνται συνήθως σε υπόγεια εργαστήρια μεγάλου βάθους, ώστε να μειωθεί το υπόβαθρο από τις κοσμικές ακτίνες. Η βασική ιδέα είναι απλή: αν ο Γαλαξίας είναι γεμάτος με σωματίδια σκοτεινής ύλης, τότε πολλά από αυτά τα σωματίδια θα πρέπει να διέρχονται διαρκώς από τη Γη. Καθώς κινούνται, περνούν μέσα από τον ανιχνευτή και συγκρούονται – σπάνια – με άτομα του ανιχνευτικού υλικού. Το αναμενόμενο σήμα είναι μια μικρή ανάκρουση πυρήνα (nuclear recoil), με ενέργεια της τάξης των  $keV$ .

Το πείραμα Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) αποτελεί ένα από τα πολλά πειράματα που έχουν σχεδιαστεί για την άμεση ανίχνευση σωματιδιακής σκοτεινής ύλης, υπό τη μορφή WIMPs. Το πρώτο στάδιο του πειράματος, CDMS I, ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και πραγματοποιήθηκε σε μια σήραγγα κάτω από την πανεπιστημιούπολη του Stanford. Το 2000 άρχισε να λειτουργεί το CDMS II και, από το 2010 και μετά, εξελίχθηκε στο SuperCDMS, το οποίο εγκαταστάθηκε βαθιά υπογείως στο μεταλλείο Soudan στη βόρεια Μινεσότα. Το πείραμα διεξήχθη για δύο χρόνια (2012–2014). Το 2016 σχεδιάστηκε η μετεγκατάστασή του στο SNOLAB (Sudbury Neutrino Observatory) στον Καναδά, μια βαθύτερη υπόγεια εγκατάσταση (2 km) που προσφέρει περιβάλλον χαμηλού υποβάθρου, κατάλληλο για πειράματα υψηλής ευαισθησίας. Κατά την τελευταία δεκαετία, αυτά τα διαδοχικά πειράματα έχουν επιτύχει κορυφαία παγκόσμια ευαισθησία στην άμεση ανίχνευση σκοτεινής ύλης. Η βασική ιδέα είναι ότι μια αλληλεπίδραση WIMP – πυρήνα θα πρέπει να αφήνει ένα μετρήσιμο ποσό ενέργειας σε έναν κατάλληλα ευαίσθητο ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές γερμανίου, του SuperCDMS, θα λειτουργούν σε θερμοκρασίες κάτω από 100 mK, ώστε να καταστεί δυνατή η διάκριση της εναποτιθέμενης ενέργειας από τη θερμική ενέργεια των ταλαντώσεων των πυρήνων του ανιχνευτή ([cdms.berkeley.edu](http://cdms.berkeley.edu); [snolab.ca](http://snolab.ca)).

Σήμερα, η άμεση ανίχνευση σωματιδίων σκοτεινής ύλης βασίζεται σε πειράματα που χρησιμοποιούν υγρό ξένο. Τα XENONnT στο Gran Sasso, Lux – Zepelin (LZ) στις ΗΠΑ και PandaX – 4T στην Κίνα αποτελούν την αιχμή της παγκόσμιας προσπάθειας, καταγράφοντας πιθανές αλληλεπιδράσεις WIMPs με πυρήνες ξένου. Ενώ πειράματα όπως τα DarkSide – 20k<sup>21</sup>, CRESST<sup>22</sup> και EDELWEISS<sup>23</sup> στοχεύουν

---

<sup>20</sup> Η μέθοδος αυτή έχει ως στόχο την ανίχνευση συγκεκριμένων σωματιδίων σκοτεινής ύλης, κυρίως WIMPs.

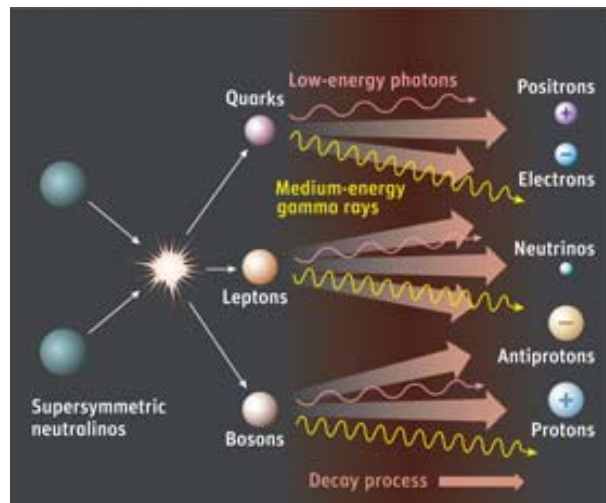
<sup>21</sup> Το πείραμα DarkSide – 20k έχει ξεκινήσει την εγκατάσταση και κατασκευή του ανιχνευτή στο υπόγειο Εθνικό Εργαστήριο Gran Sasso (LNGS) στην Ιταλία. Η λήψη δεδομένων αναμένεται να ξεκινήσει περίπου το 2026–2027.

<sup>22</sup> Υπόγειο πείραμα άμεσης αναζήτησης σκοτεινής ύλης που πραγματοποιείται στο Εθνικό Εργαστήριο Gran Sasso (LNGS) στην Ιταλία. Το CRESST λειτουργεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 σε διάφορες εκδοχές, με την τρέχουσα φάση (CRESST-III) σε πλήρη λειτουργία από το 2016–2017 και συνεχίζει να συλλέγει δεδομένα.

είτε σε συμπληρωματικές τεχνικές είτε σε ελαφρύτερους υποψηφίους σκοτεινής ύλης. Συνολικά, αυτά τα πειράματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μάζας και αλληλεπιδράσεων, αποτελώντας την πιο άμεση και τεχνολογικά προηγμένη αναζήτηση για σωματίδια σκοτεινής ύλης.

### 3.4.2 Έμμεση ανίχνευση

Η έμμεση ανίχνευση βασίζεται στην αναζήτηση προϊόντων εξαύλωσης ή διάσπασης σωματιδίων σκοτεινής ύλης, όπως φωτόνια, αντιύλη και νετρίνα. Σύμφωνα με τη θεωρία της υπερσυμμετρίας, τα WIMPs αποτελούν το δικό τους αντισωματίδιο· έτσι, όταν δύο WIMPs αλληλεπιδρούν, αλληλοαναιρούνται και απελευθερώνουν μια καταγιίδα δευτερογενών σωματιδίων καθώς και ακτίνων – γ. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις αναμένονται κυρίως σε περιοχές όπου τα σωματίδια σκοτεινής ύλης συσσωρεύονται, όπως το κέντρο των γαλαξιακών άλω, σε γαλαξίες χαμηλής φωτεινότητας (LSB), αλλά και σε μικρότερη κλίμακα, στο εσωτερικό του Ήλιου.



**Εικόνα 3.7:** Σχηματική αναπαράσταση των προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από την αλληλοεξουδετέρωση ή τη διάσπαση υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης, όπως τα υπερσυμμετρικά neutralinos. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορούν να παράξουν φωτόνια χαμηλής ή μέσης ενέργειας, λεπτόνια, κουάρκς, μποζόνια, καθώς και δευτερογενή σωματίδια όπως ποζιτρόνια, ηλεκτρόνια, νετρίνα, αντιπρωτόνια και πρωτόνια — σήματα που αναζητούνται στις μεθόδους έμμεσης ανίχνευσης της σκοτεινής ύλης (Sky & Telescope / Gregg Dinderman).

<sup>23</sup> Το πείραμα EDELWEISS είναι ένα υπόγειο πείραμα άμεσης αναζήτησης σκοτεινής ύλης, που βρίσκεται στο Εθνικό Εργαστήριο Modane (LSM) στα γαλλο – ιταλικά σύνορα, μέσα στο βουνό Fréjus. Το EDELWEISS λειτουργεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, με την τρέχουσα φάση (EDELWEISS-III) από το 2014 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Χρησιμοποιώντας το FGST (Fermi Gamma – ray Space Telescope), οι επιστήμονες ελπίζουν να εντοπίσουν υψηλής ενέργειας ίχνη σκοτεινής ύλης στην Τοπική Ομάδα Γαλαξιών, εστιάζοντας σε 10 νάνους ελλειπτικούς γαλαξίες (dwarf spheroidal galaxies) (Fermi – LAT Collaboration, 2015). Το κύριο πρόβλημα είναι να διακριθούν οι ακτίνες –  $\gamma$  που πιθανώς παράγονται από αλληλοεξουδετέρωση σωματιδίων σκοτεινής ύλης, από εκείνες που παράγονται από πολλές άλλες αστροφυσικές πηγές στο Σύμπαν. Για τον σκοπό αυτό, οι ερευνητές έχουν καθορίσει τέσσερις κατευθυντήριες γραμμές:

- i) Η Υπερσυμμετρία προβλέπει ότι οι αλληλοεξουδετερώσεις των WIMPs θα εκπέμπουν φωτόνια γάμμα με συγκεκριμένα μήκη κύματος, διαφορετικά από αυτά που προέρχονται από άλλες πηγές όπως μαύρες τρύπες ή υπερκαινοφανείς.
- ii) Οι αλληλοεξουδετερώσεις της σκοτεινής ύλης αναμένεται να παράγουν αποκλειστικά ακτινοβολία γάμμα, αποκλείοντας διεργασίες που σχετίζονται με άλλες μορφές ακτινοβολίας.
- iii) Το Fermi LAT θα πρέπει να ανιχνεύει αυτά τα σήματα όχι ως σημειακές πηγές, αλλά ως εκτεταμένες.
- iv) Οι ροές αυτών των ακτίνων –  $\gamma$  θα πρέπει να είναι συνεχείς, σε αντίθεση με τις εκρήξεις ακτίνων –  $\gamma$  (GRBs), που διαρκούν από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λίγα λεπτά.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν έχει εντοπιστεί σήμα ακτίνων –  $\gamma$  συμβατό με αλληλοεξουδετερώσεις WIMPs από το FGST.

Μία ακόμη «καθαρή» υπογραφή αλληλοεξουδετέρωσης σκοτεινής ύλης θα ήταν η παρατήρηση υψηλής ενέργειας νετρίνων προερχόμενων από το κέντρο του Ήλιου. Ένα μικρό ποσοστό WIMPs που διαπερνούν τον Ήλιο μπορεί να σκεδαστεί ελαστικά με πυρήνες και να χάσει αρκετή ορμή ώστε να παγιδευτεί βαρυτικά. Με αυτόν τον τρόπο, στη διάρκεια της ζωής του Ήλιου, μπορεί να έχει συσσωρευτεί μεγάλος αριθμός σωματιδίων σκοτεινής ύλης στο κέντρο του, αυξάνοντας την πιθανότητα αλληλοεξουδετέρωσης και παραγωγής νετρίνων υψηλής ενέργειας (Silk et al. 1985). Τα ηλιακά νετρίνα που παράγονται σε πυρηνικές αντιδράσεις έχουν ενέργειες στην περιοχή των  $MeV$ , επομένως η παρατήρηση νετρίνων με ενέργειες  $10^2$ – $10^4 GeV$  θα απαιτούσε εξήγηση σε όρους νέας φυσικής — και η αλληλοεξουδετέρωση WIMPs θα μπορούσε να την προσφέρει.

Ένας από τους κύριους στόχους του Παρατηρητηρίου Νετρίνων IceCube, που έχει κατασκευαστεί στην Ανταρκτική, είναι ακριβώς η ανίχνευση αυτών των νετρίνων, τα οποία παράγονται από αλληλοεξουδετερώσεις WIMPs στο εσωτερικό του Ήλιου (IceCube Collaboration, 2017). Ένα νέο βαθιά τοποθετημένο τμήμα, το DeepCore, σχεδιάστηκε για να μειώσει το ενεργειακό κατώφλι του IceCube κατά περισσότερο από μια τάξη μεγέθους — έως περίπου  $10 GeV$  — αυξάνοντας έτσι την ευαισθησία του. Το DeepCore βρίσκεται περίπου  $2100 m$  κάτω από την επιφάνεια του πάγου, στο κάτω κεντρικό τμήμα της υπάρχουσας διάταξης του IceCube, και άρχισε να

συλλέγει δεδομένα τον Μάιο του 2010. Μέχρι σήμερα δεν έχει παρατηρηθεί κανένα νετρίνο που να αποδίδεται σε αλληλοεξουδετέρωση WIMPs. Όμως είναι σε εξέλιξη το πρόγραμμα IceCube Upgrade<sup>24</sup>, με σκοπό την εγκατάσταση νέων οπτικών ανιχνευτών που θα επεκτείνουν την ευαισθησία του σε χαμηλότερες ενέργειες και βελτιωμένη απόδοση.

Πέρα από το FGST και το IceCube, υπάρχουν επίσης πολυάριθμα επίγεια και δορυφορικά προγράμματα έμμεσης ανίχνευσης, όπως τα τηλεσκόπια Cherenkov<sup>25</sup> (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS και το επερχόμενο CTA<sup>26</sup>), τα οποία στοχεύουν σε ακτίνες – γ πολύ υψηλής ενέργειας προερχόμενες από το Γαλαξιακό Κέντρο και από νάνους ελλειπτικούς γαλαξίες. Επιπλέον, πειράματα κοσμικών ακτίνων όπως τα AMS – 02<sup>27</sup>, DAMPE και CALET αναζητούν ανωμαλίες σε ροές ποζιτρονίων ή αντιπρωτονίων, που ενδέχεται να αποτελούν προϊόντα εξαύλωσης σκοτεινής ύλης.

### 3.4.3 Παραγωγή σε επιταχυντές

Η παραγωγή σκοτεινής ύλης σε επιταχυντές βασίζεται στην ιδέα ότι οι συγκρούσεις πρωτονίων σε πολύ υψηλές ενέργειες μπορούν να δημιουργήσουν νέα, άγνωστα σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν με τους ανιχνευτές και επομένως δεν ανιχνεύονται άμεσα. Αντίθετα, η παρουσία τους προδίδεται από έλλειμμα στην καταγεγραμμένη ενέργεια των προϊόντων της σύγκρουσης. Πειράματα όπως το ATLAS και το CMS στο CERN αναλύουν τέτοια γεγονότα, επιτρέποντας την πειραματική αναζήτηση υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης και τη δοκιμή θεωριών πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Το πρόγραμμα ATLAS<sup>28</sup> είναι ένα από τα μεγαλύτερα και πιο σύνθετα πειράματα στον κόσμο και έχει ως στόχο να μελετήσει τις συγκρούσεις πρωτονίων στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων, αναζητώντας νέα σωματίδια και φαινόμενα που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των θεμελιωδών νόμων της φύσης (Aad, et al. (ATLAS Collaboration, 2008)). Μετρώντας τα ίχνη, τις ενέργειες και τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων που παράγονται στις υψηλής ενέργειας συγκρούσεις, το ATLAS ερευνά τόσο προβλέψεις του Καθιερωμένου Προτύπου όσο και νέα φυσική, όπως την ύπαρξη υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης, την υπερσυμμετρία και πιθανές επιπλέον διαστάσεις. Το πρόγραμμα συνέβαλε καθοριστικά στην ανακάλυψη του

<sup>24</sup> Η εγκατάσταση αρχικά ήταν προγραμματισμένη για την περίοδο 2022–2023 (The IceCube Collaboration, 2019), όμως πρόκειται να ολοκληρωθεί στις αρχές του 2026.

<sup>25</sup> Αυτά τα τηλεσκόπια έχουν ήδη θέσει από τα πιο αυστηρά όρια για WIMPs με μάζες της τάξης TeV.

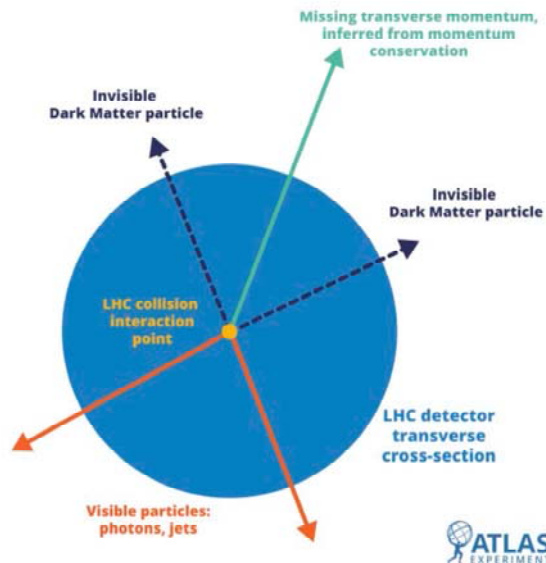
<sup>26</sup> CTA (Cherenkov Telescope Array) – το μελλοντικό, πολύ πιο ευαίσθητο παρατηρητήριο που θα αποτελέσει τη ναυαρχίδα των έμμεσων αναζητήσεων (CTA Consortium, 2019).

<sup>27</sup> AMS – 02 (Alpha Magnetic Spectrometer). Είναι τοποθετημένο στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό από το 2011 και έχει συλλέξει τον μεγαλύτερο όγκο δεδομένων υψηλής ακρίβειας από οποιοδήποτε άλλο όργανο του είδους του (AMS – 02 Collaboration, 2013).

<sup>28</sup> Το ATLAS προετοιμάζεται για την επόμενη μεγάλη φάση: την εποχή του High-Luminosity LHC (HL-LHC) (<https://atlas.cern/>), που ξεκινά γύρω στο 2030 με ακόμα περισσότερες συγκρούσεις και δεδομένα, και ήδη έχουν αρχίσει σημαντικές αναβαθμίσεις στον ανιχνευτή

μποζονίου Higgs το 2012 και συνεχίζει να είναι βασικό εργαλείο για τη διερεύνηση της δομής του Σύμπαντος και της προέλευσης της μάζας.

Στόχος του πειράματος CMS (Compact Muon Solenoid) είναι η μελέτη ενός ευρέος φάσματος φυσικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένης της αναζήτησης του μποζονίου Higgs (στόχος ο οποίος επιτεύχθηκε), επιπλέον διαστάσεων και σωματιδίων που θα μπορούσαν να αποτελούν τη σκοτεινή ύλη.



**Εικόνα 3.8:** Σχηματική αναπαράσταση ανίχνευσης υποψήφιων σωματιδίων σκοτεινής ύλης στον ATLAS. Τα ορατά σωματίδια καταγράφονται από τον ανιχνευτή, ενώ τα «αόρατα» σωματίδια σκοτεινής ύλης προκαλούν έλλειμμα εγκάρσιας ορμής, το οποίο υπολογίζεται από τη διατήρηση της ορμής. Credit: C. Doglioni, L.T. Wang & E. Ward/ATLAS Collaboration.

Μέχρι σήμερα κανένα πείραμα δεν έχει προσφέρει οριστική απόδειξη, αλλά οι περιοχές παραμέτρων περιορίζονται ολοένα και περισσότερο, διαμορφώνοντας ένα ολοένα πιο στενό "παράθυρο" πιθανών ιδιοτήτων της σκοτεινής ύλης.

### 3.5 Ο ρόλος της σκοτεινής ύλης στην κοσμική εξέλιξη

Η σκοτεινή ύλη παίζει καθοριστικό ρόλο στην πορεία και τη δομή του Σύμπαντος. Παρότι δεν εκπέμπει ή απορροφά φως, η βαρύτητά της επηρεάζει τα πάντα σε κοσμική κλίμακα. Οι βασικές της λειτουργίες στην κοσμική εξέλιξη είναι οι εξής:

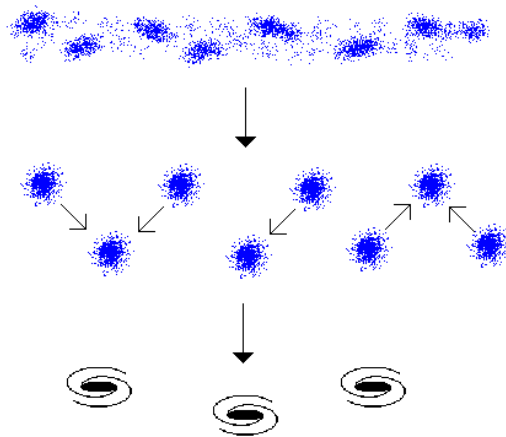
- **Σχηματισμός δομής σε όλες τις κλίμακες**

Η ψυχρή (αργοκίνητη) φύση της σκοτεινής ύλης επιτρέπει τον γρήγορο σχηματισμό υπερπυκνώσεων αμέσως μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Αυτές οι

υπερπυκνώσεις λειτουργούν ως βαρυτικά πηγάδια. Το ορατό (βαρυονικό) υλικό πέφτει μέσα σε αυτά και σχηματίζει τα πρώτα άστρα και γαλαξίες. Η ιεραρχική συγκέντρωση (bottom – up structure formation) – πρώτα μικρές δομές, μετά μεγαλύτερες – είναι βασική πρόβλεψη του  $\Lambda$ CDM και συμφωνεί με τις παρατηρήσεις (White & Rees, 1978; Jaber et al. 2024).

**Bottom-Up Structure Formation**

in a bottom-up scenario, small, dwarf galaxy-sized lumps form first, then merger to make galaxies and clusters of galaxies



**Εικόνα 3.9:** Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου «από κάτω προς τα πάνω» (bottom – up) στη δημιουργία δομών στο Σύμπαν. Μικρές γαλαξιακές συγκεντρώσεις σχηματίζονται πρώτες και στη συνέχεια συγχωνεύονται, οδηγώντας στη δημιουργία γαλαξιών και σμηνών γαλαξιών. Credit: James Schombert of University of Oregon.

- **Δημιουργία των σκοτεινών άλω**

Σύμφωνα με τη θεωρία  $\Lambda$ CDM, κάθε γαλαξίας βρίσκεται μέσα σε μια μεγάλη άλω σκοτεινής ύλης. Αυτές οι άλω καθορίζουν το σχήμα, το μέγεθος και την εξέλιξη των γαλαξιών. Χωρίς τον πρόσθετο «σκελετό» σκοτεινής ύλης, οι γαλαξίες δεν θα ήταν σταθεροί.

- **Καθορισμός των ταχυτήτων περιστροφής των γαλαξιών**

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η θεωρία  $\Lambda$ CDM εξηγεί με επιτυχία τις καμπύλες περιστροφής των γαλαξιών. Παρατηρούμε ότι οι γαλαξίες περιστρέφονται πολύ ταχύτερα από όσο θα επέτρεπε η μάζα που μπορούμε να δούμε. Η παρουσία σκοτεινής ύλης προσφέρει την επιπλέον βαρυτική έλξη που απαιτείται, ώστε οι καμπύλες περιστροφής να παραμένουν επίπεδες ακόμη και σε μεγάλες ακτινικές αποστάσεις.

- **Μορφοποίηση της μεγάλης κοσμικής δομής (cosmic web)**

Η σκοτεινή ύλη, σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο, διαμορφώνει ένα τεράστιο κοσμικό δίκτυο που αποτελείται από νημάτια (filaments), κόμβους (nodes) όπου συγκεντρώνονται τα σμήνη γαλαξιών, καθώς και εκτεταμένα κενά (voids) (Springel et al. 2005; Jaber et al. 2024). Το χαρακτηριστικό αυτό μοτίβο της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος συμφωνεί εξαιρετικά καλά με τις αστρονομικές παρατηρήσεις.

- **Επίδραση στην κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία (CMB)**

Η σκοτεινή ύλη επηρεάζει το ύψος και τη θέση των ακουστικών κορυφών στο φάσμα του CMB, καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία η ύλη έγινε κυρίαρχη έναντι της ακτινοβολίας και διαμορφώνει τη δυναμική της βαρυτικής κατάρρευσης στο πρώιμο Σύμπαν (Larson et al. 2011). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν εξαιρετικά καλά με τις παρατηρήσεις της αποστολής Planck της ESA (2009 – 2013) και άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις.

- **Καθορισμός της συνολικής μοίρας του Σύμπαντος**

Στο Καθιερωμένο Πρότυπο  $\Lambda$ CDM η σκοτεινή ύλη συμβάλλει ουσιαστικά στη συνολική πυκνότητα του Σύμπαντος, καθορίζει το πότε αρχίζει η επιτάχυνση της κοσμικής διαστολής λόγω της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$  και επηρεάζει σημαντικά τη χρονική εξέλιξη του ίδιου του ρυθμού διαστολής.

### 3.6 Προβλήματα/προκλήσεις

#### 3.6.1 Το πρόβλημα cusp – core.

Εκτός από τη δυσκολία της άμεσης ανίχνευσης των σωματιδίων σκοτεινής ύλης, ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το πρότυπο  $\Lambda$ CDM είναι το λεγόμενο «cusp–core» πρόβλημα. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις με CDM δείχνουν συστηματικά ότι οι σκοτεινές άλω σε νάνους και LSB (Low Surface Brightness) γαλαξίες αναπτύσσουν πολύ υψηλή κεντρική πυκνότητα, γνωστή ως cuspy profile (Berezinsky et al. 1992; Flores & Primack, 1994; Navarro, Frenk & White, 1996). Συγκεκριμένα, οι καμπύλες Navarro – Frenk – White (NFW) προβλέπουν ότι η πυκνότητα της άλω αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στο κέντρο, οδηγώντας σε πολύ απότομη κεντρική κορυφή.

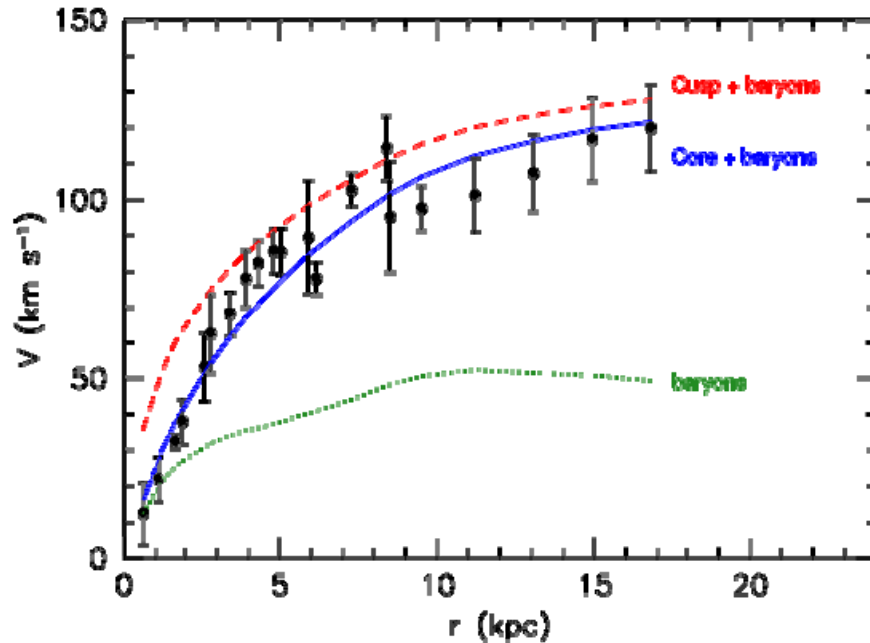
Αν οι πραγματικοί γαλαξίες ακολουθούσαν αυτήν την κατανομή, οι καμπύλες περιστροφής τους θα παρουσίαζαν έντονη αύξηση στο εσωτερικό τους, κάτι που όμως δεν παρατηρείται στα αστρονομικά δεδομένα. Οι περισσότερες παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι γαλαξίες, ιδιαίτερα οι νάνοι και οι LSB, έχουν πολύ πιο ρηχά κέντρα

πυκνότητας, ή αλλιώς «cores», όπου η πυκνότητα παραμένει σχεδόν σταθερή στο κεντρικό τμήμα. Η διαφορά αυτή αντανακλάται άμεσα και στις καμπύλες περιστροφής: μια cuspy κατανομή θα οδηγούσε σε πολύ απότομη άνοδο της ταχύτητας στα κεντρικά parsec, ενώ μια cored άλω προβλέπει μια σαφώς πιο ομαλή αύξηση, όπως ακριβώς παρατηρείται.

Η διαφορά ανάμεσα στις προσομοιώσεις και στις παρατηρήσεις αποτελεί σημαντική πρόκληση για το  $\Lambda$ CDM, υποδηλώνοντας είτε ότι οι προσομοιώσεις δεν περιλαμβάνουν πλήρως κρίσιμες φυσικές διεργασίες, είτε ότι η φύση της σκοτεινής ύλης μπορεί να διαφέρει από αυτή που προβλέπει το τυπικό CDM. Πράγματι, κλασικές προσομοιώσεις με ψυχρή σκοτεινή ύλη προβλέπουν «αιχμηρές» κατανομές πυκνότητας στο κέντρο των άλω, ενώ πολλές παρατηρήσεις δείχνουν σχεδόν σταθερής πυκνότητας «πυρήνες» στο κέντρο των γαλαξιών, γνωστό ως πρόβλημα «cusp – core» (Del Popolo, & Le Delliou, 2021).

Έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές λύσεις για να εξηγηθεί αυτή η ρηχότητα των πυρήνων. Από τη μία, βαρυονικές διεργασίες όπως δυναμική ανάδραση από υπερκαινοφανείς μπορεί να μεταβάλλουν την κατανομή μάζας και να «εξομαλύνουν» την κεντρική κατανομή (Sales et al. 2022). Από την άλλη, εναλλακτικές επιλογές στη φύση της σκοτεινής ύλης — όπως θερμή σκοτεινή ύλη (WDM), αυτοαλληλεπιδρώμενη σκοτεινή ύλη (SIDM) ή άλλοι μη – τυπικοί μηχανισμοί — μπορούν να παράγουν πιο επίπεδες εσωτερικές κατανομές άλω σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις (Del Popolo & Le Delliou, 2021).

Συνολικά, είτε απαιτείται πληρέστερη μοντελοποίηση των βαρυονικών διεργασιών στο πλαίσιο του  $\Lambda$ CDM, είτε εξετάζονται θεμελιώδεις επεκτάσεις στη φύση της σκοτεινής ύλης για να αντιστοιχούν καλύτερα στις παρατηρούμενες κατανομές πυκνότητας.

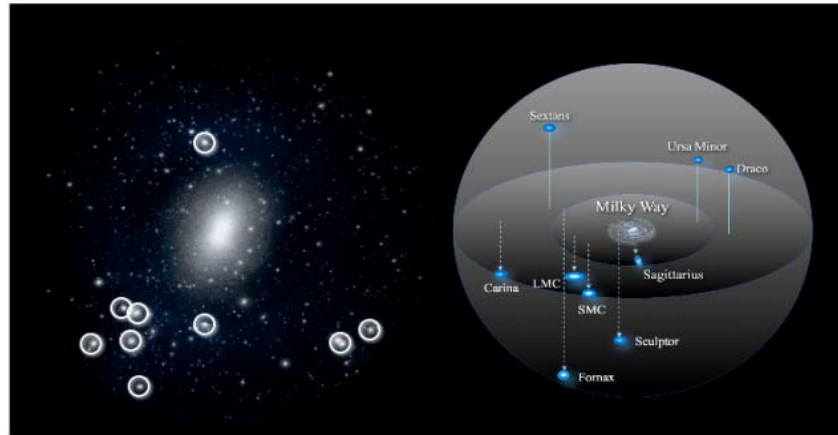


**Διάγραμμα 3.7: Το πρόβλημα cusp – core.** Καμπύλη περιστροφής του LSB γαλαξία F568 – 3 (Kuzio de Naray et al. 2008). Τα σημεία με τις γραμμές σφάλματος δείχνουν την μετρημένη καμπύλη περιστροφής του γαλαξία. Η πράσινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη βαρυονική συνεισφορά των άστρων και του αερίου στην καμπύλη περιστροφής. Παρατηρείται ότι ακόμη και στις πιο εσωτερικές περιοχές η συνεισφορά αυτή είναι μικρή. Η μπλε συνεχής γραμμή δείχνει την προβλεπόμενη καμπύλη περιστροφής, εφόσον θεωρήσουμε ότι η άλω σκοτεινής ύλης έχει πυρήνα σταθερής πυκνότητας, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί σε «αιχμηρή» (cuspy) άλω με κατανομή NFW. Όπως είναι εμφανές, η μπλε καμπύλη προσαρμόζεται στα δεδομένα πολύ καλύτερα.

Επομένως, η κατανομή της πυκνότητας στις σκοτεινές άλω αποτελεί ένα κρίσιμο τεστ για την τυπική θεωρία CDM σε γαλαξιακές κλίμακες. Το πρόβλημα cusp–core παραμένει έτσι ένα από τα πιο σημαντικά και εντυπωσιακά ζητήματα της σύγχρονης κοσμολογίας, καθώς αφορά την κατανόηση της κατανομής της σκοτεινής ύλης σε μικρές κλίμακες.

### 3.6.2 Το πρόβλημα της υποδομής των σκοτεινών άλω

Το λεγόμενο «πρόβλημα των χαμένων δορυφόρων» αναφέρεται στην αρχική παρατήρηση ότι οι αριθμητικές προσομοιώσεις ψυχρής σκοτεινής ύλης (CDM) για άλω μάζας  $\sim 10^{12} M_{\odot}$  προέβλεπαν πολλαπλάσιες υποάλω (subhalos) γύρω από τον Γαλαξία σε σχέση με τους νάνους δορυφόρους που παρατηρούνταν πριν το 2000 (Klypin et al., 1999; Moore et al., 1999). Οι πρώτες παρατηρήσεις κατέγραφαν μόνο εννέα δορυφόρους σε ακτίνα  $\sim 250$  kpc, ενώ οι προσομοιώσεις έδειχναν 5–20 φορές περισσότερες υποάλω.



**Εικόνα 3.10:** Το πρόβλημα των «χαμένων» δορυφόρων. Στα αριστερά απεικονίζεται η κατανομή της σκοτεινής ύλης (600  $kpc$  ανά πλευρά), όπως προκύπτει από αριθμητικές προσομοιώσεις μιας CDM άλω, μάζας  $10^{12} M_{\odot}$ . Οι κύκλοι σημειώνουν τις πιο μαζικά περιοχές (Garrison – Kimmel et al. 2017). Στα δεξιά παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των πρώτων παρατηρημένων δορυφόρων. Η διάμετρος της εξωτερικής σφαίρας είναι 300  $kpc$ . Σε σύγκριση με τις αριθμητικές προσομοιώσεις, οι δορυφόροι του Γαλαξία φαίνεται να είναι πολύ πιο κεντρικά συγκεντρωμένοι.

Με την πρόοδο της παρατηρησιακής τεχνολογίας, οι έρευνες SDSS (York et al. 2000; Kim, et al. 2018) και Dark Energy Survey (DES Collaboration, 2015) ανέδειξαν ένα νέο πληθυσμό «υπερ – αμυδρών» νάνων γαλαξιών, αυξάνοντας τον καταγεγραμμένο αριθμό δορυφόρων γύρω από τον Γαλαξία. Επιπλέον, οι σύγχρονες υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν βαρυνική φυσική δείχνουν ότι πολλές μικρές υποδομές δεν σχηματίζουν αστέρια και παραμένουν σκοτεινές, εξηγώντας γιατί δεν παρατηρούνται όλοι οι προβλεπόμενοι δορυφόροι (Garrison-Kimmel et al. 2017). Συνεπώς, η απόκλιση μεταξύ θεωρίας CDM και παρατήρησης μειώνεται σημαντικά, και το «πρόβλημα» θεωρείται πλέον ότι έχει σε μεγάλο βαθμό λυθεί, χωρίς να απαιτείται η απόρριψη του CDM ως θεωρητικού πλαισίου (Bullock & Boylan – Kolchin, 2017).

### 3.6.3 Το πρόβλημα των υπερβολικά μαζικών δορυφόρων

Το πρόβλημα των υπερβολικά μαζικών δορυφόρων (too big to fail problem) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα μικρής κλίμακας του προτύπου  $\Lambda$ CDM και αφορά στην ασυμφωνία ανάμεσα στις κοσμολογικές προσομοιώσεις σκοτεινής ύλης και στις παρατηρήσεις των δορυφόρων του Γαλαξία. Οι

προσομοιώσεις δείχνουν ότι γύρω από έναν γαλαξία σαν τον δικό μας θα πρέπει να υπάρχουν μερικές πολύ μαζικές και ιδιαίτερα πυκνές υποδομές σκοτεινής ύλης (subhalos), οι οποίες, λόγω της μεγάλης μάζας τους, θα έπρεπε «αναπόφευκτα» να έχουν σχηματίσει άστρα και επομένως να είναι ορατά ως λαμπροί δορυφορικοί γαλαξίες. Ωστόσο, οι γνωστοί δορυφόροι δεν εμφανίζουν τις υψηλές κεντρικές πυκνότητες που προβλέπονται, ενώ οι πιο μαζικοί παρατηρούμενοι νάνοι σφαιροειδείς γαλαξίες φαίνονται σημαντικά λιγότερο συμπαγείς από τις υποάλω που προκύπτουν μέσω προσομοιώσεων. Αυτό δημιουργεί την αντίφαση ότι οι πιο μεγάλες άλω είναι «πολύ μεγάλες για να έχουν αποτύχει» να σχηματίσουν γαλαξίες, αλλά στην πράξη δεν υπάρχουν αντίστοιχα φωτεινά αντικείμενα (Boylan – Kolchin, Bullock, & Kaplinghat, 2011, 2012). Πιθανές λύσεις περιλαμβάνουν ενέργειες ανάδρασης (stellar feedback) από τον σχηματισμό άστρων που μειώνουν τις κεντρικές πυκνότητες (Sales, et al. 2022), χαμηλότερη συνολική μάζα του Γαλαξία ή εναλλακτικές θεωρίες σκοτεινής ύλης, όπως η αυτο – αλληλεπιδρώσα (SIDM) ή θερμή σκοτεινή ύλη (WDM).

Συνοψίζοντας, τα παραπάνω προβλήματα μικρής κλίμακας — το «cusp – core» πρόβλημα, το πρόβλημα της υποδομής των σκοτεινών άλω και το πρόβλημα των υπερβολικά μαζικών δορυφόρων — αναδεικνύουν ότι, παρά την εντυπωσιακή επιτυχία του Κοσμολογικού Προτύπου  $\Lambda$ CDM σε μεγάλες κλίμακες, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις στην κατανόηση της δομής και εξέλιξης των γαλαξιών σε τοπικό επίπεδο. Οι ασυμφωνίες μεταξύ παρατηρήσεων και προσομοιώσεων δείχνουν ότι είτε οι βαρυονικές διεργασίες παίζουν καθοριστικότερο ρόλο από ό,τι είχε αρχικά εκτιμηθεί, είτε ότι απαιτούνται πιο σύνθετα ή τροποποιημένα μοντέλα σκοτεινής ύλης προκειμένου να περιγραφεί επαρκώς η δυναμική των μικρών δομών. Με τη βελτίωση των παρατηρησιακών δεδομένων και των προσομοιώσεων, αλλά και με την ανάπτυξη νέων θεωρητικών εργαλείων, αναμένεται τα προσεχή χρόνια να αποκτήσουμε μια πιο πλήρη εικόνα για τη φύση της σκοτεινής ύλης και την κατανομή της στις γαλαξιακές κλίμακες.

## 4. Σκοτεινή Ενέργεια (Dark Energy)

Η σύγχρονη κοσμολογία βασίζεται σε ένα ευρύ φάσμα ανεξάρτητων παρατηρησιακών δεδομένων, τα οποία συγκλίνουν προς ένα εντυπωσιακό και ανατρεπτικό συμπέρασμα: το Σύμπαν δεν επιβραδύνει, αλλά επεκτείνεται με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό<sup>29</sup>. Η ανακάλυψη αυτή, που αποτέλεσε μία από τις σημαντικότερες επιστημονικές εξελίξεις του 20ού αιώνα, προέκυψε κυρίως μέσα από συστηματικές μελέτες υπερκαινοφανών Τύπου Ia, λεπτομερείς καταγραφές της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου και ακριβείς χαρτογραφήσεις των ταλαντώσεων βαρυονικής ύλης. Σε συνδυασμό με επιπλέον παρατηρήσεις μεγάλης κλίμακας, όλα τα δεδομένα υποδεικνύουν την κυριαρχία ενός άγνωστου, μη βαρυονικού συστατικού του Σύμπαντος — της σκοτεινής ενέργειας — η οποία καθορίζει τη σημερινή δυναμική της κοσμικής διαστολής.

### 4.1. Παρατηρησιακές αποδείξεις για την επιτάχυνση της διαστολής του Σύμπαντος

#### 4.1.1 Υπερκαινοφανείς Τύπου Ia ως πρότυπα κεριά

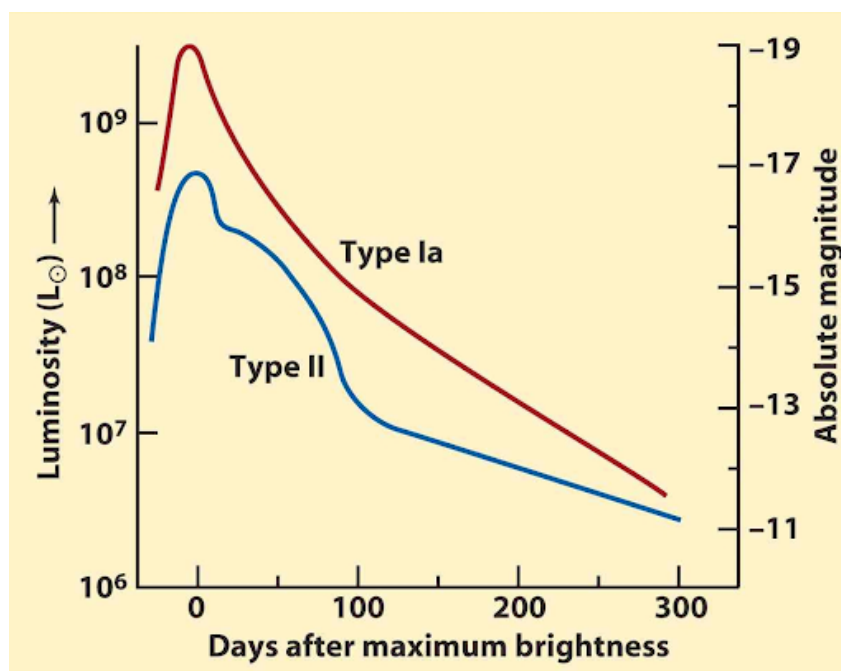
Η πρώτη ισχυρή ένδειξη, ενός επιταχυνόμενου Σύμπαντος, προήλθε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από ανεξάρτητες ερευνητικές ομάδες που μελετούσαν υπερκαινοφανείς αστέρες Τύπου Ia (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999)<sup>30</sup>, οι οποίοι λειτουργούν ως «πρότυπα κεριά» (standard candles) για τη μέτρηση κοσμικών αποστάσεων. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι απομακρυσμένοι υπερκαινοφανείς εμφανίζονταν αμυδρότεροι από ό,τι αναμενόταν σε ένα Σύμπαν με μη επιταχυνόμενη διαστολή, υποδηλώνοντας ότι το φως τους είχε ταξιδέψει σε ένα Σύμπαν που διαστελλόταν ολοένα και ταχύτερα.

Οι υπερκαινοφανείς (supernovae) είναι εκρήξεις άστρων που απελευθερώνουν τεράστια ποσά ενέργειας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι, αλλά οι Τύπου Ia έχουν μια ιδιαίτερη προέλευση. Προέρχονται από λευκούς νάνους σε διπλά αστρικά συστήματα, οι οποίοι συσσωρεύουν ύλη από το σύντροφό τους μέχρι να φτάσουν ένα κρίσιμο όριο μάζας (Όριο Chandrasekhar,  $1,44 M_{\odot}$ ). Οι υπερκαινοφανείς αυτοί πιστεύεται ότι έχουν παντού την ίδια μέγιστη απόλυτη

<sup>29</sup> Ωστόσο πρόσφατες έρευνες δείχνουν στοιχεία που θέτουν υπό αμφισβήτηση αυτήν την επιτάχυνση — αλλά δεν έχουν ακόμη πείσει την πλειονότητα της επιστημονικής κοινότητας. Η πιο επίσημη ανάλυση που κυκλοφορεί μέχρι σήμερα, σχετικά με άμεση αμφισβήτηση της επιτάχυνσης, υποστηρίζει ότι μετά από διορθώσεις στα δεδομένα supernovae Ia, τα στοιχεία δείχνουν μη επιταχυνόμενη επέκταση και ότι η σκοτεινή ενέργεια εξασθενεί με τον χρόνο (Lee et al. 2025).

<sup>30</sup> Το 2011 τους απονεμήθηκε το Νόμπελ Φυσικής για τη σημαντική τους ανακάλυψη. Ο τίτλος του Νόμπελ ήταν: “for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae”.

λαμπρότητα (απόλυτο μέγεθος), καθώς η έκρηξη συμβαίνει πάντα εφόσον οι λευκοί νάνοι έχουν αποκτήσει την ίδια μάζα και έτσι χρησιμεύουν ως δείκτες – υπολογιστές τεράστιων (κοσμολογικών) αποστάσεων στο Σύμπαν. Χαρακτηρίζονται από σχετικά ομοιόμορφη μέγιστη φωτεινότητα, γεγονός που επιτρέπει τον υπολογισμό των αποστάσεών τους μέσω της καμπύλης λαμπρότητας – χρόνου.



**Διάγραμμα 4.1:** Καμπύλες φωτεινότητας υπερκαινοφανών τύπου Ia και τύπου II, που δείχνουν την εξέλιξη της λαμπρότητάς τους μετά τη μέγιστη φωτεινότητα. Οι υπερκαινοφανείς τύπου Ia έχουν σχεδόν ομοιόμορφη μέγιστη φωτεινότητα, γεγονός που τους καθιστά ‘τυπικά κεριά’ για τη μέτρηση κοσμολογικών αποστάσεων. Η χρήση τους αποκάλυψε ότι μακρινοί υπερκαινοφανείς Ia είναι πιο αμυδροί από όσο αναμενόταν, ένδειξη ότι το Σύμπαν διαστέλλεται επιταχυνόμενα – μια ανακάλυψη που οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην υπόθεση της σκοτεινής ενέργειας. Credit: [https://sites.ualberta.ca/~rogosyan/teaching/ASTRO\\_122/lect18/lecture18.html](https://sites.ualberta.ca/~rogosyan/teaching/ASTRO_122/lect18/lecture18.html)

Στην κλασική αστρονομία (για κοντινά αντικείμενα, μέσα στον Γαλαξία ή σχετικά κοντινές εξωγαλαξιακές πηγές), η σύγκριση της πραγματικής (απόλυτης) φωτεινότητας ενός αστρονομικού αντικειμένου με την παρατηρούμενη (φαινόμενη) φωτεινότητά του οδηγεί στον προσδιορισμό της απόστασης μέσω του λεγόμενου μέτρου απόστασης (distance modulus). Το απόλυτο μέγεθος  $M$  ορίζεται ως το φαινόμενο μέγεθος που θα παρουσίαζε το αντικείμενο εάν βρισκόταν σε απόσταση 10 parsec από τον παρατηρητή, ενώ το φαινόμενο μέγεθος  $m$  αντιστοιχεί στη

φωτεινότητα που καταγράφεται από τη Γη. Η θεμελιώδης σχέση<sup>31</sup> που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι:

$$m - M = 5 \log_{10} \left( \frac{d}{10pc} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $d$  είναι η πραγματική απόσταση του αντικειμένου σε *parsec*. Λύνοντας ως προς την απόσταση προκύπτει:

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad (4.2)$$

που αποτελεί τον τυπικό τύπο για τον υπολογισμό αποστάσεων. Ωστόσο για κοσμολογικές αποστάσεις (π.χ. με ερυθρομετατοπίσεις  $z > 0,1$ ) οι επιπτώσεις της κοσμολογικής διαστολής στον προσδιορισμό των αποστάσεων δεν μπορούν πλέον να αγνοηθούν (Weinberg, 2008). Η απόσταση που υπολογίζουμε από την παραπάνω σχέση δεν είναι η πραγματική γεωμετρική αλλά η απόσταση φωτεινότητας (luminosity distance  $d_L$ <sup>32</sup>). Στην περίπτωση των υπερκαινοφανών Τύπου Ia, όπου η μέγιστη απόλυτη φωτεινότητα παρουσιάζει εξαιρετικά μικρή διασπορά, η εφαρμογή του παραπάνω τύπου καθίσταται ιδιαίτερα αξιόπιστη και έχει συμβάλει καθοριστικά στον προσδιορισμό του ρυθμού διαστολής του Σύμπαντος και της παρατηρούμενης κοσμικής επιτάχυνσης.

Στην κοσμολογία η απόσταση φωτεινότητας σχετίζεται με την ερυθρομετατόπιση  $z$  και τις παραμέτρους της περιγραφής του Σύμπαντος (π.χ.  $\Omega_M, \Omega_\Lambda, H_0$ ) μέσω της ολοκλήρωσης:

$$d_L(z) = (1+z)c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

όπου  $H(z)$  είναι η παράμετρος Hubble συναρτήσεως της ερυθρομετατόπισης χωρίς τη συνεισφορά της ακτινοβολίας  $\Omega_r$  (Hogg, 2000):

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}$$

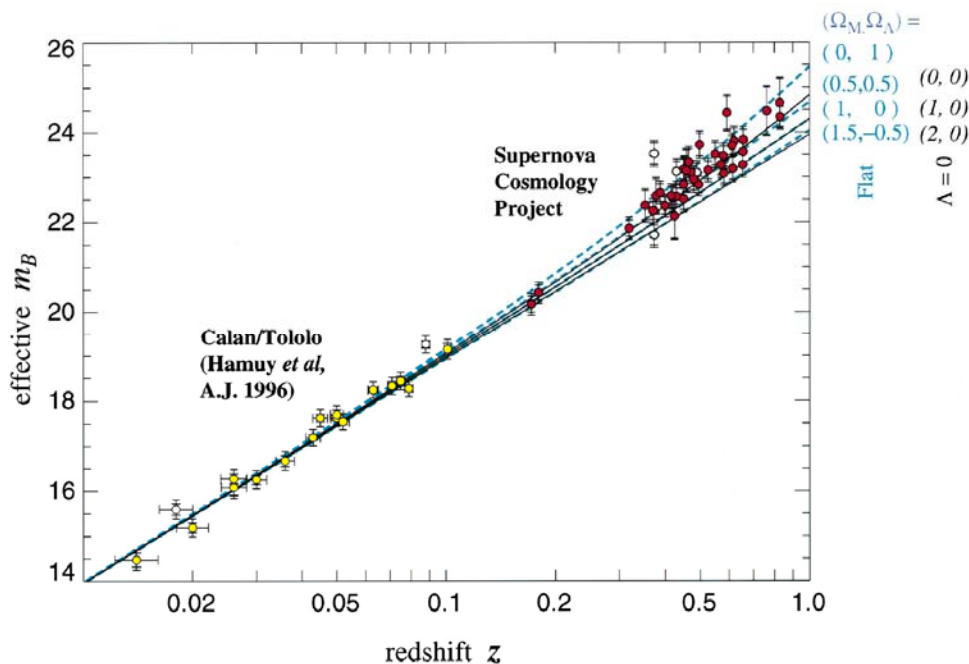
- $H_0$  = η σταθερά Hubble σήμερα
- $\Omega_M$  = πυκνότητα ύλης (βαρυονική και σκοτεινή)
- $\Omega_\Lambda$  = πυκνότητα σκοτεινής ενέργειας
- $\Omega_k = 1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda$  = καμπυλότητα

Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τα προγράμματα Supernova Cosmology Project (SCP) (Perlmutter et al. 1999) και High - Z Supernova Search Team (HST)

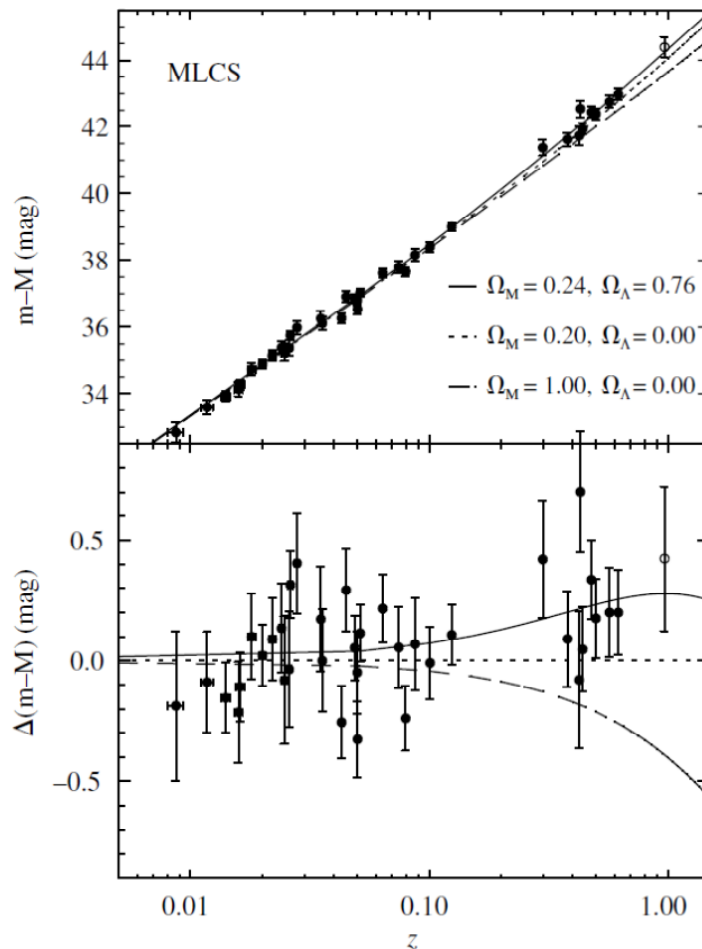
<sup>31</sup> Ο Edwin Hubble είναι εκείνος που έκανε τη σχέση αυτή ευρέως αποδεκτή στη σύγχρονη κοσμολογία, χρησιμοποιώντας την για μετρήσεις εξωγαλαξιακών αποστάσεων (Hubble, 1925).

<sup>32</sup> Η luminosity distance  $d_L$  ορίζεται ως:  $d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$  όπου  $L$  είναι η αληθινή φωτεινότητα της πηγής (π.χ. υπερκαινοφανής τύπου Ia) και  $F$  είναι η παρατηρούμενη φωτεινότητα (flux) από τη Γη.

(Riess et al. 1998) ανέλυσαν παρατηρήσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia σε υψηλό ερυθρό φάσμα, με σκοπό την εκτίμηση των κοσμολογικών παραμέτρων και τη διερεύνηση της δυναμικής της διαστολής του Σύμπαντος. Οι ερευνητές παρατήρησαν συστηματικές αποκλίσεις στη σχέση ερυθρομετατόπισης ( $z$ ) – απόστασης ( $d$ ), οι οποίες δεν ήταν συμβατές με ένα Σύμπαν στο οποίο η διαστολή επιβραδύνεται λόγω της βαρύτητας της ύλης. Συγκεκριμένα, οι υπερκαινοφανείς υψηλής  $z$  φαινόταναν λιγότερο φωτεινοί από ό,τι θα αναμενόταν σε ένα τέτοιο πλαίσιο, υποδεικνύοντας ότι οι αποστάσεις τους ήταν μεγαλύτερες από τις προβλεπόμενες. Αυτή η παρατήρηση αποτέλεσε την πρώτη άμεση ένδειξη ότι η διαστολή του Σύμπαντος δεν επιβραδύνεται όπως αναμενόταν, αλλά αντιθέτως επιταχύνεται. Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη ενός μη συμβατικού στοιχείου ενέργειας που ασκεί αρνητική πίεση και αντιτίθεται στη βαρυτική έλξη, το οποίο αργότερα ονομάστηκε σκοτεινή ενέργεια. Οι ανακαλύψεις αυτές αποτέλεσαν σταθμό στην κοσμολογία, καθώς άλλαξαν ριζικά την κατανόηση της δομής και της εξέλιξης του Σύμπαντος, ανοίγοντας το δρόμο για νέες θεωρητικές προσεγγίσεις σχετικά με τη φύση της ενέργειας που κυριαρχεί στο Σύμπαν.



**Διάγραμμα 4.2:** Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση φαινόμενης λαμπρότητας  $m_B$  και ερυθρομετάθεσης  $z$  για υπερκαινοφανείς τύπου Ia. Τα κίτρινα σημεία (Calan – Tololo) αντιπροσωπεύουν κοντινούς υπερκαινοφανείς, ενώ τα κόκκινα σημεία (Supernova Cosmology Project) μακρινούς. Οι μπλε καμπύλες δείχνουν θεωρητικά κοσμολογικά πλαίσια για διαφορετικούς συνδυασμούς πυκνότητας ύλης  $\Omega_M$  και σκοτεινής ενέργειας  $\Omega_\Lambda$ . Οι μακρινοί υπερκαινοφανείς εμφανίζονται συστηματικά πιο αμυδροί —άρα σε μεγαλύτερη απόσταση από ό,τι προβλέπουν οι θεωρίες χωρίς σκοτεινή ενέργεια, γεγονός που αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το Σύμπαν διαστέλλεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Credit: Supernova Cosmology Project, 1999 (Perlmutter et al. 1999).



**Διάγραμμα 4.3:** Διάγραμμα από παρατηρήσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia (SN Ia) όπου αποτυπώνεται η απόσταση – λαμπρότητα ( $m - M$ ) ως συνάρτηση της ερυθρομετατόπισης  $z$ . Οι μαύρες κουκκίδες είναι οι μετρήσεις των υπερκαινοφανών, ενώ οι καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικές κοσμολογικές περιπτώσεις, με τιμές των παραμέτρων  $\Omega_M$  και  $\Omega_\Lambda$ . **Επάνω εικόνα:** γίνεται φανερό ότι τα δεδομένα αποκλίνουν από τις καμπύλες χωρίς κοσμολογική σταθερά (π.χ.  $\Omega_M = 1, \Omega_\Lambda = 0$ ), ενώ συμφωνούν καλύτερα με ένα μοντέλο όπου  $\Omega_\Lambda > 0$ . **Κάτω εικόνα:** δείχνει τη διαφορά ανάμεσα στα δεδομένα και ένα παλαιότερα δημοφιλές μοντέλο FLRW χωρίς σκοτεινή ενέργεια, με χαμηλή πυκνότητα ύλης, με  $\Omega_M = 0.2$  και  $\Omega_\Lambda = 0$ , το οποίο απεικονίζεται με την οριζόντια διακεκομμένη γραμμή. Η συστηματική απόκλιση σε υψηλές ερυθρομετατοπίσεις υποδεικνύει ότι οι μακρινοί υπερκαινοφανείς εμφανίζονται ασθενέστεροι—και άρα πιο μακρινοί—από ό,τι προβλέπει ένα επιβραδυνόμενο σύμπαν. Αυτή η απόκλιση στην απόσταση αποτελεί το άμεσο παρατηρησιακό αποτύπωμα της επιταχυνόμενης διαστολής του σύμπαντος και οδήγησε στην εισαγωγή της σκοτεινής ενέργειας ως κυρίαρχο συστατικό του Σύμπαντος. Credit: High -  $z$  Supernova Search Team, 1998 (Riess et al. 1998)

#### 4.1.2 Κοσμική Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου (CMB)

Περαιτέρω επιβεβαίωση της επιταχυνόμενης διαστολής προέκυψε από τις ακριβείς μετρήσεις της ανισοτροπίας της CMB από τις αποστολές **WMAP** και **Planck**. Η θέση της πρώτης ακουστικής κορυφής στο γωνιακό φάσμα ισχύος υποδεικνύει ότι η γεωμετρία του Σύμπαντος είναι σχεδόν επίπεδη. Η πρώτη ακουστική κορυφή έχει ένα πραγματικό μέγεθος στο πρώιμο Σύμπαν, αλλά το πώς την βλέπουμε σήμερα εξαρτάται από τη γεωμετρία του Σύμπαντος. Αν το Σύμπαν είχε καμπύλο σχήμα, το σημείο αυτό θα εμφανιζόταν αλλού. Οι μετρήσεις από WMAP και Planck δείχνουν ότι η πρώτη ακουστική κορυφή εμφανίζεται περίπου στο  $\ell = 220.1 \pm 0.5$  (Aghanim et al., 2020) (που αντιστοιχεί σε περίπου  $1^\circ$  στον ουρανό), και ταιριάζει με ένα επίπεδο Σύμπαν. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτή η επίπεδη γεωμετρία με βάση τις μετρούμενες πυκνότητες ύλης (βαρυονικής και σκοτεινής), απαιτείται η ύπαρξη πρόσθετου συστατικού με ενεργειακή πυκνότητα περίπου 70% του συνολικού κοσμολογικού περιεχομένου. Η προσθήκη ενός τέτοιου όρου στις εξισώσεις, συνήθως με τη μορφή της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ , οδηγεί φυσικά σε επιταχυνόμενη διαστολή.

#### 4.1.3 Βαρυονικές Ακουστικές Ταλαντώσεις (BAO)

Οι βαρυονικές ακουστικές ταλαντώσεις, στα μεγάλης κλίμακας καταναμημένα σμήνη και υπερσμήνη γαλαξιών, αποτελούν ακόμη μία ανεξάρτητη μέθοδο για τη μελέτη της γεωμετρίας και της δυναμικής του Σύμπαντος. Στην κοσμολογία, οι BAO είναι διακυμάνσεις στην πυκνότητα της ορατής βαρυονικής ύλης (κανονικής ύλης) του Σύμπαντος, που προκαλούνται από ακουστικά κύματα πυκνότητας στο αρχέγονο πλάσμα του πρώιμου Σύμπαντος και τα οποία άφησαν πίσω τους ένα χαρακτηριστικό αποτύπωμα στην κατανομή των γαλαξιών. Γνωρίζουμε ότι το χαρακτηριστικό μέγεθος των ακουστικών ταλαντώσεων είναι περίπου:  $r_s \approx 150 - 160 \text{ Mpc}$  (Ryden, 2017). Οι BAO δημιουργούν λοιπόν, μια χαρακτηριστική κλίμακα σαν έναν «κοσμικό χάρακα» (standard ruler), της οποίας η παρατηρούμενη γωνιακή διάσταση επιτρέπει τον προσδιορισμό του ρυθμού διαστολής σε διάφορες κοσμικές εποχές. Μετρήσεις από έρευνες όπως το SDSS, BOSS και eBOSS<sup>33</sup> έχουν δείξει ότι τα δεδομένα ταιριάζουν καλύτερα με ένα πρότυπο που περιλαμβάνει σκοτεινή ενέργεια, ενισχύοντας έτσι τη θεωρία της επιταχυνόμενης διαστολής.

#### 4.1.4 Επιπλέον παρατηρησιακά δεδομένα

Επιπροσθέτως, παρατηρήσεις που αφορούν τη δυναμική των σμηνών γαλαξιών, τον ασθενή βαρυτικό φακό (weak lensing) και τη στατιστική της κατανομής μεγάλης

---

<sup>33</sup> Οι BOSS και eBOSS είναι δύο σημαντικές αστρονομικές έρευνες που έγιναν στο πλαίσιο του Sloan Digital Sky Survey (SDSS) και έχουν συμβάλει καθοριστικά στη μελέτη της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος και στην κατανόηση της σκοτεινής ενέργειας μέσω των βαρυονικών ακουστικών ταλαντώσεων (BAO).

κλίμακας υποστηρίζουν τη συνεπή εικόνα ενός Σύμπαντος όπου η σκοτεινή ενέργεια καθορίζει τη σημερινή κοσμική εξέλιξη, καθώς δείχνουν ότι οι δομές στο Σύμπαν αναπτύσσονται πιο αργά από ό,τι θα περίμενε κανείς σε ένα Σύμπαν που επιβραδύνεται (χωρίς σκοτεινή ενέργεια), ενώ υποδηλώνουν ότι η διαστολή επιταχύνθηκε τα τελευταία 6 – 7 δισεκατομμύρια χρόνια. Η συνέργεια αυτών των ανεξάρτητων κοσμολογικών δεικτών προσφέρει ιδιαίτερα ισχυρές αποδείξεις, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα συστηματικών σφαλμάτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις παρατηρήσεις ενός μόνο μεθοδολογικού εργαλείου.

Συνοψίζοντας, η σύγκλιση των παρατηρήσεων από υπερκαινοφανείς Τύπου Ia, το γωνιακό φάσμα ισχύος της CMB και οι βαρυονικές ακουστικές ταλαντώσεις (BAO) αποκαλύπτει με εντυπωσιακή συνέπεια ότι το Σύμπαν δεν διαστέλλεται απλώς, αλλά η διαστολή του **επιταχύνεται**. Οι μακρινοί υπερκαινοφανείς εμφανίζονται πιο αμυδροί από όσο θα επέτρεπε ένα κοσμολογικό πλαίσιο χωρίς σκοτεινή ενέργεια, ενώ η θέση της πρώτης ακουστικής κορυφής στην CMB απαιτεί μια σχεδόν επίπεδη γεωμετρία, η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί από την ύλη και τη σκοτεινή ύλη μόνες τους. Η ενσωμάτωση ενός πρόσθετου, απωστικού ενεργειακού συστατικού —της σκοτεινής ενέργειας— καθίσταται έτσι αναπόφευκτη και επιβεβαιώνεται από ανεξάρτητες αποτυπώσεις της δομής μεγάλης κλίμακας μέσω των BAO. Ταυτόχρονα, η εξέλιξη της διαστολής που προκύπτει από αυτές τις μετρήσεις δείχνει ότι η επιταχυνόμενη φάση δεν ήταν ανέκαθεν παρούσα. Η στιγμή που το Σύμπαν πέρασε από την επιβράδυνση στην επιτάχυνση εκτιμάται περίπου σε μια ερυθρομετατόπιση  $z_{acc} \approx 0.61 - 0.82$ . Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 6 – 7.5 δισεκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα, όταν η πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας ξεπέρασε εκείνη της ύλης (DESI Collaboration, 2025). Έτσι, το σύνολο των δεδομένων συγκλίνει σε ένα κοινό κοσμολογικό πλαίσιο, όπου η σκοτεινή ενέργεια καθορίζει την τρέχουσα δυναμική του Σύμπαντος και διαμορφώνει την μελλοντική του εξέλιξη.

## 4.2 Πρότυπα Σκοτεινής Ενέργειας

Η σκοτεινή ενέργεια αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους άγνωστους παράγοντες στη σύγχρονη κοσμολογία, ευθυνόμενη για περίπου το 68% της ενεργειακής πυκνότητας του Σύμπαντος και για την παρατηρούμενη επιταχυνόμενη κοσμική διαστολή. Παρά την επιβεβαίωση της ύπαρξής της από τις παρατηρήσεις υπερκαινοφανών τύπου Ia, τις ανισοτροπίες της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας και τις βαρυονικές ακουστικές ταλαντώσεις, η φύση της παραμένει άγνωστη. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πλήθος προτύπων που επιχειρούν να περιγράψουν το φαινόμενο είτε ως ιδιότητα του κενού, είτε ως δυναμικό πεδίο, είτε ως τροποποίηση της βαρυτικής θεωρίας σε μεγάλες κλίμακες. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πρότυπα σκοτεινής ενέργειας, οι βασικές τους φυσικές αρχές, καθώς και οι δυνατότητές τους να αναπαράγουν τις κοσμολογικές παρατηρήσεις.

#### 4.2.1 Κοσμολογική Σταθερά ( $\Lambda$ )

Η κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  αποτελεί το θεμελιώδες και απλούστερο σενάριο για τη σκοτεινή ενέργεια μέσα στο Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM. Παρά την απλότητά του, είναι θεωρητικά το πιο αιγιματικό συστατικό της σύγχρονης φυσικής, αλλά ταυτόχρονα και το πιο επιτυχημένο παρατηρησιακά. Αυτό που πρεσβεύει η θεωρία αυτή είναι ότι η κοσμολογική σταθερά αντιστοιχεί σε έναν ενεργειακό όρο κενού, με σταθερή ενεργειακή πυκνότητα,  $\rho_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{8\pi G}$ , στον χώρο και στον χρόνο, πίεση  $p_\Lambda$  και μια εξίσωση κατάστασης. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση ρευστού για το  $\Lambda$  (σχέση 2.16):

$$\dot{\rho}_\Lambda + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho_\Lambda + p_\Lambda) = 0 \quad (4.3)$$

και εφόσον το  $\rho_\Lambda$  είναι εξ ορισμού σταθερό, πρέπει  $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$ <sup>34</sup> ώστε  $\dot{\rho}_\Lambda = 0$ . Επομένως η καταστατική εξίσωση για το πλαίσιο της κοσμολογικής σταθεράς είναι:

$$w = \frac{p_\Lambda}{\rho_\Lambda} = -1 \quad (4.4)$$

Το πρότυπο  $\Lambda$ CDM περιλαμβάνει τη  $\Lambda$  ως σταθερή συνιστώσα που κυριαρχεί στη δυναμική του Σύμπαντος σε όψιμους χρόνους, εξηγώντας φυσικά την επιταχυνόμενη διαστολή. Στο πλαίσιο της θεωρίας αυτής, η μετάβαση από μια επιβραδυνόμενη σε μια επιταχυνόμενη φάση διαστολής του Σύμπαντος μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της αντίστοιχης τιμής της ερυθρομετατόπισης  $z$ , η οποία βρέθηκε (Melchiorri et al. 2007) να ισούται με την τιμή  $z_{acc} = 0.76 \pm 0.10$  (σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%), η οποία αντιστοιχεί σε κοσμικό χρόνο περίπου  $6.7 \pm 0.4$  δισεκατομμύρια έτη πριν από το παρόν. Ακόμα πιο πρόσφατες μελέτες υπολογίζουν μια τιμή ερυθρομετατόπισης που κυμαίνεται από  $0.61 - 0.82$ . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε περίπου 6 με 7 δισεκατομμύρια χρόνια πριν από σήμερα (DESI Collaboration 2025; Dahiya & Jain, 2022/2023). Η στιγμή αυτή σηματοδοτεί το χρονικό σημείο κατά το οποίο η συνεισφορά της σκοτεινής ενέργειας κατέστη ικανή να υπερνικήσει τη βαρυτική επίδραση της ύλης, οδηγώντας έτσι σε επιταχυνόμενη κοσμική διαστολή.

Όσον αφορά στη φυσική του ερμηνεία, το  $\Lambda$  μερικές φορές θεωρείται ως η ενεργειακή πυκνότητα του «κενού» χώρου. Συγκεκριμένα, στην κβαντική φυσική μια πιθανή προέλευση είναι ως ένας τύπος «ενέργειας μηδενικού σημείου», που παραμένει ακόμα και αν δεν υπάρχουν σωματίδια (Liddle, 2015).

Όμως παρά την παρατηρησιακή επιτυχία του προτύπου αυτού, ανακύπτουν διάφορα προβλήματα όπως:

<sup>34</sup> δηλαδή προκειμένου το Σύμπαν να διαστέλλεται όλο και πιο γρήγορα, η κοσμολογική σταθερά πρέπει να έχει αρνητική ενεργό πίεση, ώστε να δρα αντίθετα από τη βαρυτική έλξη.

- Το πρόβλημα της λεπτής ρύθμισης (**fine – tuning problem**) (Feng & Li, 2014). Η ποσότητα της σκοτεινής ενέργειας που παρατηρούμε είναι ασύλληπτα μικρότερη από την προβλεπόμενη τιμή της ενέργειας του κενού από την κβαντική θεωρία πεδίου, κατά περίπου 120 τάξεις μεγέθους<sup>35</sup>.
- Το πρόβλημα της σύμπτωσης (**coincidence problem**) (Caldwell & Kamionkowski 2009), δηλαδή το ερώτημα γιατί η πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας είναι συγκρίσιμη με την πυκνότητα της ύλης τη σημερινή εποχή. Η πυκνότητα της ύλης αραιώνει καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται:

$$\rho_{\text{ύλης}} \propto a^{-3} \quad (4.5)$$

όπου  $a$  είναι ο συντελεστής κλίμακας. Επομένως πριν από αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια, η ύλη ήταν χιλιάδες φορές πυκνότερη ενώ στο μακρινό μέλλον, η πυκνότητα της ύλης θα είναι σχεδόν μηδενική.

Αν η σκοτεινή ενέργεια είναι απλή κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , τότε:

$$\rho_{\Lambda} = \text{σταθερά}$$

δηλαδή η πυκνότητά της μένει σταθερή στον χρόνο. Συνεπώς, για το μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής ιστορίας, η πυκνότητα της ύλης και της σκοτεινής ενέργειας δεν ήταν συγκρίσιμες.

Τα παραπάνω προβλήματα και άλλα ακόμη, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο σύνθετων προτύπων.

#### 4.2.2 Δυναμική Σκοτεινή Ενέργεια

##### α) Πενμπουσία (quintessence)

Στο πλαίσιο της δυναμικής σκοτεινής ενέργειας, η επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος αποδίδεται σε ένα κανονικό βαθμωτό πεδίο  $Q$ , το οποίο εξελίσσεται αργά χρονικά υπό την επίδραση ενός δυναμικού  $V(Q)$ . Η προσέγγιση αυτή αποτελεί ειδική περίπτωση του γενικότερου πλαισίου  $Q$ CDM ( $Q$ : Quintessence και CDM: Cold Dark Matter), όπου η σκοτεινή ενέργεια περιγράφεται από μια συνιστώσα με γενική καταστατική εξίσωση  $w \neq -1$ . Η αργή μεταβολή του πεδίου είναι απαραίτητη ώστε η πίεση να είναι αρνητική και να δίνεται από: (Zlatev et al. 1999):

$$p_Q = \frac{1}{2} \dot{Q}^2 - V(Q) \quad (4.6)$$

Η ενεργειακή πυκνότητα στην προσέγγιση αυτή είναι:

<sup>35</sup> Θεωρείται ίσως η μεγαλύτερη ανακολουθία στη σύγχρονη φυσική.

$$\rho_Q = \frac{1}{2}\dot{Q}^2 + V(Q) \quad (4.7)$$

και συνεπώς η καταστατική εξίσωση προκύπτει:

$$w = \frac{p_Q}{\rho_Q} = \frac{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 - V(Q)}{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 + V(Q)} \quad (4.8)$$

Όταν το δυναμικό κυριαρχεί έναντι του κινητικού όρου, δηλαδή:

$$V(Q) \gg \frac{1}{2}\dot{Q}^2 \quad (4.9)$$

τότε προκύπτει

$$w \approx -1 \quad (4.10)$$

και το πρότυπο μιμείται τη συμπεριφορά της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ .

Στη γενική περίπτωση της πεμπτουσίας ισχύει θεωρητικά:

$$-1 < w \leq 1 \quad (4.11)$$

όπου η τιμή εξαρτάται από τη μορφή του δυναμικού<sup>36</sup>. Για να είναι συμβατή με τις παρατηρήσεις, όπως είδαμε παραπάνω, απαιτείται τιμή κοντά στο

$$w \approx -1 \quad (4.12)$$

Η συγκεκριμένη θεωρία προσφέρει το πλεονέκτημα ότι η ενεργειακή πυκνότητα του βαθμωτού πεδίου μπορεί είτε να «παρακολουθεί» (tracker behavior) είτε να αποκλίνει από την κυρίαρχη συνιστώσα<sup>37</sup> του Σύμπαντος, με τρόπο που επιτρέπει στο πεδίο να ρυθμίζει φυσικά την ενεργειακή του πυκνότητα και να την καθιστά συγκρίσιμη με την πυκνότητα της ύλης σε σχετικά πρόσφατες κοσμικές εποχές.

Παρότι η θεωρία της πεμπτουσίας είναι πιο ευέλικτη από τη  $\Lambda$ CDM προσέγγιση, παραμένουν διάφορα σοβαρά θεωρητικά ζητήματα όπως την ανάγκη για εξαιρετικά μικρή μάζα του πεδίου (περίπου  $10^{-33}$  eV) και το πρόβλημα της σύμπτωσης (coincidence problem), δηλαδή το γιατί η πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας γίνεται συγκρίσιμη με αυτήν της ύλης ακριβώς στην τρέχουσα εποχή. Μελλοντικές παρατηρήσεις ακριβείας (π.χ. DESI, Euclid, Roman Space Telescope) αναμένεται είτε

<sup>36</sup> όπως για παράδειγμα  $V(Q) \propto Q^{-\alpha}$  με  $\alpha > 0$  που επιτρέπει την αργή εξέλιξη του πεδίου (Zlatev et al. 1999; Alho et al. 2024).

<sup>37</sup> Η κυρίαρχη συνιστώσα του Σύμπαντος εξαρτάται από την κοσμική εποχή. Δηλαδή, σε διαφορετικές φάσεις της κοσμικής ιστορίας, κυριαρχεί διαφορετικό είδος ενέργειας. Συγκεκριμένα στις πολύ πρώιμες εποχές η κυρίαρχη συνιστώσα ήταν η ακτινοβολία, στη συνέχεια η ύλη και στην τωρινή εποχή η σκοτεινή ενέργεια.

να επιβεβαιώσουν δυναμικές θεωρίες, περιορίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια την εξέλιξη του  $w(z)$ , είτε να ενισχύσουν περαιτέρω την περίπτωση της κοσμολογικής σταθεράς (Sahoo et al. 2025).

## β) $k$ – essence

Η  $k$  – essence (όπου  $k$  = kinetic – κινητική ενέργεια) είναι ακόμη μία από τις προσεγγίσεις που προσπαθούν να εξηγήσουν τι είναι η σκοτεινή ενέργεια και γιατί το Σύμπαν επιταχύνεται. Η βασική ιδέα είναι ότι η σκοτεινή ενέργεια μπορεί να προέρχεται από ένα ειδικό «πεδίο», ένα είδος άορατης ουσίας στο Σύμπαν. Αυτό το πεδίο όμως συμπεριφέρεται διαφορετικά από ένα συνηθισμένο πεδίο (όπως στο πεδίο της θεωρίας της πεμπτουσίας), επειδή η ενέργειά του δεν εξαρτάται μόνο από τη θέση του, αλλά και από τον τρόπο που αλλάζει στον χρόνο — δηλαδή από την κινητική του ενέργεια.

Στη θεωρία της πεμπτουσίας η επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος προκύπτει επειδή το πεδίο έχει ένα «έξυπνα» επιλεγμένο δυναμικό. Στην προσέγγιση  $k$  – essence όμως συμβαίνει κάτι πιο ενδιαφέρον. Η επιταχυνόμενη διαστολή μπορεί να προκύψει αυτόματα, αποκλειστικά και μόνο χάρη στη μορφή της κινητικής ενέργειας του πεδίου<sup>38</sup>. Το πεδίο διαθέτει μια ελκτική λύση<sup>39</sup>, πράγμα που σημαίνει ότι η συμπεριφορά του τείνει φυσικά σε συγκεκριμένη εξέλιξη ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών, επιτρέποντας στο Σύμπαν να «αυτορρυθμιστεί». Σε αυτό το πλαίσιο, το ίδιο το πεδίο καθορίζει πότε θα αρχίσει να συμπεριφέρεται σαν σκοτεινή ενέργεια· και αυτό συμβαίνει σχεδόν αναπόφευκτα γύρω από την τωρινή κοσμική εποχή, όταν η πυκνότητα της ύλης έχει πλέον μειωθεί επαρκώς.

Η καταστατική εξίσωση  $w = p/\rho$  του  $k$  – essence εξελίσσεται με το χρόνο και προσεγγίζει τιμές κοντά στο  $-1$  μόνο όταν η ενεργειακή του πυκνότητα γίνεται σημαντική, εξηγώντας γιατί η επιτάχυνση εμφανίζεται σχεδόν αναπόφευκτα γύρω στη σημερινή εποχή, όταν η πυκνότητα της ύλης έχει πλέον μειωθεί σημαντικά. Κατά συνέπεια, το  $k$  – essence αρχίζει να μιμείται την κοσμολογική σταθερά μόνο όταν ξεκινά η κυριαρχία της ύλης, αποφεύγοντας έτσι ανεπιθύμητη επιτάχυνση σε πρώιμες εποχές, όπως κατά την εποχή της ακτινοβολίας, και εξασφαλίζοντας ότι δεν απαιτείται ακριβής ρύθμιση των παραμέτρων. Καθώς το πεδίο εξελίσσεται στην εποχή της ύλης, η ενεργειακή του πυκνότητα αυξάνει τη σχετική της σημασία, γίνεται συγκρίσιμη με εκείνη της ύλης και τελικά την υπερβαίνει, οδηγώντας φυσικά στη σημερινή επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος. (Armendariz – Picon et al. 2001).

<sup>38</sup> Η μη κανονική κινητική συνάρτηση είναι η  $K(X)$  όπου  $X = -\frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi$  (Armendariz – Picon et al. 2001)

<sup>39</sup> Μια ελκτική λύση (*attractor solution*) είναι μια κατάσταση ή πορεία στην οποία τείνει φυσικά το σύστημα από πολλές διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Δηλαδή, ανεξάρτητα από το πώς ξεκινά το πεδίο, με το χρόνο η δυναμική του θα το οδηγήσει σε αυτή τη συγκεκριμένη συμπεριφορά.

Επιπλέον, η ανίχνευση του γεγονότος GW170817, δηλαδή η συγχώνευση δύο αστέρων νετρονίων, μέσω βαρυτικών αλλά και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, έδειξε ότι τα βαρυτικά κύματα διαδίδονται με ταχύτητα ίση με εκείνη του φωτός με εξαιρετική ακρίβεια και τέθηκαν σημαντικοί περιορισμοί σε θεωρίες σκοτεινής ενέργειας που μεταβάλλουν την ταχύτητα διάδοσης των βαρυτικών κυμάτων. Πολλές γενικευμένες θεωρίες αποκλείστηκαν, όμως η  $k$ -essence παραμένει πλήρως συμβατή, καθώς στο πλαίσιο αυτό η ταχύτητα των βαρυτικών κυμάτων παραμένει ίση με  $c$ . Κατά συνέπεια, το γεγονός GW170817 ουσιαστικά συρρίκνωσε τον χώρο των επιτρεπτών δυναμικών θεωριών σκοτεινής ενέργειας, αφήνοντας την  $k$ -essence ως μία από τις λίγες προσεγγίσεις που σέβονται όλους τους σύγχρονους παρατηρησιακούς περιορισμούς (Creminelli & Vernizzi, 2017). Παρά τα πλεονεκτήματά της, η  $k$ -essence αντιμετωπίζει ωστόσο, ορισμένες θεωρητικές προκλήσεις. Συγκεκριμένα, ορισμένες μορφές της μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθειες ή σε μη ρεαλιστικές ταχύτητες διάδοσης διαταραχών, ενώ στην πράξη απαιτείται προσεκτική επιλογή της μορφής της ώστε να συμφωνεί με τις κοσμολογικές παρατηρήσεις (Armendariz – Picon et al. 2001). Τέλος, δεν είναι σαφές από ποια θεμελιώδη φυσική θεωρία προκύπτει το αντίστοιχο πεδίο.

### γ) Ενέργεια φάντασμα (phantom energy)

Η ιδέα της phantom energy αποτελεί μία από τις πιο εξωτικές και ενδιαφέρουσες θεωρητικές επεκτάσεις του τυπικού κοσμολογικού προτύπου. Πρόκειται για μορφές σκοτεινής ενέργειας για τις οποίες η παράμετρος κατάστασης ικανοποιεί τη σχέση:

$$w < -1 \quad (4.13)$$

υπερβαίνοντας το όριο της κοσμολογικής σταθεράς. Η περίπτωση αυτή μελετήθηκε συστηματικά από τον Caldwell (Caldwell, 2002), ο οποίος ανέδειξε τις βαθιές κοσμολογικές συνέπειες μιας «υπερ – αρνητικής» εξίσωσης κατάστασης.

Στο πλαίσιο της μετρικής FLRW, η εξίσωση συνέχειας για ένα τέτοιο ρευστό δίνει:

$$\rho(\alpha) \propto \alpha^{-3(1+w)} \quad (4.14)$$

Εφόσον  $1 + w < 0$ , η πυκνότητα αυξάνεται καθώς ο παράγοντας κλίμακας  $a$  μεγαλώνει — μια συμπεριφορά αντίθετη με εκείνη οποιουδήποτε φυσιολογικού ρευστού ή ακόμη και της κλασικής σκοτεινής ενέργειας ( $w = -1$ ). Το αποτέλεσμα είναι:

- ολοένα και πιο γρήγορη επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος,
- ενίσχυση των απωστικών (αντιβαρυτικών) φαινομένων,

- σταδιακή αποδιάρθρωση βαρυντικά δεσμευμένων δομών σε όλο και μικρότερες κλίμακες.

Μία από τις πιο δραματικές προβλέψεις των phantom θεωριών είναι το **Big Rip** (Caldwell, Kamionkowski, & Weinberg, 2003): μια μελλοντική ιδιομορφία όπου η διαστολή γίνεται τόσο ακραία ώστε σε πεπερασμένο κοσμικό χρόνο διαλύει διαδοχικά:

- τα υπερσμήνη και τους γαλαξίες,
- τους αστρικούς και πλανητικούς δεσμούς,
- ακόμη και τα άτομα και τους υποατομικούς δεσμούς.

Η πραγματοποίηση αυτού του σεναρίου εξαρτάται άμεσα από την ακριβή τιμή και τη χρονική εξέλιξη του  $w$ . Οι σύγχρονες παρατηρήσεις (Planck, DESI) δεν έχουν ακόμη αποκλείσει κατηγορηματικά την περίπτωση  $w < -1$ , αν και οι καλύτερες εκτιμήσεις συγκλίνουν κοντά στο  $w \approx -1$ .

Παρά τη συμβατότητα με τα τρέχοντα δεδομένα, οι phantom προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν σοβαρές δυσκολίες ως προς τη θεμελιώδη φυσική. Ειδικότερα, οδηγούν σε (Caldwell, 2002):

- παραβίαση των ενεργειακών συνθηκών στο πλαίσιο της Γενικής θεωρίας της Σχετικότητας, δηλαδή η πίεση γίνεται τόσο αρνητική που η ύλη δεν συμπεριφέρεται με φυσικό τρόπο
- ghost instabilities και κβαντικές αστάθειες, καθώς για να προκύψει  $w < -1$ , το αντίστοιχο πεδίο πρέπει να έχει αρνητική ενέργεια. καθιστώντας το ασταθές.
- πιθανή παραβίαση αιτιότητας.

Αυτά τα ζητήματα υποδηλώνουν ότι, εάν η φύση όντως υλοποιεί  $w < -1$ , η πραγματική περιγραφή της σκοτεινής ενέργειας πιθανώς υπερβαίνει τη συμβατική θεωρία πεδίου.

Η phantom energy παραμένει ένα εντυπωσιακό και θεωρητικά αμφιλεγόμενο σενάριο, το οποίο, παρά τα βαθιά εννοιολογικά του προβλήματα, εξακολουθεί να είναι συμβατό με το παρατηρησιακό πλαίσιο. Η μελέτη της προσφέρει ένα πλούσιο πεδίο διερεύνησης τόσο για τη φύση της σκοτεινής ενέργειας όσο και για τα όρια της σύγχρονης κοσμολογίας και θεωρητικής φυσικής.

### 4.3 Η σκοτεινή ενέργεια στις εξισώσεις Friedmann

Η ανακάλυψη της επιταχυνόμενης διαστολής του Σύμπαντος στα τέλη της δεκαετίας του 1990 αποτέλεσε μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στη σύγχρονη

κοσμολογία. Οι ανεξάρτητες παρατηρήσεις υπερκαινοφανών Τύπου Ia από τις ομάδες High – z Supernova Search Team και Supernova Cosmology Project αποκάλυψαν ότι το Σύμπαν δεν επιβραδύνεται, όπως αρχικά αναμενόταν λόγω της βαρυτικής έλξης της ύλης, αλλά αντίθετα επιταχύνεται. Η ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος απαιτεί την παρουσία μιας μορφής ενέργειας με έντονα αρνητική πίεση, η οποία ονομάστηκε σκοτεινή ενέργεια. Παρά το γεγονός ότι η φυσική της προέλευση παραμένει άγνωστη, η σκοτεινή ενέργεια ενσωματώνεται με συνεπή τρόπο στις εξισώσεις Friedmann, οι οποίες αποτελούν τη θεμελιώδη περιγραφή της κοσμικής δυναμικής στο πλαίσιο της γενικής σχετικότητας.

Σε ένα ομογενές και ισότροπο Σύμπαν, που περιγράφεται από τη μετρική FLRW, η χρονική εξέλιξη του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$  προκύπτει από την πρώτη εξίσωση Friedmann:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (4.15)$$

όπου  $H$  είναι η παράμετρος Hubble,  $\rho$  η συνολική ενεργειακή πυκνότητα (ύλης και ακτινοβολίας),  $k$  ο δείκτης καμπυλότητας και  $\Lambda$  η κοσμολογική σταθερά. Η κοσμολογική σταθερά μπορεί να ερμηνευθεί ως ενεργειακή πυκνότητα κενού, με τιμή:

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad (4.16)$$

γεγονός που επιτρέπει την αντιμετώπισή της ως ρευστό με παράμετρο εξίσωσης κατάστασης  $w = -1$ .

Η δεύτερη εξίσωση Friedmann:

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (4.17)$$

περιγράφει το αν το Σύμπαν επιταχύνεται ή επιβραδύνεται. Η συμβολή της σκοτεινής ενέργειας, είτε μέσω της  $\Lambda$  είτε μέσω ενός δυναμικού ρευστού, είναι καθοριστική για την κοσμική επιτάχυνση: απαιτείται η συνθήκη  $\rho + 3p < 0$ , που ισοδυναμεί με  $w < -1/3$ , όπου  $w = p/\rho$  η παράμετρος εξίσωσης κατάστασης.

Η απλή περίπτωση  $w = -1$  αντιστοιχεί στο πρότυπο με κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , στο οποίο η ενεργειακή πυκνότητα παραμένει χρονικά σταθερή. Ωστόσο, τόσο θεωρητικοί όσο και παρατηρησιακοί λόγοι έχουν οδηγήσει στη μελέτη δυναμικών προσεγγίσεων σκοτεινής ενέργειας. Η γενική εξίσωση συνέχειας για ένα κοσμικό ρευστό

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0 \quad (4.18)$$

οδηγεί στην εξέλιξη της ενεργειακής πυκνότητας ως συνάρτηση του παράγοντα κλίμακας σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα. Αν θεωρήσουμε ότι η κοσμική συνιστώσα (ύλη, ακτινοβολία, σκοτεινή ενέργεια, phantom energy κ.λπ.) υπακούει στη γραμμική εξίσωση κατάστασης:

$$p = w\rho \quad (4.19)$$

τότε η εξίσωση συνέχειας γίνεται:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\rho(1 + w) = 0 \quad (4.20)$$

η οποία έχει ως λύση τη σχέση:

$$\rho = Ca^{-3(1+w)} \quad (4.21)$$

Αν ορίσουμε ότι, όταν ο παράγοντας κλίμακας  $a$  σήμερα ισούται με τη μονάδα ( $a(t_{\text{σήμερα}}) = 1$ ), η ενεργειακή πυκνότητα είναι  $\rho_0$ , τότε:

$$\rho_0 = C1^{-3(1+w)} = C \quad (4.22)$$

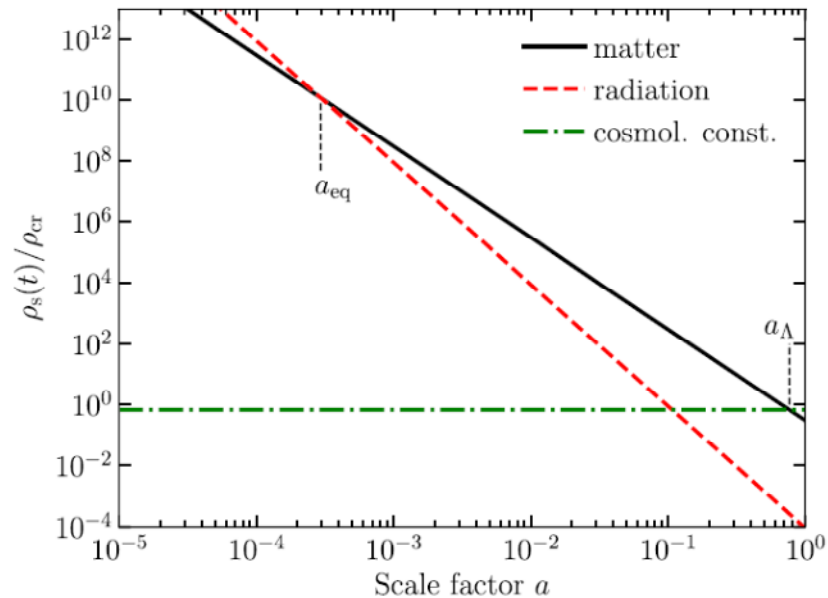
Επομένως η πλήρης σχέση είναι (Dodelson, 2020; Liddle, 2015):

$$\rho(a) = \rho_0 a^{-3(1+w)} \quad (4.23)$$

Η εξάρτηση αυτή δείχνει ότι η συμπεριφορά της σκοτεινής ενέργειας διαφέρει ποιοτικά από εκείνη της ύλης και της ακτινοβολίας.

- για  $w = 0$  : η ύλη αραιώνει ως  $a^{-3}$
- για  $w = 1/3$  : η ακτινοβολία μειώνεται ως  $a^{-4}$
- για  $w \approx -1$  : η σκοτεινή ενέργεια παραμένει σχεδόν σταθερή εφόσον  $a^0$ .

Η ιδιότητα αυτή εξηγεί τη μεταβατική κοσμική ιστορία: παρόλο που η σκοτεινή ενέργεια είχε αμελητέα συμβολή στις πρώιμες εποχές του Σύμπαντος, σήμερα κυριαρχεί στην κοσμική δυναμική, αποτελώντας περίπου το 70% της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας.



**Διάγραμμα 4.4:** Εξέλιξη των ενεργειακών πυκνοτήτων του Σύμπαντος ως συνάρτηση του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ : η ακτινοβολία (κόκκινο) κυριαρχεί στα πρώιμα στάδια, η ύλη (μαύρο) στην πλειονότητα της ιστορίας του Σύμπαντος, και η κοσμολογική σταθερά/σκοτεινή ενέργεια (πράσινο) καθορίζει την επιταχυνόμενη διαστολή στο σύγχρονο Σύμπαν. Όπου  $a_{eq}$  το σημείο όπου η ύλη και η ακτινοβολία έχουν ίση πυκνότητα. Πριν από αυτό κυριαρχεί η ακτινοβολία, μετά κυριαρχεί η ύλη. Όπου  $a_{\Lambda}$  το σημείο όπου η ύλη και η σκοτεινή ενέργεια έχουν ίση πυκνότητα. Μετά από αυτό το Σύμπαν μπαίνει σε «επιταχυνόμενη διαστολή». Credit: Scott Dodelson Modern Cosmology Second edition.

Καθώς η κοσμολογική σταθερά διατηρεί σταθερή ενεργειακή πυκνότητα και σταθερή πίεση, οδηγεί μακροπρόθεσμα σε καθεστώς συνεχούς και εκθετικά επιταχυνόμενης διαστολής. Συγκεκριμένα, μετά από ένα εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα στην εξέλιξη του Σύμπαντος μόνο η συνιστώσα της  $\Lambda$  κυριαρχεί πλήρως ( $\rho_{\Lambda} = \text{σταθερή}$ ), ενώ ισχύει ότι  $\rho_{\text{ύλης}} \rightarrow 0$  και  $\rho_{\text{ακτιν}} \rightarrow 0$ , συνεπώς η πρώτη εξίσωση Friedmann (σχέση 4.15) γίνεται<sup>40</sup>:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = +\frac{\Lambda}{3} \quad (4.24)$$

δηλαδή η παράμετρος Hubble παραμένει σταθερή:

$$H = H_{\Lambda} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \quad (4.25)$$

Από τον ορισμό του H έχουμε:

<sup>40</sup> Ο όρος  $\frac{k}{a^2}$  φεύγει καθώς ασυμπτωτικά για μεγάλους χρόνους  $t \rightarrow \infty$ ,  $k \approx 0$ , δηλαδή η χωρική καμπυλότητα γίνεται αμελητέα.

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad (4.26)$$

επομένως λύνοντας αυτήν την απλή διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης βρίσκουμε ότι η λύση της πρώτης εξίσωσης Friedmann τείνει ασυμπτωτικά στη μορφή

$$a(t) \sim e^{H_\Lambda t} \quad (4.27)$$

η οποία αντιστοιχεί σε χωροχρόνο τύπου de Sitter. Ο χωροχρόνος de Sitter αναφέρεται σε ένα Σύμπαν που διαστελλεται συνεχώς και επιταχυνόμενα, επειδή κυριαρχεί μια θετική κοσμολογική σταθερά (ενέργεια του κενού), χωρίς να υπάρχει ύλη ή ακτινοβολία. ( $\Omega_\Lambda = 1, k = 0, \Omega_M = 0, \Omega_R = 0$ ) (De Sitter, 1917). Η συμπεριφορά λοιπόν αυτή δείχνει ότι η παρουσία της  $\Lambda$  δεν καθορίζει μόνο την τρέχουσα επιτάχυνση, αλλά και τη μακρινή μελλοντική εξέλιξη του Σύμπαντος, το οποίο θα επεκτείνεται με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό.

Η θεωρητική και παρατηρησιακή διερεύνηση της σκοτεινής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός μεγάλου εύρους προσεγγίσεων, από απλά φαινομενολογικά μοντέλα μέχρι πλήρως ανεπτυγμένα θεωρητικά πλαίσια που προσπαθούν να συσχετίσουν την κοσμική επιτάχυνση με βαθύτερες αρχές της θεμελιώδους φυσικής. Παρά τη μεγάλη επιτυχία του προτύπου  $\Lambda$ CDM στην περιγραφή ενός εντυπωσιακά μεγάλου συνόλου ανεξάρτητων κοσμολογικών παρατηρήσεων, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά θεωρητικά ζητήματα — όπως το πρόβλημα της κοσμολογικής σταθεράς και η φύση των δυναμικών μορφών σκοτεινής ενέργειας— τα οποία παραμένουν άλυτα. Τα ζητήματα αυτά αναδεικνύουν τη σκοτεινή ενέργεια ως μία από τις πιο αινιγματικές, αλλά ταυτόχρονα θεμελιώδεις, συνιστώσες του Σύμπαντος. Ως όρος στις εξισώσεις Friedmann, διαμορφώνει καθοριστικά την τρέχουσα και μελλοντική κοσμική εξέλιξη, ενώ παράλληλα εγείρει βαθιά ερωτήματα σχετικά με τη δομή του κενού, την αλληλεπίδραση πεδίων σε κοσμολογικές κλίμακες και τη φύση του ίδιου του χωροχρόνου. Στο πλαίσιο αυτό, μεγάλα παρατηρησιακά προγράμματα, όπως τα Euclid, DESI και LSST, τα οποία ήδη αποδίδουν σημαντικά δεδομένα, αναμένεται τα επόμενα χρόνια να προσφέρουν μετρήσεις εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας, τα οποία θα επιτρέψουν τη διάκριση ανάμεσα σε ανταγωνιστικές προσεγγίσεις σκοτεινής ενέργειας και πιθανώς θα αποκαλύψουν νέα φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο.

#### 4.4 Επιπτώσεις της σκοτεινής ενέργειας στη γεωμετρία και στην τελική μοίρα του Σύμπαντος

Η παρουσία της σκοτεινής ενέργειας έχει άμεσες επιπτώσεις στη γεωμετρία του Σύμπαντος, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η καμπυλότητα του χωροχρόνου εξελίσσεται σε κοσμολογική κλίμακα. Σε ένα επίπεδο ή σχεδόν επίπεδο Σύμπαν, η αρνητική πίεση της σκοτεινής ενέργειας αντισταθμίζει τη βαρυτική έλξη της ύλης,

επιτρέποντας στην καμπυλότητα του χωροχρόνου να παραμένει ουσιαστικά μηδενική ενώ το Σύμπαν διαστέλλεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Με άλλα λόγια, η σκοτεινή ενέργεια δεν επηρεάζει μόνο την ταχύτητα διαστολής, αλλά και τη γεωμετρική μορφή των κοσμολογικών λύσεων των εξισώσεων του Einstein, συνδέοντας άμεσα την κοσμολογική δυναμική με τη χωροχρονική γεωμετρία.

#### 4.4.1 Επιρροή στη γεωμετρία του Σύμπαντος

Η γεωμετρία του Σύμπαντος συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή του πυκνότητα μέσω της πρώτης εξίσωσης Friedmann. Συγκεκριμένα, η συνολική καμπυλότητα του χωροχρόνου καθορίζεται από τον παράγοντα πυκνότητας  $\Omega_{total}$ ,

$$\Omega_{total} = \Omega_M + \Omega_r + \Omega_\Lambda \quad (4.28)$$

όπου το  $\Omega_M$  αναφέρεται στην ύλη (βαρυονική και σκοτεινή), το  $\Omega_r$  στην ακτινοβολία και το  $\Omega_\Lambda$  στη συνεισφορά της σκοτεινής ενέργειας (συνήθως με μορφή σταθεράς κοσμολογικής).

Όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 2 η συνολική καμπυλότητα συνδέεται με το  $\Omega_{total}$  με τη σχέση:

$$\Omega_k = 1 - \Omega_{total} \quad (4.29)$$

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι δυνατές γεωμετρικές μορφές του Σύμπαντος όπως προκύπτουν από την παραπάνω σχέση και τις αντίστοιχες τιμές της ολικής πυκνότητας:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1**

$\Omega_k$	$\Omega_{total}$	Γεωμετρία
= 0	= 1	Επίπεδη (ευκλείδεια)
> 0	< 1	Ανοιχτή (υπερβολική)
< 0	> 1	Κλειστή (σφαιρική)

**Πίνακας 4.1:** Η τιμή της παραμέτρου καμπυλότητας  $\Omega_k$  σε συνδυασμό με την ολική πυκνότητα  $\Omega_{total}$  καθορίζει τη γεωμετρία του Σύμπαντος.

Εάν τελικά η σκοτεινή ενέργεια είναι εκείνη που κυριαρχεί, με τιμή περίπου

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7, \quad (4.30)$$

τότε η συνολική πυκνότητα τείνει να πλησιάζει τη μονάδα, καθιστώντας το Σύμπαν γεωμετρικά επίπεδο ( $k \approx 0$ ) (Riess et al. 1998). Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από τις ακριβείς τιμές της ύλης και της ακτινοβολίας, διότι η σκοτεινή ενέργεια υπερισχύει ραγδαία σε κοσμικούς χρόνους (αφού η πυκνότητά της παραμένει σχεδόν σταθερή καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται, σε αντίθεση με την ύλη που αραιώνει ως  $a^{-3}$  και την ακτινοβολία ως  $a^{-4}$ ). Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από τις πιο ακριβείς κοσμολογικές παρατηρήσεις: τα δεδομένα WMAP και Planck δείχνουν ότι ζούμε σε ένα Σύμπαν εξαιρετικά κοντά στο επίπεδο, με τυπικές τιμές: (Planck Collaboration VI, 2021)

$$\Omega_k \approx 0.001 \pm 0.002 \quad (4.31)$$

Η τιμή αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό των δεδομένων της επίσημης ανάλυσης Planck PR3 (2018) με ανεξάρτητες μετρήσεις των Βαρυονικών Ακουστικών Ταλαντώσεων (BAO). Η πιο πρόσφατη ανάλυση Planck PR4 (2024) δίνει  $\Omega_k = -0.012 \pm 0.010$  όταν η εκτίμηση γίνεται χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τα ίδια τα δεδομένα της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου (CMB), χωρίς να συνδυαστούν με άλλες ανεξάρτητες κοσμολογικές μετρήσεις όπως τα BAO ή το φαινόμενο βαρυτικού φακού που υφίσταται η CMB.

Οι σύγχρονες κοσμολογικές παρατηρήσεις συγκλίνουν λοιπόν στο ότι το Σύμπαν είναι εξαιρετικά κοντά στο επίπεδο, με την ακρίβεια της εκτίμησης να εξαρτάται από τον συνδυασμό των διαθέσιμων δεδομένων. Η σταθερή αυτή συμβατότητα με μια επίπεδη γεωμετρία αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά και καθαρά επιχειρήματα υπέρ του Καθιερωμένου Προτύπου  $\Lambda$ CDM, ενισχύοντας τη συνοχή και την προγνωστική του ισχύ.

Η αρνητική πίεση,  $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$ , της σκοτεινής ενέργειας είναι αυτή που οδηγεί σε επιταχυνόμενη διαστολή. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2, ο βαθμός επιτάχυνσης καθορίζεται από τον παράγοντα επιβράδυνσης (σχέση 2.64):

$$q_0 = -\frac{a(t_0)\ddot{a}(t_0)}{\dot{a}^2(t_0)} \quad (4.32)$$

ο οποίος για ένα Σύμπαν με ύλη και σκοτεινή ενέργεια γίνεται:

$$q_0 = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda \quad (4.33)$$

Με τις σημερινές τιμές ( $\Omega_M \approx 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ ), βρίσκουμε  $q \approx -0.55$ , που δείχνει ξεκάθαρη επιτάχυνση. Τεχνικά η ακτινοβολία (φωτόνια και νετρίνα σε πρώιμο σύμπαν) συνεισφέρει στον παράγοντα επιβράδυνσης  $q_0$ , αλλά για το σήμερα η συνεισφορά της είναι αμελητέα ( $\Omega_r \sim 5 \cdot 10^{-5}$ ) (Lahav & Liddle, 2004).

Η σκοτεινή ενέργεια δεν ήταν πάντα κυρίαρχη. Η πυκνότητα της ύλης μειώνεται καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται, και η σκοτεινή ενέργεια κυριάρχησε μόνο όταν το Σύμπαν έφτασε περίπου το 70% της σημερινής ηλικίας του ( $z \approx 0.6-0.7$ ). Πριν από αυτό, η ύλη καθόριζε τη γεωμετρία και τη δυναμική της διαστολής. Η κυριαρχία της σηματοδοτεί την έναρξη της επιταχυνόμενης διαστολής, όπως ανακαλύφθηκε από υπερκαινοφανείς τύπου Ia το 1998.

Η αρνητική πίεση που χαρακτηρίζει τη σκοτεινή ενέργεια δεν επηρεάζει μόνο τον ρυθμό διαστολής, αλλά και την εξέλιξη των κοσμικών δομών. Συγκεκριμένα, επιβραδύνει τη βαρυτική συρρίκνωση της ύλης σε μεγάλες κλίμακες και περιορίζει τη διαμόρφωση γαλαξιακών συμπλεγμάτων. Με άλλα λόγια, καθώς η σκοτεινή ενέργεια κυριαρχεί, το Σύμπαν γίνεται πιο «ευάλωτο» στη διαστολή, εμποδίζοντας την ανάπτυξη δομών που θα επέφερε μια καθαρά θετική πυκνότητα ύλης.

#### 4.4.2 Η τελική μοίρα του Σύμπαντος και θεωρίες εξέλιξης

Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του Σύμπαντος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία σκοτεινής ενέργειας προς ύλη. Αν η σκοτεινή ενέργεια διατηρεί σταθερή τιμή, όπως προβλέπεται στο Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM, το Σύμπαν θα συνεχίσει να διαστέλλεται με αυξανόμενο ρυθμό. Η συμπεριφορά αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η σκοτεινή ενέργεια χαρακτηρίζεται από παράμετρο κατάστασης  $w = -1$ , η οποία συνεπάγεται σταθερή ενεργειακή πυκνότητα ακόμη και καθώς ο όγκος του Σύμπαντος αυξάνεται. Η αρνητική αυτή πίεση, ενσωματωμένη στη σταθερά κοσμολογικής  $\Lambda$ , οδηγεί όπως έχουμε προαναφέρει σε επιταχυνόμενη διαστολή, η οποία ενδέχεται να διαρκέσει επ' αόριστον.

Στην προσέγγιση αυτή, γνωστή ως Big Freeze ή θερμικός θάνατος, οι γαλαξίες θα απομακρύνονται ολοένα και περισσότερο ο ένας από τον άλλον, μέχρι το σημείο όπου η κοσμική απομάκρυνση θα υπερκεράσει κάθε δυνατότητα βαρυτικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των μεγάλων δομών. Η αστροφυσική δραστηριότητα – όπως η γένεση άστρων – θα μειώνεται σταδιακά, καθώς τα διαθέσιμα αέρια αποθέματα θα εξαντλούνται και οι αστρικοί πληθυσμοί θα γερνούν και θα σβήνουν. Σε ασύλληπτα μεγάλες χρονικές κλίμακες, το Σύμπαν θα καταλήξει σκοτεινό, αδρανές και εξαιρετικά ψυχρό, με τη θερμοκρασία του να πλησιάζει ασυμπτωτικά προς το απόλυτο μηδέν (Adams & Laughlin, 1997).

Ο μαθηματικός μηχανισμός που οδηγεί σε αυτή την εξέλιξη περιγράφεται από την εξίσωση του παράγοντα κλίμακας. Για σταθερή σκοτεινή ενέργεια και  $w = -1$ , η κλίμακα  $a(t)$  αυξάνεται εκθετικά όπως είδαμε στη σχέση (4.27):

$$a(t) \sim e^{H_{\Lambda} t}, \quad H_{\Lambda} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}$$

Η εκθετική αυτή αύξηση συνεπάγεται ότι η διαστολή όχι μόνο συνεχίζεται, αλλά επιταχύνεται με τρόπο που σε κοσμολογικές χρονικές κλίμακες οδηγεί σε απώλεια κάθε τοπικά παρατηρήσιμης δομής, καθώς τα περισσότερα ουράνια αντικείμενα θα βρίσκονται πέρα από τον κοσμικό ορίζοντα. Η θερμοκρασία του Σύμπαντος θα μειώνεται προοδευτικά, καθώς η ακτινοβολία και η ύλη διασκορπίζονται σε ολοένα μεγαλύτερο όγκο, οδηγώντας τελικά στην κατάσταση θερμοκινθάνου, όπου δεν θα υπάρχει πια διαθέσιμη ενέργεια για να διατηρηθούν θερμοδυναμικές ή αστροφυσικές διαδικασίες.

Εναλλακτικά, σε κοσμολογικά πλαίσια όπου η σκοτεινή ενέργεια μεταβάλλεται με το χρόνο, γνωστά ως θεωρίες πεμπτουσίας (quintessence), η τελική μοίρα του Σύμπαντος μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά από εκείνη που προβλέπει το Καθιερωμένο Πρότυπο  $\Lambda$ CDM. Εάν η πίεση της σκοτεινής ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο αρνητική με την πάροδο του χρόνου, είναι θεωρητικά δυνατό να προκύψει το σενάριο του Big Rip (Caldwell et al. 2003; Briscese et al. 2007), κατά το οποίο η επιταχυνόμενη διαστολή αυξάνεται τόσο ραγδαία ώστε προκαλεί την τελική διάλυση όλων των φυσικών δομών. Σε ένα τέτοιο ακραίο κοσμολογικό πλαίσιο, όχι μόνο οι γαλαξίες και τα γαλαξιακά σμήνη διασπώνται, αλλά και τα αστέρια, οι πλανήτες, ακόμη και τα ίδια τα άτομα κατακερματίζονται εξαιτίας της υπερβολικά ισχυρής διαστολής.

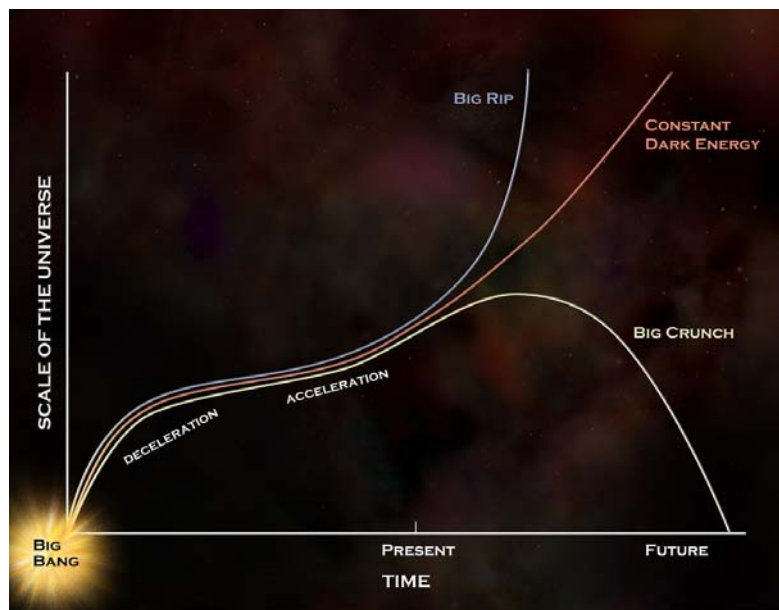
Όπως είδαμε παραπάνω αυτή η συμπεριφορά περιγράφεται μαθηματικά όταν η σκοτεινή ενέργεια έχει παράμετρο κατάστασης μικρότερη της μονάδας, δηλαδή  $w < -1$ , περίπτωση γνωστή ως phantom energy και ο παράγοντας κλίμακας του Σύμπαντος αυξάνεται με ρυθμό ταχύτερο του εκθετικού.

Αντίθετα, σε προσεγγίσεις όπου η σκοτεινή ενέργεια μειώνεται με το χρόνο και εξασθενεί ταχύτερα από την ύλη, μπορεί να επέλθει μια αντιστροφή της διαστολής. Σε αυτή την περίπτωση, η βαρυτική έλξη της ύλης μπορεί να υπερισχύσει σε μεταγενέστερες εποχές, αντιστρέφοντας την κοσμική διαστολή και οδηγώντας το Σύμπαν σε μία φάση συρρίκνωσης. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το Big Crunch, μια συνολική επανακατάρρευση του Σύμπαντος σε μια υπέρπυκνη, θερμή και ακραία βαρυτική κατάσταση, ανάλογη – αλλά αντίστροφη – της Μεγάλης Έκρηξης (Hertog & Horowitz, 2004). Παρά την θεωρητική αυτή δυνατότητα, τα σύγχρονα παρατηρησιακά δεδομένα από υπερκαινοφανείς τύπου Ia, το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο και τις βαρυτικές ταλαντώσεις μεγάλης κλίμακας δεν φαίνεται να υποστηρίζουν την προοπτική μιας μελλοντικής κοσμικής κατάρρευσης. Αντίθετα, συμφωνούν πληθωρικά με την υπόθεση ότι η σκοτεινή ενέργεια διατηρεί σταθερή τιμή, όπως απαιτεί το Πρότυπο  $\Lambda$ CDM.

Συνολικά, η σκοτεινή ενέργεια διαμορφώνει καθοριστικά τη μοίρα του Σύμπαντος. Η τρέχουσα παρατηρησιακή εικόνα υποστηρίζει ένα μέλλον επιταχυνόμενης διαστολής και θερμοκινθάνου, ενώ τα εναλλακτικά σενάρια του

Big Rip και του Big Crunch, αν και θεωρητικά ενδιαφέροντα, παραμένουν μη συμβατά με τα σημερινά δεδομένα.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει πώς μπορεί να εξελιχθεί η κλίμακα του Σύμπαντος στο χρόνο, ανάλογα με τη φύση και τη συμπεριφορά της σκοτεινής ενέργειας. Παρουσιάζει τρία βασικά σενάρια: τη συνεχή επιταχυνόμενη διαστολή σε περίπτωση σταθερής σκοτεινής ενέργειας, την ακραία καταστροφή του Σύμπαντος στο Big Rip όταν η σκοτεινή ενέργεια ενισχύεται με το χρόνο, και την αντιστροφή της διαστολής που οδηγεί στο Big Crunch αν η σκοτεινή ενέργεια εξασθενήσει. Με αυτόν τον τρόπο, η εικόνα οπτικοποιεί τη βαθιά επίδραση της σκοτεινής ενέργειας στην τελική μοίρα του κοσμικού μας μέλλοντος.



**Εικόνα 4.1:** Στις απαρχές της ιστορίας του, το Σύμπαν διαστάληκε ραγδαία. Ο ρυθμός διαστολής μειώθηκε σταδιακά, αλλά σήμερα φαίνεται να επιταχύνεται ξανά. Οι επιστήμονες αποδίδουν αυτό το φαινόμενο στη σκοτεινή ενέργεια, η οποία ωθεί τα πράγματα να απομακρύνονται μεταξύ τους. Η τελική μοίρα του Σύμπαντος εξαρτάται από την επιρροή της σκοτεινής ενέργειας. Αν συνεχίσει να κυριαρχεί σε σταθερά επίπεδα, το Σύμπαν μπορεί να αυξηθεί σε μέγεθος χωρίς όριο, οδηγώντας το σε έναν “θερμικό θάνατο”. Αν η ισχύς της σκοτεινής ενέργειας αυξηθεί υπερβολικά, το Σύμπαν θα μπορούσε να οδηγηθεί σε μια “μεγάλη ρήξη” (Big Rip). Αν η σκοτεινή ενέργεια εξασθενήσει και το Σύμπαν περιέχει αρκετή μάζα, τότε ίσως τελικά καταρρεύσει σε μια “μεγάλη σύνθλιψη” (Big Crunch).. Credit: NASA/CXC/M. Weiss.

Πέρα από τα κλασικά σενάρια που προκύπτουν από το Καθιερωμένο Πρότυπο  $\Lambda$ CDM και τις δυναμικές εκδοχές της σκοτεινής ενέργειας, η σύγχρονη κοσμολογική έρευνα έχει προτείνει μια σειρά από εναλλακτικές θεωρίες που περιγράφουν διαφορετικούς πιθανούς τρόπους μελλοντικής εξέλιξης του Σύμπαντος. Ανάμεσά

τους ξεχωρίζουν οι κυκλικές θεωρίες, τα σενάρια κβαντικής αναπήδησης, καθώς και υποθέσεις που βασίζονται στην ενδεχόμενη μετασταθή φύση του κενού της θεωρίας πεδίων.

Μια από τις σημαντικότερες σύγχρονες προσεγγίσεις είναι το κυκλικό Σύμπαν, στο οποίο η κοσμική ιστορία αποτελείται από διαδοχικούς κύκλους διαστολής και συστολής χωρίς πραγματική βαρυτική μοναδικότητα. Στο πλαίσιο αυτό, η Μεγάλη Έκρηξη δεν αποτελεί αρχή του χρόνου, αλλά μια ομαλή μετάβαση μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων (Steinhardt & Turok, 2002; Lehnars, 2008). Η σκοτεινή ενέργεια παίζει ενεργό ρόλο σε αυτούς τους κύκλους, καθορίζοντας τόσο τη διάρκεια όσο και την ομαλότητα της μετάβασης από τον έναν κύκλο στον επόμενο.

Μια δεύτερη κατηγορία θεωριών προέρχεται από την κβαντική βαρύτητα βρόχων (LQG), η οποία υποστηρίζει ότι η κλασική βαρυτική κατάρρευση δεν οδηγεί ποτέ σε πραγματική μοναδικότητα. Αντίθετα, η εξίσωση Friedmann τροποποιείται σε υψηλές πυκνότητες και το Σύμπαν υφίσταται μια «κβαντική αναπήδηση» (Big Bounce), μεταβαίνοντας από μια προηγούμενη φάση συστολής στη σημερινή φάση διαστολής (Ashtekar, Pawłowski, & Singh, 2006; Agulló & Singh, 2017). Σε αυτές τις θεωρίες, η τελική μοίρα του Σύμπαντος μπορεί να είναι ένας μελλοντικός ακόμη κύκλος σύγκλισης και αναπήδησης, χωρίς θερμικό θάνατο ή εξάλειψη δομών.

Ένα τρίτο σενάριο σχετίζεται με τη μετασταθή φύση του κενού στο Καθιερωμένο Πρότυπο Σωματιδιακής Φυσικής. Αν το παρόν κενό δεν είναι το απόλυτο ελάχιστο της ενέργειας του πεδίου Higgs, τότε σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή μπορεί να πυροδοτηθεί μια «φούσκα» κενού χαμηλότερης ενέργειας που θα επεκταθεί με ταχύτητα φωτός, μεταβάλλοντας ριζικά τις φυσικές σταθερές και τερματίζοντας τη σημερινή κοσμική δομή (Coleman & De Luccia, 1980; Buttazzo et al. 2013). Αν και αυτό το σενάριο δεν περιγράφει θερμοδυναμική εξέλιξη τύπου Big Freeze ή Big Rip, αποτελεί μια θεμελιώδη πιθανότητα που απορρέει από την κβαντική θεωρία πεδίων.

Συνολικά, τα νέα θεωρητικά πλαίσια επιτρέπουν μια πλουσιότερη και συχνά πιο σύνθετη εικόνα της τελικής μοίρας του Σύμπαντος. Ωστόσο, τα σημερινά παρατηρησιακά δεδομένα εξακολουθούν να ευνοούν έντονα την απλούστερη υπόθεση της σταθερής σκοτεινής ενέργειας και της επ' αόριστον επιταχυνόμενης διαστολής, όπως προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο  $\Lambda$ CDM.

## 5. Η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια σε σύγχρονα κοσμολογικά πρότυπα

### 5.1. Ιστορική αναδρομή Κοσμολογικών Προτύπων

Η ιστορική εξέλιξη των κοσμολογικών προτύπων ξεκινά από τις αρχαίες ελληνικές αντιλήψεις, όπου ο Αριστοτέλης και ο Πτολεμαίος διαμόρφωσαν γεωκεντρικά πρότυπα βασισμένα σε ομόκεντρες ουράνιες σφαίρες και κυκλικές κινήσεις, συνδυάζοντας φιλοσοφία και παρατήρηση. Κατά την Αναγέννηση, ο Νικόλαος Κοπέρνικος, ανέτρεψε το παλαιό κοσμολογικό σχήμα και διατύπωσε δυναμικά την άποψη, που είχε εμφανιστεί σχεδόν δύο χιλιάδες χρόνια πριν με τον Αρίσταρχο, ότι πρέπει να θεωρήσουμε πως η Γη και οι υπόλοιποι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο.

Στην εποχή του ο Ισαάκ Νεύτωνας, εισήγαγε μια μηχανιστική και καθολική περιγραφή της βαρύτητας, προσφέροντας το πρώτο συνεκτικό φυσικό υπόβαθρο για την κατανόηση του Σύμπαντος ως ενιαίου συστήματος. Η συζήτηση για ένα άπειρο ή στατικό Σύμπαν οξύνθηκε τον 19ο αιώνα, οδηγώντας τελικά στη ριζική αναδιαμόρφωση της κοσμολογίας με τη Γενική Σχετικότητα, μέσα από το έργο του Albert Einstein, ο οποίος πρότεινε ένα καμπυλωμένο, στατικό Σύμπαν. Λίγο αργότερα, οι δυναμικές λύσεις του Alexander Friedmann και η ιδέα της κοσμικής αρχής που εισήγαγε ο Goerge Lemaitre, άνοιξαν τον δρόμο για τη σύλληψη του διαστελλόμενου Σύμπαντος και του πρώιμου προτύπου της Μεγάλης Έκρηξης.

Στα μέσα του 20ού αιώνα αναπτύχθηκε το ανταγωνιστικό πρότυπο της Σταθερής Κατάστασης, με κύριο εκπρόσωπο τον Fred Hoyle (Hoyle, 1948), το οποίο υποστήριζε ένα αιώνιο και αμετάβλητο Σύμπαν με συνεχή δημιουργία ύλης· ωστόσο, η παρατήρηση της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου ενίσχυσε αποφασιστικά το πρότυπο της Μεγάλης Έκρηξης.

Στο τέλος του 20ού αιώνα, η θεωρία του πληθωρισμού, διατυπωμένη από τον Alan Guth (Guth, 1981) προσέφερε λύσεις σε θεμελιώδη προβλήματα της πρώιμης κοσμολογίας, ενώ η σύγχρονη ενοποιημένη εικόνα αποτυπώνεται στο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM, το οποίο ενσωματώνει τη σκοτεινή ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια, περιγράφοντας με συνέπεια την παρατηρούμενη επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος (Harrison, 2000, Liddle, 2015).

### 5.2 Η διαστολή του Σύμπαντος και η φυσική της σημασία

Η διαστολή του Σύμπαντος αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη εμπειρικά και θεωρητικά στοιχεία της σύγχρονης κοσμολογίας. Οι πρώτες ενδείξεις για ένα μη στατικό Σύμπαν εμφανίστηκαν μέσα από τις παρατηρήσεις του Edwin Hubble, ο οποίος διαπίστωσε ότι οι γαλαξίες εμφανίζουν συστηματική ερυθρομετατόπιση. Η

ερυθρομετατόπιση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της σύγχρονης κοσμολογίας. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το φως που λαμβάνουμε από ένα μακρινό αντικείμενο που απομακρύνεται από εμάς, εμφανίζεται «μετατοπισμένο» προς το κόκκινο, δηλαδή προς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, από τον Αμερικανό αστρονόμο Vesto Slipher και αποτέλεσε τη βάση για το έργο του Edwin Hubble.

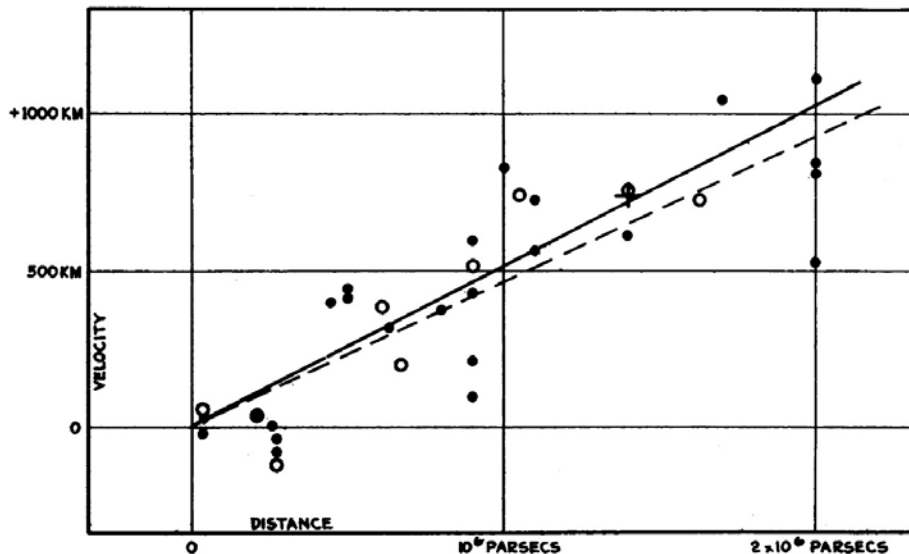
Αποδεικνύεται ότι σχεδόν όλοι οι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς, συνεπώς, το καθιερωμένο μέγεθος που περιγράφει το φαινόμενο είναι ερυθρομετατόπιση  $z$ , και ορίζεται ως (Liddle, 2015):

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad (5.1)$$

όπου  $\lambda_{em}$  και  $\lambda_{obs}$  είναι τα μήκη κύματος του φωτός στα σημεία εκπομπής (γαλαξίας) και παρατήρησης (εμείς). Εάν ένα κοντινό αντικείμενο απομακρύνεται με ταχύτητα  $v$ , τότε η ερυθρομετατόπιση είναι:

$$z = \frac{v}{c} \quad (5.2)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός.



**Διάγραμμα 5.1:** Το ιστορικό διάγραμμα του Edwin Hubble (1929) που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας απομάκρυνσης γαλαξιών (κατακόρυφος άξονας) και απόστασής τους (οριζόντιος άξονας). Τα σημεία αντιστοιχούν σε παρατηρούμενους γαλαξίες, ενώ η ευθεία γραμμή δείχνει τη γραμμική συσχέτιση που οδήγησε στη διατύπωση του νόμου Hubble, προσφέροντας την πρώτη παρατηρησιακή ένδειξη για τη διαστολή του Σύμπαντος. Credit: <http://www.pnas.org/content/15/3/168>.

Ο Hubble συνειδητοποίησε ότι οι παρατηρήσεις του έδειξαν ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης ήταν ανάλογη της απόστασης ενός αντικειμένου από εμάς:

$$\vec{v} = H_0 \vec{r} \quad (5.3)$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Hubble και η σταθερά αναλογίας  $H_0$ , για την οποία μιλήσαμε σε παραπάνω κεφάλαιο, είναι γνωστή ως σταθερά του Hubble. Ο νόμος του Hubble δεν είναι ακριβής, καθώς η κοσμολογική αρχή δεν ισχύει απόλυτα για τους κοντινούς γαλαξίες, που συνήθως, πραγματοποιούν τυχαίες κινήσεις. Αλλά περιγράφει τη μέση συμπεριφορά των γαλαξιών εξαιρετικά καλά.

Η διαστολή του Σύμπαντος δεν πρέπει να νοείται ως κίνηση των γαλαξιών μέσα σε προϋπάρχοντα χώρο, αλλά ως διαστολή του ίδιου του χωροχρόνου. Η αύξηση της κλίμακας του Σύμπαντος αποτυπώνεται στον παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ , ενώ η ερυθρομετατόπιση των μακρινών γαλαξιών προκύπτει από την επιμήκυνση του μήκους κύματος του φωτός λόγω της διαστολής του χώρου. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι, όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας γαλαξίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ερυθρομετατόπιση και, κατ' επέκταση, η «ταχύτητα φυγής» που παρατηρούμε.

Η φυσική σημασία της διαστολής του Σύμπαντος είναι πολυεπίπεδη. Πρώτον, προσφέρει σαφή ένδειξη ότι το Σύμπαν έχει πεπερασμένη ηλικία και προήλθε από μια κατάσταση υψηλής πυκνότητας και θερμοκρασίας. Δεύτερον, επιτρέπει τον προσδιορισμό θεμελιωδών κοσμολογικών παραμέτρων, όπως η πυκνότητα της ύλης, της σκοτεινής ενέργειας και η καμπυλότητα του χωροχρόνου. Τρίτον, επηρεάζει τη δομή και την εξέλιξη των γαλαξιών, καθορίζοντας τον ρυθμό σχηματισμού κοσμικών δομών μέσω βαρυτικών αλληλεπιδράσεων. Τέλος, η διαστολή συνδέεται άμεσα με τη θερμοδυναμική του Σύμπαντος, καθώς η συνεχιζόμενη αύξηση του παράγοντα κλίμακας οδηγεί σε ψύξη της ακτινοβολίας και σε αλλαγή καθεστώτων φυσικής αλληλεπίδρασης στην κοσμική ιστορία.

### 5.3 Το Καθιερωμένο Πρότυπο $\Lambda$ CDM

Το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM, γνωστό και ως *Concordance Model*, αποτελεί σήμερα το ευρύτερα αποδεκτό θεωρητικό πλαίσιο που περιγράφει την εξέλιξη και τη μεγάλης κλίμακας δομή του Σύμπαντος. Η θεωρία αυτή ενσωματώνει τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΘΣ) του Einstein, την παρουσία μιας κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$  η οποία ερμηνεύεται ως μορφή σκοτεινής ενέργειας με σταθερή πυκνότητα στο χρόνο, την υπόθεση της κυριαρχίας ψυχρής σκοτεινής ύλης (CDM), η οποία θεωρείται μη σχετικιστική κατά τον σχηματισμό των δομών και δεν αλληλεπιδρά μέσω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, καθώς και την απόδοση των αρχικών διαταρχών, στον πληθωρισμό στο πολύ πρώιμο Σύμπαν. (Dodelson, & Schmidt, 2020).

Συγκεκριμένα, το παρατηρήσιμο τμήμα του Σύμπαντος προέρχεται από κάποια Μεγάλη Έκρηξη με πληθωριστική φάση, διαστέλλεται επιταχυνόμενα και ψύχεται, αποτελείται κατά **5%** από τα γνωστά σωματία της συνήθους ύλης, κατά **25%** από την άγνωστη σκοτεινή ύλη (CDM), και κατά **70%** από το άγνωστο αίτιο της επιταχυνόμενης διαστολής, δηλαδή την κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ .

Επιπλέον, το  $\Lambda$ CDM συμπληρώνεται φυσικά από τον μηχανισμό του κοσμικού πληθωρισμού, ο οποίος αποτελεί τον πλέον συνεκτικό και ευρέως αποδεκτό μηχανισμό για τη γένεση των πρωταρχικών διαταραχών στο πρώιμο Σύμπαν — εκείνων των μικρών ανωμαλιών πυκνότητας που εξελίχθηκαν μέσω βαρυτικής κατάρρευσης στις δομές που παρατηρούμε σήμερα.

Ο πληθωρισμός προϋποθέτει την ύπαρξη μιας εξαιρετικά σύντομης αλλά δυναμικά καθοριστικής περιόδου στα πρώτα στάδια της κοσμικής ιστορίας, κατά την οποία ο παράγοντας κλίμακας αυξήθηκε εκθετικά. Η δυναμική αυτή παρουσιάζει αναλογίες με τη σημερινή επιταχυνόμενη διαστολή, καθώς και στις δύο περιπτώσεις το Σύμπαν κυριαρχείται από μια μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή ενεργειακή πυκνότητα. Ωστόσο, οι ενεργειακές κλίμακες διαφέρουν δραματικά: η ενέργεια του πληθωριστικού πεδίου εκτιμάται ότι υπερέβαινε τη σημερινή πυκνότητα σκοτεινής ενέργειας κατά περίπου 60 τάξεις μεγέθους (Baumann, TASI Lectures on Inflation 2009; Guth, 1981).

Ένα από τα πιο σημαντικά πειραματικά τεστ του πληθωρισμού αφορά στην αναζήτηση πρωτογενών βαρυτικών κυμάτων, που αφήνουν χαρακτηριστικό αποτύπωμα στην πόλωση τύπου B – mode της Κοσμικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου. Η ανίχνευση ενός τέτοιου σήματος θα αποτελούσε ισχυρή επιβεβαίωση της πληθωριστικής προέλευσης των αρχικών διαταραχών και θα επέτρεπε την εκτίμηση της ενεργειακής κλίμακας του πληθωρισμού. Είναι ο πιο άμεσος τρόπος να δούμε τα πρώτα  $10^{-35}$  δευτερόλεπτα της ύπαρξης του Σύμπαντος και τη φυσική εξαιρετικά υψηλών ενεργειών που δεν μπορούμε να προσεγγίσουμε με κανένα άλλο μέσο. Μέχρι σήμερα, πειράματα όπως το BICEP/Keck έχουν θέσει αυστηρά όρια στο πλάτος των πρωτογενών βαρυτικών κυμάτων, ενώ η συνεχής βελτίωση της ευαισθησίας τους καθιστά πιθανή μια μελλοντική ανίχνευση, σημαντική για την ενίσχυση του  $\Lambda$ CDM και της θεωρίας του πληθωρισμού (Kamionkowski & Kovetz, 2016; BICEP/Keck Collaboration, 2021).

Στο πλαίσιο του  $\Lambda$ CDM, η συνολική ενεργειακή πυκνότητα του Σύμπαντος διαχωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες:

- τη σκοτεινή ενέργεια, που σήμερα κυριαρχεί και οδηγεί στην επιταχυνόμενη διαστολή

- την ψυχρή σκοτεινή ύλη, υπεύθυνη για τον σχηματισμό των γαλαξιών, των σμηνών και των υπερσμηνών
- τη βαρυονική ύλη, η οποία αποτελεί ένα μικρό αλλά κρίσιμο ποσοστό της συνολικής πυκνότητας
- και την ακτινοβολία (φωτόνια και νετρίνα), η οποία διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στα πρώτα στάδια της κοσμικής ιστορίας.

Η κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  ενσωματώνεται στις εξισώσεις πεδίου του Einstein με τη μορφή μίας σταθερής ενεργειακής πυκνότητας του κενού. Η παρουσία της οδηγεί σε έναν χωροχρόνο που τείνει ασυμπτωτικά στη λύση de Sitter (σχέση 4.27), περιγράφοντας ένα Σύμπαν που διαστέλλεται επιταχυνόμενα στο απώτερο μέλλον. Αντίστοιχα, η ψυχρή σκοτεινή ύλη επιτρέπει την ανάπτυξη βαρυτικών ασταθειών, οι οποίες ευθύνονται για τη διαμόρφωση της ιεραρχικής δομής που παρατηρούμε σήμερα. Ο συνδυασμός  $\Lambda$  και CDM αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην αναπαραγωγή των παρατηρησιακών δεδομένων.

Το πρότυπο  $\Lambda$ CDM θεμελιώνεται σε μια σειρά από βασικές υποθέσεις: την ομοιογένεια και ισοτροπία του Σύμπαντος σε μεγάλες κλίμακες (Κοσμολογική Αρχή), την εγκυρότητα της γενικής σχετικότητας ως περιγραφής της βαρύτητας σε κοσμολογικές κλίμακες, τον επίπεδο χώρο ( $k = 0$ ), γεγονός που επιβεβαιώνεται με υψηλή ακρίβεια από τα δεδομένα του Planck. (Planck Collaboration VI, 2021)

Παρά τις εντυπωσιακές του επιτυχίες, το πρότυπο  $\Lambda$ CDM δεν παύει να είναι ένα φαινομενολογικό πρότυπο, καθώς η φύση της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας παραμένει άγνωστη. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι σύγχρονες παρατηρησιακές εντάσεις, όπως η διαφορά στις τιμές της σταθεράς Hubble που αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, υποδηλώνουν ενδεχόμενη ανάγκη τροποποίησης ή επέκτασης του καθιερωμένου προτύπου. Παρόλα αυτά, η απλότητα, η προβλεπτικότητα και η συμβατότητά του με πλήθος ανεξάρτητων δεδομένων καθιστούν το  $\Lambda$ CDM τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης κοσμολογίας.

## 5.4 Βασικά χαρακτηριστικά του Σύμπαντος με βάση το Καθιερωμένο Πρότυπο

### 5.4.1. Η ηλικία του Σύμπαντος $t_0$

Η δυναμική της διαστολής του Σύμπαντος περιγράφεται από την πρώτη εξίσωση του Friedmann, η οποία σε όρους της παραμέτρου  $z$  της ερυθρομετατόπισης εκφράζεται ως (Hogg, 2000; Ryden, 2006).

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (5.4)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη γενικότερη μορφή της εξίσωσης, όπου η συμβολή της ύλης κλιμακώνεται ως  $(1+z)^3$ , της ακτινοβολίας ως  $(1+z)^4$ , η καμπυλότητα ως

$(1+z)^2$ , ενώ η σκοτεινή ενέργεια αντιστοιχεί σε σταθερό όρο μέσω της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ . Στο πλαίσιο του προτύπου  $\Lambda$ CDM, όπου υποτίθεται επίπεδη γεωμετρία και άρα  $\Omega_k \approx 0$ , η εξίσωση απλοποιείται στη μορφή:

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + \Omega_\Lambda} \quad (5.5)$$

Επιπλέον, στη σύγχρονη κοσμολογία η πυκνότητα ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με την ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια, ( $\Omega_r \sim 10^{-5}$ ) (Hogg, 2000; Ryden, 2006), με αποτέλεσμα να αμελείται σε αναλύσεις για σχετικά χαμηλές ερυθρομετατοπίσεις. Έτσι, για εφαρμογές όπως ο υπολογισμός της ηλικίας του Σύμπαντος, χρησιμοποιείται ευρέως η προσεγγιστική μορφή:

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda} \quad (5.6)$$

Η απλοποίηση αυτή δεν μειώνει την ακρίβεια των υπολογισμών σε κοσμολογικές κλίμακες χρόνου στη σημερινή εποχή, καθώς οι κυρίαρχες συνιστώσες στη δυναμική της διαστολής είναι η ύλη και η σκοτεινή ενέργεια, όπως έχει επιβεβαιωθεί από τις υψηλής ακρίβειας μετρήσεις της Planck Collaboration.

Ο παράγοντας κλίμακας  $a(t)$  σχετίζεται με την ερυθρομετάθεση σύμφωνα με τη σχέση (Liddle, 2015):

$$1+z = \frac{1}{a} \quad (5.7)$$

Επομένως μπορούμε να γράψουμε τη σχέση 5.6 συναρτήσει του παράγοντα κλίμακας  $a$ :

$$H(a) = H_0 \sqrt{\Omega_M a^{-3} + \Omega_\Lambda} \quad (5.8)$$

Για την παράμετρο Hubble ισχύει:

$$H(a) = \frac{\dot{a}}{a} \Rightarrow aH(a) = \frac{da}{dt} \Rightarrow dt = \frac{da}{aH(a)} \quad (5.9)$$

Ο συνολικός χρόνος από τη Μεγάλη Έκρηξη ( $a = 0$ ) μέχρι σήμερα ( $a = 1$ ) μπορεί να γραφεί ως:

$$t_0 = \int_0^{t_0} dt = \int_{a=0}^{a=1} \frac{da}{aH(a)} \quad (5.10)$$

Άρα,

$$t_0 = \int_0^1 \frac{da}{aH_0 \sqrt{\Omega_M a^{-3} + \Omega_\Lambda}} \quad (5.11)$$

Η τρέχουσα εκτίμηση της ηλικίας του Σύμπαντος προκύπτει λοιπόν από την εφαρμογή των εξισώσεων Friedmann στο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM και χρησιμοποιώντας παρατηρησιακά προσδιορισμένες παραμέτρους όπως ο ρυθμός διαστολής και οι πυκνότητες ύλης και σκοτεινής ενέργειας.

Η εξάρτηση του  $H(z)$  από τις παραμέτρους  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$  και  $H_0$  καθορίζει το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από τη Μεγάλη Έκρηξη έως σήμερα. Εάν χρησιμοποιήσουμε για τις τιμές των παραμέτρων αυτών, τα δεδομένα που έχουμε από την Planck Collaboration ([Planck Collaboration VI, 2021](#)), που αναλύει την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου, έχουμε:

- $H_0 \approx 67,4 \text{ km/s/Mpc}$
- $\Omega_M \approx 0,315$
- $\Omega_\Lambda \approx 0,685$

Βάζοντας αυτές τις τιμές στην παραπάνω ολοκλήρωση προκύπτει ότι η ηλικία του Σύμπαντος είναι περίπου 13,8 δισεκατομμύρια έτη ([Planck Collaboration VI, 2021](#)).

#### 5.4.2. Το μέγεθος του Σύμπαντος

Σε ό,τι αφορά στο μέγεθος του Σύμπαντος, το παρατηρούμενο τμήμα του — δηλαδή η περιοχή του κοσμικού χώρου από την οποία το φως έχει προλάβει να φτάσει στη Γη από τη Μεγάλη Έκρηξη έως σήμερα — διαθέτει ακτίνα περίπου 46,5 δισεκατομμυρίων ετών φωτός και, συνεπώς, διάμετρο σχεδόν 93 δισεκατομμυρίων ετών φωτός ([Halpern & Tomasello, 2016](#)). Αν και το Σύμπαν είναι ηλικίας περίπου 13,8 δισεκατομμυρίων ετών, το όριο του παρατηρήσιμου ορίζοντα εκτείνεται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω της συνεχιζόμενης κοσμικής διαστολής: το φως των πιο μακρινών αντικειμένων εκπέμφθηκε πριν από δισεκατομμύρια χρόνια, αλλά ο ίδιος ο χωροχρόνος έχει διασταλεί σημαντικά από τότε, αυξάνοντας τη σημερινή απόστασή τους. Το “παρατηρήσιμο Σύμπαν” δεν ταυτίζεται με το “ολόκληρο Σύμπαν”, καθώς θεωρητικά πλαίσια — ιδίως τα πληθωριστικά — υποδεικνύουν ότι η πραγματική έκταση του Σύμπαντος είναι πολύ μεγαλύτερη, πιθανώς ακόμη και άπειρη, με περιοχές που δεν θα γίνουν ποτέ προσβάσιμες στην παρατήρηση.

#### 5.4.3 Μάζα και θερμοκρασία

Χρησιμοποιώντας την κρίσιμη πυκνότητα (σχέση 2.54) και την ακτίνα του παρατηρούμενου Σύμπαντος η συνολική μάζα της βαρυονικής ύλης που περιέχεται στο Σύμπαν είναι της τάξης των  $1 * 10^{53} \text{ kg}$ . Υποθέτοντας ότι όλα τα άτομα του Σύμπαντος είναι άτομα Υδρογόνου<sup>41</sup>, ο συνολικός εκτιμώμενος αριθμός ατόμων στο

<sup>41</sup> Με βάση το Los Alamos National Observatory (<https://periodic.lanl.gov/1.shtml>) το 90% των συνολικών ατόμων του Σύμπαντος είναι άτομα Υδρογόνου, επομένως η υπόθεση αυτή είναι μια καλή προσέγγιση.

παρατηρήσιμο Σύμπαν μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας τη συνολική μάζα της ύλης με τη μάζα ενός ατόμου Υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι περίπου  $10^{80}$  άτομα Υδρογόνου. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο αριθμός αυτός είναι γνωστός ως αριθμός Eddington. Σε μια σειρά διαλέξεων, το 1938, στο Πανεπιστήμιο του Cambridge, ο διάσημος αστροφυσικός Arthur Eddington, είπε ότι πιστεύει ότι υπάρχουν 15.747.724.136.275.002.577.605.653.961.181.555.468.044.717.914.527.116.709.366.231.425.076.185.631.031.296 πρωτόνια και ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων. Πρόσφατες εκτιμήσεις (Munafo, R. *Notable properties of specific numbers*) δίνουν τον αρχικό αριθμό ατόμων, δηλαδή  $10^{80}$ . Με δεδομένο ότι η ποσότητα της σκοτεινής ύλης είναι 5 φορές μεγαλύτερη, η συνολική μάζα της ύλης του παρατηρήσιμου Σύμπαντος είναι της τάξης των  $6 * 10^{53} kg$ .

Όσον αφορά στον αριθμό των γαλαξιών στο Σύμπαν, με βάση πιο πρόσφατες μελέτες, έχει εκτιμηθεί κοντά στα 2 τρισεκατομμύρια (Conselice et al. 2016) ενώ ο αριθμός των αστεριών σε όλο το παρατηρούμενο Σύμπαν ανέρχεται στα  $10^{24}$  (European Space Agency (ESA))

Η θερμοκρασία του Σύμπαντος σήμερα αντιστοιχεί σε περίπου  $2.72548 \pm 0.00057 K$ . Το αποτέλεσμα προκύπτει από τον συνδυασμό των δεδομένων του WMAP, με τις παλαιότερες μετρήσεις του FIRAS<sup>42</sup> (Fixsen, 2009). Συγκρίνοντας αυτά τα δύο σύνολα δεδομένων, προκύπτει η παραπάνω τιμή η οποία είναι συμβατή με προηγούμενες μετρήσεις, παρέχοντας μια ανεξάρτητη επιβεβαίωση της θερμοκρασίας του Σύμπαντος.

## 5.5. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του $\Lambda$ CDM

Το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$ -Cold Dark Matter) έχει εξελιχθεί στο πλέον αποδεκτό θεωρητικό πλαίσιο για την περιγραφή της μεγάλης κλίμακας δομής και της δυναμικής του Σύμπαντος, καθώς συνδυάζει με ενιαίο τρόπο τις παρατηρήσεις της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου (CMB), των βαρυονικών ακουστικών ταλαντώσεων (BAO), των υπερκαινοφανών Τύπου Ia και της κατανομής μάζας σε κοσμολογικές κλίμακες. Η επιτυχία του προτύπου αυτού στηρίζεται σε μια σειρά πλεονεκτημάτων που το καθιστούν ιδιαίτερος ελκυστικό από θεωρητική και φαινομενολογική άποψη.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του  $\Lambda$ CDM είναι η απλότητά του. Με μόλις έξι βασικές παραμέτρους – την πυκνότητα βαρυονικής ύλης, την πυκνότητα σκοτεινής ύλης, την πυκνότητα της κοσμολογικής σταθεράς, τη σταθερά Hubble, το

<sup>42</sup> Το FIRAS ήταν το όργανο που μετρήσε με πολύ μεγάλη ακρίβεια το φάσμα της CMB και έδωσε την πιο ακριβή τιμή της θερμοκρασίας (περίπου 2.725 K).

πλάτος των πρωταρχικών διαταραχών και τον δείκτη φάσματος – η προσέγγιση αυτή καταφέρνει να περιγράψει με εντυπωσιακή ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα ανεξάρτητων παρατηρήσεων. Η οικονομία παραμέτρων και η προγνωστική του ισχύς ενισχύονται από την εξαιρετική συμφωνία του με τα δεδομένα του δορυφόρου Planck, ο οποίος προσφέρει μετρήσεις της CMB ακρίβειας πρωτοφανούς κλίμακας. Επιπλέον, το  $\Lambda$ CDM αναπαράγει συνεκτικά την ιστορική εξέλιξη του Σύμπαντος, από την εποχή της ακτινοβολίας και τη φάση επανασύνδεσης έως τη σύγχρονη εποχή κυριαρχίας της σκοτεινής ενέργειας.

Εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι το  $\Lambda$ CDM προσφέρει φυσική βάση για τον σχηματισμό δομών μέσω της θεωρίας του πληθωρισμού. Η ψυχρή σκοτεινή ύλη (CDM), μη βαρυονικής προέλευσης και μη σχετικιστική κατά τους πρώιμους κοσμολογικούς χρόνους, επιτρέπει την ανάπτυξη διαταραχών πυκνότητας πολύ νωρίτερα από τη βαρυονική ύλη, η οποία παραμένει συζευγμένη με την ακτινοβολία μέχρι την επανασύνδεση. Κατά συνέπεια, οι ανισotropίες της CMB μετατρέπονται σε διακυμάνσεις της ύλης που καταλήγουν στην ιεραρχική δημιουργία γαλαξιών και σμηνών. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί έναν από τους πιο επιτυχημένους συνδυασμούς θεωρίας και παρατήρησης στη σύγχρονη αστρονομία.

Παρά την αξιοσημείωτη επιτυχία του, το  $\Lambda$ CDM αντιμετωπίζει σημαντικούς περιορισμούς, τόσο παρατηρησιακούς όσο και θεωρητικούς. Πρωτίστως, η ίδια η φύση των δύο κεντρικών συστατικών του προτύπου – της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας – παραμένει άγνωστη. Παρά τις εκτεταμένες πειραματικές προσπάθειες, καμία από τις υποτιθέμενες υποψήφιες μορφές σκοτεινής ύλης (WIMPs, αξιόνια, αδρανή νετρίνα) δεν έχει ανιχνευθεί άμεσα. Αντίστοιχα, η κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , που αποτελεί τη φαινομενολογική περιγραφή της σκοτεινής ενέργειας, εγείρει το λεγόμενο πρόβλημα της λεπτομερούς ρύθμισης (fine – tuning) (Feng & Li, 2014), δηλαδή η θεωρητικά προβλεπόμενη τιμή της στο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας πεδίου διαφέρει από την παρατηρούμενη κατά περίπου 120 τάξεις μεγέθους, καθιστώντας τη μια από τις μεγαλύτερες εκκρεμότητες στη σύγχρονη θεωρητική φυσική.

Ένας ακόμη κρίσιμος περιορισμός είναι η λεγόμενη «διαφοροποίηση της σταθεράς του Hubble,  $H_0$ » (Hubble tension) (Verde, Treu & Riess, 2019). Οι τοπικές μετρήσεις του  $H_0$ , βασισμένες σε αποστάσεις από υπερκαινοφανείς Τύπου Ia και από μεταβλητούς αστέρες Κηφείδες (Cepheids) που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα κεριά, οδηγούν σε τιμές σημαντικά υψηλότερες από αυτές που προκύπτουν έμμεσα από την CMB στο πλαίσιο του  $\Lambda$ CDM. Η συστηματική αυτή απόκλιση, η οποία έχει πλέον υπερβεί το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας των  $5\sigma$ , ενδέχεται να υποδεικνύει είτε αδιευκρίνιστα συστηματικά σφάλματα είτε την ανάγκη τροποποίησης ή επέκτασης της ίδιας της θεωρίας.

Προβλήματα εμφανίζονται επίσης σε μικρές κλίμακες, όπου οι προβλέψεις της τυπικής ψυχρής σκοτεινής ύλης δεν συμφωνούν πλήρως με τις παρατηρήσεις. Η ύπαρξη λιγότερων δορυφόρων γαλαξιών γύρω από τον Γαλαξία σε σχέση με αυτούς που προβλέπουν οι προσομοιώσεις (το λεγόμενο missing satellites problem), η διαφορά μεταξύ των αιχμηρών (cuspy) πυκνών πυρήνων που προβλέπει η θεωρία και των πιο επίπεδων (cored) που παρατηρούνται σε νάνους γαλαξίες, καθώς και η υπερβολική συγκέντρωση ύλης σε προσομοιώσεις (too-big-to-fail problem), συνιστούν ενδείξεις ότι η προσέγγιση της CDM ίσως απαιτεί τροποποίηση ή εμπλουτισμό, για παράδειγμα μέσω αυτοαλληλεπιδρώσας σκοτεινής ύλης ή θερμότερων σκοτεινών σωματιδίων.

Συμπερασματικά, το  $\Lambda$ CDM παραμένει το πιο επιτυχημένο και συνεκτικό Κοσμολογικό Πρότυπο που διαθέτουμε, καθώς περιγράφει με υψηλή ακρίβεια το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρησιακών δεδομένων. Ωστόσο, οι ενδογενείς θεωρητικές αδυναμίες και οι σύγχρονες εντάσεις στις παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι, παρότι αποτελεί μια εξαιρετικά αποτελεσματική φαινομενολογική θεωρία, πιθανότατα δεν αντιπροσωπεύει την τελική και ολοκληρωμένη περιγραφή της κοσμικής πραγματικότητας. Η περαιτέρω πρόοδος στην παρατηρησιακή κοσμολογία και στη θεμελιώδη φυσική θα κρίνει αν το  $\Lambda$ CDM θα συνεχίσει να αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα της κοσμολογίας ή αν θα δώσει τη θέση του σε μια πιο θεμελιωμένη θεωρία που θα ενσωματώνει τη σκοτεινή ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια σε ένα ενιαίο θεωρητικό πλαίσιο.

## **5.6 Εναλλακτικές προσεγγίσεις**

Παρά την εντυπωσιακή επιτυχία του προτύπου  $\Lambda$ CDM στην ερμηνεία ενός μεγάλου εύρους κοσμολογικών παρατηρήσεων, έχουν αναπτυχθεί πλήθος εναλλακτικών θεωρητικών πλαισίων που επιχειρούν είτε να αναδιατυπώσουν τον ρόλο της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας είτε να τις αντικαταστήσουν πλήρως. Ακολουθούν ορισμένες από τις πιο σημαντικές και ευρέως συζητημένες θεωρίες που έχουν προταθεί ως εναλλακτικές στο Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο.

### **5.6.1 Τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας**

Η βαρυτική αλληλεπίδραση αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης και περιγράφεται με εξαιρετική επιτυχία από τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΘΣ) του Einstein. Παρά την εντυπωσιακή της ακρίβεια σε αστροφυσικές και ηλιακές κλίμακες, τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί ενδείξεις και θεωρητικά κίνητρα για την αναθεώρηση ή επέκταση της θεωρίας του Einstein. Οι προτεινόμενες

επεκτάσεις ονομάζονται τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας και στοχεύουν, μεταξύ άλλων, να εξηγήσουν:

- Τη σκοτεινή ενέργεια και την επιταχυνόμενη διαστολή του σύμπαντος
- Τη σκοτεινή ύλη και τις ανωμαλίες στη δυναμική των γαλαξιών
- Την αναζήτηση μιας συνεπούς κβαντικής θεωρίας βαρύτητας
- Ζητήματα σταθερότητας και πληρότητας των κοσμολογικών προτύπων

Μία γνωστή προσέγγιση στη γαλαξιακή δυναμική είναι η Modified Newtonian Dynamics (MOND), η οποία όμως δεν αποτελεί τροποποίηση της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, αλλά τροποποίηση της κλασικής Νευτώνειας δυναμικής σε πολύ χαμηλές επιταχύνσεις.

Η τροποποιημένη θεωρία βαρύτητας (MOND) προτάθηκε από τον Milgrom (Milgrom M., 1983) ως εναλλακτική θεώρηση απέναντι στο καθιερωμένο πρότυπο της σκοτεινής ύλης. Η MOND εισάγει την υπόθεση ότι για επιταχύνσεις πολύ μικρότερες από μια χαρακτηριστική κλίμακα  $a_0$ , οι κλασικοί νόμοι της Νευτώνειας δυναμικής παύουν να ισχύουν στη συμβατική τους μορφή και τροποποιούνται σύμφωνα με μια μη γραμμική δυναμική εξάρτηση της δύναμης από την επιτάχυνση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αναπαραγωγή των επίπεδων καμπυλών περιστροφής των γαλαξιών χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μη βαρυονικής σκοτεινής ύλης, θέτοντας τη MOND ως μια ενδογενή τροποποίηση της βαρύτητας ή/και της αδρανειακής απόκρισης σε χαμηλές επιταχύνσεις.

Ο Bekenstein (Bekenstein, 2004) προκειμένου να διατυπώσει μια πλήρως σχετικιστική εκδοχή της MOND, ανέπτυξε τη θεωρία TeVeS (Tensor–Vector–Scalar theory). Η TeVeS αποτελεί μια δυναμική και γεωμετρικά συνεπή επέκταση της MOND, η οποία μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα πλαίσιο συμβατό με τη Γενική Σχετικότητα. Για να επιτύχει αυτό, η θεωρία εισάγει τρία διαφορετικά πεδία:

- ένα τανυστικό πεδίο, που καθορίζει τη γεωμετρία του χωροχρόνου.
- ένα διανυσματικό πεδίο,
- και ένα βαθμωτό πεδίο.

Ο συνδυασμός αυτών των πεδίων επιτρέπει στη TeVeS να αναπαράγει τη χαρακτηριστική συμπεριφορά της MOND στο ασθενές βαρυτικό πεδίο (όπως σε γαλαξιακές κλίμακες), ενώ ταυτόχρονα προσπαθεί να παραμείνει συμβατή με τις απαιτήσεις μιας σχετικιστικής περιγραφής της κοσμολογίας.

Κεντρικό πλεονέκτημα τόσο της θεωρίας MOND όσο και της TeVeS αποτελεί η ικανότητά τους να αναπαράγουν τις καμπύλες περιστροφής γαλαξιών και άλλα φαινομενολογικά χαρακτηριστικά της γαλαξιακής κλίμακας χωρίς την υπόθεση ύπαρξης σκοτεινής ύλης. Ωστόσο, οι θεωρίες αυτές αντιμετωπίζουν σημαντικές

προκλήσεις στη μελέτη δομών μεγάλης κλίμακας και στην κοσμολογία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν δυσκολίες στο να εξηγήσουν την ανάπτυξη της δομής του Σύμπαντος, την παρατηρούμενη ισχύ των διακυμάνσεων της ακτινοβολίας υποβάθρου μικροκυμάτων (CMB), καθώς και τα χαρακτηριστικά του φαινομένου των βαρυτικών φακών, όπου οι παρατηρήσεις συνήθως απαιτούν ποσότητες μάζας που υπερβαίνουν το βαρυονικό περιεχόμενο, ακόμη και σε πλαίσιο MOND/TeVeS. Ως αποτέλεσμα, παρότι οι θεωρίες αυτές επιτυγχάνουν εντυπωσιακή περιγραφή σε γαλαξιακή κλίμακα, παραμένουν υπό έντονη διερεύνηση και συζήτηση όσον αφορά τη συμβατότητά τους με το σύνολο των κοσμολογικών δεδομένων.

### 5.6.2 Θεωρίες βαρύτητας $f(R)$

Οι θεωρίες βαρύτητας  $f(R)$  αποτελούν μια σημαντική κατηγορία τροποποιημένων θεωριών βαρύτητας, οι οποίες επεκτείνουν τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΘΣ) (Sotiriou & Faraoni, 2010). Στη ΓΘΣ, η βαρύτητα καθορίζεται από την καμπυλότητα του χωροχρόνου με έναν απλό γραμμικό τρόπο. Οι θεωρίες  $f(R)$  γενικεύουν αυτή την προσέγγιση, επιτρέποντας στο βαρυτικό δυναμικό να εξαρτάται από πιο σύνθετες συναρτήσεις της καμπυλότητας. Αυτό προσφέρει περισσότερη ευελιξία στη μοντελοποίηση του Σύμπαντος και της διαστολής του.

Η κλασική περίπτωση της ΓΘΣ προκύπτει ως ειδική περίπτωση των θεωριών  $f(R)$ , όταν η συνάρτηση που καθορίζει τη βαρύτητα είναι γραμμική και περιλαμβάνει μόνο την καμπυλότητα και μια κοσμολογική σταθερά. Οι θεωρίες  $f(R)$ , αντίθετα, επιτρέπουν την παρουσία όρων υψηλότερης τάξης στην καμπυλότητα, οι οποίοι μπορούν να επηρεάζουν την κοσμολογική εξέλιξη, ακόμα και χωρίς την ύπαρξη σκοτεινής ύλης ή σκοτεινής ενέργειας.

Μια ενδιαφέρουσα συνέπεια των θεωριών  $f(R)$  είναι ότι εισάγουν νέους βαθμούς ελευθερίας στο βαρυτικό πεδίο. Αυτοί μπορούν να εμφανιστούν ως πρόσθετα βαθμωτά πεδία, που επηρεάζουν τη δυναμική του χωροχρόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πλούσια φαινομενολογία, ειδικά στην κλίμακα των γαλαξιών και του Σύμπαντος στο σύνολό του.

Ένα από τα βασικά κίνητρα για τη μελέτη των θεωριών  $f(R)$  είναι η δυνατότητα εξήγησης της επιταχυνόμενης διαστολής του Σύμπαντος χωρίς να απαιτείται η έννοια της σκοτεινής ενέργειας. Παράλληλα, με κατάλληλες επιλογές της μορφής της συνάρτησης  $f(R)$ , είναι δυνατόν να συμφωνούν με παρατηρήσεις σε τοπικές δοκιμές βαρύτητας, όπως αυτές στο Ηλιακό Σύστημα, μέσω μηχανισμών που “αποκρύπτουν” τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας σε πυκνά περιβάλλοντα.

Οι θεωρίες βαρύτητας τύπου  $f(R)$  βρίσκουν εφαρμογή όχι μόνο στην κοσμολογία, αλλά και στη μελέτη της σταθερότητας κοσμολογικών λύσεων, στην ανάλυση διαταραχών στο Σύμπαν και στην περιγραφή της μεγάλης κλίμακας δομής. Παρά τις

δυνατότητές τους, αντιμετωπίζουν σημαντικές θεωρητικές προκλήσεις, οι οποίες περιορίζουν τις επιτρεπτές μορφές της συνάρτησης  $f(R)$ .

Μία από τις πιο κρίσιμες δυσκολίες είναι η αποφυγή των λεγόμενων «φαντασμάτων» (ghosts). Με τον όρο αυτό εννοούμε μη φυσικούς βαθμούς ελευθερίας που εμφανίζονται όταν η θεωρία έχει «λανθασμένο» πρόσημο σε ορισμένους όρους της δράσης, με αποτέλεσμα να επιτρέπει αρνητική ή απεριόριστη ενέργεια. Αυτό οδηγεί σε σοβαρές αστάθειες, καθώς το κενό της θεωρίας μπορεί να καταρρεύσει ή να παράγει ανεξέλεγκτες διακυμάνσεις.

Συνολικά, οι θεωρίες βαρύτητας  $f(R)$  προσφέρουν ένα ευέλικτο και πλούσιο πλαίσιο για την κατανόηση φαινομένων που δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως από την καθιερωμένη κοσμολογική θεωρία, και παραμένουν ενεργό αντικείμενο θεωρητικής και παρατηρησιακής έρευνας.

### **Σύγκριση με τη θεωρία MOND**

Η θεωρία MOND προτάθηκε για να εξηγήσει την παρατήρηση των επίπεδων καμπυλών περιστροφής των γαλαξιών χωρίς να απαιτείται σκοτεινή ύλη. Τροποποιεί τη δυναμική των σωμάτων σε πολύ χαμηλές επιταχύνσεις, κυρίως σε γαλαξιακή κλίμακα. Αντιθέτως, οι θεωρίες  $f(R)$  αποτελούν μια γενική επέκταση της Γενικής Σχετικότητας που τροποποιεί άμεσα τις εξισώσεις της βαρύτητας. Μπορούν να επηρεάζουν τόσο την κοσμολογία όσο και τοπικά βαρυτικά συστήματα, εξηγώντας την επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος χωρίς σκοτεινή ενέργεια.

### **5.6.3 Άλλες προσεγγίσεις**

Η κοσμολογική εικόνα μπορεί να επεκταθεί πέρα από το  $\Lambda$ CDM συνδυάζοντας ένα δυναμικό σενάριο σκοτεινής ενέργειας με μη ψυχρή και αλληλεπιδρώσα σκοτεινή ύλη. Συγκεκριμένα, οι θεωρίες δυναμικής σκοτεινής ενέργειας, όπως προαναφέραμε, εισάγουν ένα βαθμωτό πεδίο του οποίου η εξίσωση κατάστασης  $w(z)$  εξελίσσεται χρονικά, παρέχοντας ευελιξία στην περιγραφή της επιταχυνόμενης διαστολής και επιτρέποντας προσαρμογές που ενδέχεται να σχετίζονται με εντάσεις όπως η Hubble tension. Παράλληλα, η σκοτεινή ύλη μπορεί να θεωρηθεί θερμή (WDM), με μικρή αλλά μη αμελητέα θερμική ταχύτητα που καταστέλλει σχηματισμό μικρών δομών και μετριάξει γνωστά προβλήματα του CDM σε γαλαξιακές κλίμακες. Επιπλέον, αν τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης είναι αλληλεπιδρώντα (SIDM), οι αυτοσυγκρούσεις τους μπορούν να δημιουργήσουν ρηχότερους πυρήνες στις γαλαξιακές άλω και να αναπαράγουν πιο ρεαλιστικές κατανομές μάζας, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συμβατότητα με τη δομή μεγάλης κλίμακας. Ο συνδυασμός αυτών των ιδεών — δυναμική σκοτεινή ενέργεια, θερμή συνιστώσα σκοτεινής ύλης και ισχυρότερες εσωτερικές αλληλεπιδράσεις— προσφέρει μια ευρύτερη, πλουσιότερη θεωρητική βάση που επιτρέπει πιο ακριβή προσαρμογή σε φαινόμενα που το  $\Lambda$ CDM

δυσκολεύεται να περιγράψει πλήρως, χωρίς να θυσιάζει την επιτυχία του σε κοσμικές κλίμακες.

### 5.7 Μελλοντικές προοπτικές και ανοιχτά προβλήματα

Παρά τη συνολική επιτυχία του προτύπου  $\Lambda$ CDM στην περιγραφή της ιστορικής εξέλιξης και της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος, η φύση της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας παραμένει ένα από τα σημαντικότερα ανοιχτά ερωτήματα της σύγχρονης φυσικής. Η επόμενη περίοδος στην παρατηρησιακή και θεωρητική κοσμολογία αναμένεται να καθοριστεί από νέες υψηλής ακρίβειας αποστολές —όπως το διαστημικό τηλεσκόπιο *Euclid*, το *Nancy Grace Roman Space Telescope* και το *Vera C. Rubin Observatory*— οι οποίες θα χαρτογραφήσουν με πρωτοφανή λεπτομέρεια τη δομή μεγάλης κλίμακας, θα μετρήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις βαρυονικές ταλαντώσεις ακουστικού τύπου και θα εξετάσουν τη δυναμική της επιταχυνόμενης διαστολής. Τα δεδομένα αυτά αναμένεται να προσφέρουν κρίσιμες δοκιμές για την εγκυρότητα του  $\Lambda$ CDM, να αξιολογήσουν την ενδεχόμενη χρονική εξέλιξη της σκοτεινής ενέργειας και να θέσουν αυστηρότερα όρια στις ιδιότητες της σκοτεινής ύλης.

Παράλληλα, η διαφοροποίηση της σταθεράς Hubble —η στατιστικά σημαντική απόκλιση μεταξύ των τοπικών και των κοσμολογικών εκτιμήσεων της σταθεράς Hubble— παραμένει ένα από τα πιο επίμονα και ενδεικτικά προβλήματα που ίσως αποκαλύπτουν την ανάγκη για επέκταση του Καθιερωμένου Προτύπου. Εναλλακτικές θεωρήσεις, όπως οι τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας (MOND, TeVeS), οι επεκτάσεις της Γενικής Σχετικότητας μέσω θεωριών  $f(R)$ , καθώς και τα δυναμικά μοντέλα σκοτεινής ενέργειας, ενδέχεται να προσφέρουν λύσεις είτε μέσω αλλαγών στη βαρυτική δυναμική είτε μέσω νέων βαθμών ελευθερίας. Ωστόσο, καμία από αυτές τις προσεγγίσεις δεν έχει καταφέρει μέχρι σήμερα να αναπαράγει με την ίδια επιτυχία το σύνολο των παρατηρησιακών δεδομένων, γεγονός που υποδηλώνει ότι μια ενιαία θεωρητική περιγραφή παραμένει ακόμη ανέφικτη.

Στον τομέα της σκοτεινής ύλης, οι προσπάθειες για την άμεση ανίχνευση WIMPs και άλλων υποψηφίων σωματιδίων συνεχίζονται με ανιχνευτές επόμενης γενιάς, ενώ ενδιαφέρον προσδίδουν και οι θεωρίες θερμής ή αυτοαλληλεπιδρώσας σκοτεινής ύλης που επιχειρούν να επιλύσουν προβλήματα μικρής κλίμακας, όπως το πρόβλημα των χαμένων δορυφόρων και τη μη συμβατότητα των προβλεπόμενων πυκνών πυρήνων με τις παρατηρήσεις. Παράλληλα, τα axion – like σωματίδια και οι fuzzy dark matter θεωρίες αποτελούν ανερχόμενους τομείς έρευνας που ενδέχεται να προσφέρουν μια διαφορετική εικόνα για την κατανομή της μάζας σε γαλαξιακές και υπογαλαξιακές κλίμακες.

Τέλος, η σύνδεση της κοσμολογίας με τη φυσική υψηλών ενεργειών αποτελεί ένα ακόμη κρίσιμο μέτωπο, καθώς η ύπαρξη ενός πληθωριστικού πεδίου, η προέλευση

της κοσμολογικής σταθεράς και η ενοποίηση των αλληλεπιδράσεων σε ένα κβαντικό σχήμα βαρύτητας παραμένουν ανοιχτά θεωρητικά ζητήματα. Η πρόοδος στην κατανόηση της πρώιμης κοσμικής ιστορίας, μέσω μελλοντικών μετρήσεων της πόλωσης της CMB και πιθανής ανίχνευσης πρωταρχικών βαρυτικών κυμάτων, θα μπορούσε να προσφέρει νέες ενδείξεις για τον μηχανισμό του πληθωρισμού και τις θεμελιώδεις φυσικές διεργασίες που διαμόρφωσαν το Σύμπαν.

Συνολικά, παρά τη θεμελιακή σημασία και την εντυπωσιακή προβλεπτική ικανότητα του  $\Lambda$ CDM, το πλαίσιο αυτό δεν αποτελεί την τελική περιγραφή της κοσμικής πραγματικότητας. Οι μελλοντικές παρατηρήσεις και οι θεωρητικές εξελίξεις θα κρίνουν αν το Καθιερωμένο Πρότυπο θα παραμείνει το κυρίαρχο κοσμολογικό πλαίσιο ή αν θα αντικατασταθεί από μια βαθύτερη, περισσότερο θεμελιωμένη θεωρία που θα ενοποιεί τη σκοτεινή ύλη, τη σκοτεινή ενέργεια και τη βαρύτητα σε μια συνεπή φυσική εικόνα του Σύμπαντος.

## 6. Συμπεράσματα

### 6.1 Σύνοψη παρατηρησιακών ενδείξεων

Η σύγχρονη κοσμολογία στηρίζεται σε ένα ευρύ φάσμα παρατηρησιακών δεδομένων που συλλέχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες μέσω πολυάριθμων ανεξάρτητων μεθόδων. Τα δεδομένα αυτά συγκλίνουν εντυπωσιακά προς μια κοινή εικόνα: το Σύμπαν αποτελείται κυρίως από συστατικά που δεν αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά και ως εκ τούτου δεν είναι άμεσα ορατά με τα συμβατικά τηλεσκόπια. Η πρώτη μεγάλη κατηγορία είναι η **σκοτεινή ύλη**, η οποία καθίσταται εμφανής μέσα από τη δυναμική των γαλαξιών και των σμηνών γαλαξιών. Οι καμπύλες περιστροφής των σπειροειδών γαλαξιών, που παρουσιάζουν επίπεδη συμπεριφορά σε μεγάλες ακτίνες αντί για τη μείωση που προβλέπει η βαρυτική δυναμική της ορατής ύλης, παρέχουν μία από τις πιο ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη της. Αντίστοιχα, φαινόμενα βαρυτικού φακού σε σμήνη γαλαξιών καταδεικνύουν σημαντικές ποσότητες μάζας που δεν αντιστοιχεί στη φωτεινή τους κατανομή. Επιπλέον, η μορφολογία και η δυναμική συστημάτων όπως το σμήνος “Bullet” δείχνουν ότι η σκοτεινή ύλη όχι μόνο υπάρχει, αλλά και συμπεριφέρεται ως ασθενώς αλληλεπιδρών ρευστό.

Η δεύτερη βασική συνιστώσα είναι η **σκοτεινή ενέργεια**, η οποία γίνεται αντιληπτή κυρίως μέσω της μελέτης της κοσμικής επιτάχυνσης. Οι παρατηρήσεις υπερκαινοφανών Τύπου Ia αποτέλεσαν το πρώτο σαφές αποδεικτικό στοιχείο ότι η διαστολή του Σύμπαντος δεν επιβραδύνεται, αλλά επιταχύνεται. Η κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB) παρέχει στοιχεία ότι το Σύμπαν είναι σχεδόν επίπεδο, ενώ η συνολική του ενεργειακή πυκνότητα υποδηλώνει την ύπαρξη μιας ομοιογενώς κατανεμημένης συνιστώσας με αρνητική πίεση. Οι ταλαντώσεις βαρυονικής ύλης (BAO) και οι μεγάλης κλίμακας δομές λειτουργούν ως «κοσμικοί χάρακες» που συμφωνούν με την ύπαρξη ενός τέτοιου επιταχυντικού παράγοντα.

Η σύγκλιση των δεδομένων από αυτές τις διαφορετικές, ανεξάρτητες μεθόδους, συνιστά ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα της σύγχρονης επιστήμης και στηρίζει το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο  $\Lambda$ CDM, το οποίο αποτελεί σήμερα τον καλύτερο περιγραφικό μηχανισμό των κοσμικών παρατηρήσεων. Παρά τις αβεβαιότητες και τα ανοικτά ερωτήματα, η συνολική εικόνα είναι συνεκτική: το Σύμπαν κυριαρχείται από μη φωτεινές μορφές ενέργειας και ύλης, οι οποίες διαμορφώνουν τόσο τη γεωμετρία όσο και τη δυναμική του.

### 6.2 Συμβολή της Σκοτεινής Ύλης και της Σκοτεινής Ενέργειας στη δυναμική του Σύμπαντος

Η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της κοσμικής εξέλιξης, παρόλο που οι φυσικές τους ιδιότητες δεν έχουν

πλήρως αποσαφηνιστεί. Η σκοτεινή ύλη είναι απαραίτητη για τη δημιουργία και διατήρηση της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος. Χωρίς αυτήν, οι μικρές αρχικές ανισotropίες της πυκνότητας στο πρώιμο Σύμπαν δεν θα είχαν επαρκή βαρυτική δύναμη ώστε να καταρρεύσουν σε γαλαξίες, άλω και σμήνη. Η ψυχρή σκοτεινή ύλη, συγκεκριμένα, παρέχει το απαραίτητο βαρυτικό δυναμικό μέσα στο οποίο η ορατή ύλη μπορεί να παγιδευτεί. Η δυναμική των γαλαξιών, η σταθερότητα των δίσκων τους, καθώς και η ιεραρχική διαδικασία σχηματισμού δομών στηρίζονται στην ύπαρξη αυτής της αόρατης μάζας.

Η σκοτεινή ενέργεια, από την άλλη, λειτουργεί ως ένας αντίρροπος παράγοντας στη βαρύτητα σε κοσμολογικές κλίμακες. Με χαρακτηριστικό αρνητικό λόγο πίεσης προς πυκνότητα, συμβάλλει σε μία καθαρά απωστική επίδραση στη γεωμετρική εξέλιξη του Σύμπαντος. Μετά από ένα ορισμένο κοσμικό χρόνο, η επίδρασή της άρχισε να υπερισχύει έναντι της βαρυτικής έλξης της ύλης, οδηγώντας στην παρατηρούμενη επιταχυνόμενη διαστολή. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες όχι μόνο για την παρούσα δυναμική, αλλά και για την παγκόσμια εξέλιξη του κοσμικού ιστού: η ανάπτυξη νέων δομών επιβραδύνεται και τελικά παγώνει, καθώς η απομάκρυνση των περιοχών του χώρου με αυξανόμενη ταχύτητα περιορίζει τη βαρυτική σύγκλιση της ύλης.

Συνολικά, η σκοτεινή ύλη κατευθύνει τη δομή, ενώ η σκοτεινή ενέργεια κατευθύνει τη μοίρα του Σύμπαντος. Η δυναμική τους αποτελεί το θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίζεται η ολική εξέλιξη του κοσμικού ιστού, καθιστώντας αυτές τις συστατικές απαραίτητες για κάθε σύγχρονη περιγραφή της κοσμολογικής ιστορίας.

### 6.3 Ο ρόλος τους στον καθορισμό της γεωμετρίας του Σύμπαντος

Η γεωμετρία του Σύμπαντος συνδέεται άμεσα με την κατανομή και τη φύση της ολικής ενεργειακής πυκνότητας, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις Friedmann. Η συμβολή της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας είναι θεμελιώδης για τον καθορισμό του μεγέθους της χωρικής καμπυλότητας. Στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Προτύπου  $\Lambda$ CDM, η συνδυαστική επίδραση σκοτεινής ύλης ( $\approx 27\%$ ) και σκοτεινής ενέργειας ( $\approx 68\%$ ) οδηγεί σε μια γεωμετρία εξαιρετικά κοντά στην επίπεδη Ευκλείδεια. Στο ίδιο πλαίσιο, η σκοτεινή ενέργεια περιγράφεται ως κοσμολογική σταθερά ( $\Lambda$ ), η οποία αποτελεί έναν όρο στις εξισώσεις του Αϊνστάιν που δεν εξαρτάται από την κατανομή της ύλης και έχει ομοιογενή, σταθερή ενεργειακή πυκνότητα σε όλο τον χώρο.

Τα δεδομένα της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας έρχονται να ενισχύσουν το γεγονός ότι το Σύμπαν είναι σχεδόν επίπεδο. Η γεωμετρία αυτή δεν θα μπορούσε να εξηγηθεί χωρίς την παρουσία μιας επαρκούς ποσότητας σκοτεινής ύλης, η οποία συμπληρώνει τη συνεισφορά της ορατής ύλης σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που τα βαρυονικά συστατικά μόνα τους θα μπορούσαν να επιτύχουν. Παράλληλα, η

σκοτεινή ενέργεια καθορίζει την τρέχουσα και μελλοντική γεωμετρία, καθώς για θετική κοσμολογική σταθερά το Σύμπαν τείνει ασυμπτωτικά σε μια κατάσταση de Sitter, όπου η επιταχυνόμενη διαστολή διαμορφώνει το γεωμετρικό υπόβαθρο.

Ο συνδυασμός της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας όχι μόνο εξασφαλίζει τη σημερινή σχεδόν επίπεδη γεωμετρία, αλλά καθορίζει και την κοσμική μοίρα: σε ένα Σύμπαν όπου η σκοτεινή ενέργεια παραμένει σταθερή ή αυξάνει, η διαστολή θα συνεχιστεί επ' άπειρον, οδηγώντας σε μια ψυχρή και αραιή τελική κατάσταση. Η γεωμετρία και η δυναμική, επομένως, συνδέονται άρρηκτα με τις δύο αυτές συνιστώσες, καθιστώντας απαραίτητη την κατανόησή τους για τη συνολική εικόνα της κοσμικής εξέλιξης.

#### 6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρά την εντυπωσιακή επιτυχία του προτύπου  $\Lambda$ CDM στην περιγραφή της μεγάλης κλίμακας δομής και εξέλιξης του Σύμπαντος, εξακολουθούν να παραμένουν κρίσιμα ανοιχτά ζητήματα που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Πρώτον, η φύση της σκοτεινής ύλης παραμένει άγνωστη, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αναζήτηση υποψήφιων σωματιδίων όπως WIMPs, αξιόνια και αδρανή νετρίνα, ενώ παράλληλα εξελίσσονται πειράματα άμεσης και έμμεσης ανίχνευσης. Ιδιαίτερη σημασία έχουν επίσης οι μελέτες σε μικρές κοσμολογικές κλίμακες, οι οποίες μπορούν να αποκαλύψουν αποκλίσεις από τις προβλέψεις του  $\Lambda$ CDM.

Δεύτερον, η προέλευση της σκοτεινής ενέργειας παραμένει ένα από τα μεγαλύτερα θεωρητικά προβλήματα της σύγχρονης κοσμολογίας. Η σταθερά  $\Lambda$  εξετάζεται σε σχέση με δυναμικά πεδία, όπως τα μοντέλα quintessence, ενώ οι ολοένα ακριβέστερες μετρήσεις της εξίσωσης κατάστασης  $w$  επιδιώκουν να εντοπίσουν ενδεχόμενες αποκλίσεις από την τιμή  $w = -1$ . Παράλληλα, τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας διερευνώνται ως εναλλακτική εξήγηση.

Τρίτον, η απόκλιση στις μετρήσεις της σταθεράς Hubble ( $H_0$  tension) συνιστά μια από τις σημαντικότερες ενδείξεις πιθανής νέας φυσικής, καθώς οι ανεξάρτητες μέθοδοι υπολογισμού της τιμής της παρουσιάζουν επίμονη ασυμφωνία. Νέες παρατηρησιακές τεχνικές, όπως η χρήση βαρυτικών φακών και βαρυτικών κυμάτων ως “standard sirens”, ενδέχεται να ρίξουν φως στο πρόβλημα.

Η πρόοδος της παρατηρησιακής κοσμολογίας συνδέεται στενά με την ανάπτυξη νέων υψηλής ακρίβειας εγκαταστάσεων. Διαστημικά τηλεσκόπια όπως το Euclid και το James Webb Space Telescope (JWST) θα επιτρέψουν λεπτομερή χαρτογράφηση της μεγάλης κλίμακας δομής, ενώ επίγειες εγκαταστάσεις όπως το Vera Rubin Observatory θα παρέχουν παρατηρήσεις μεγάλης περιοχής και βάθους. Παράλληλα, η παρατήρηση βαρυτικών κυμάτων, μέσω μελλοντικών ανιχνευτών, θα προσφέρει νέα παράθυρα στην κοσμολογία. Ορισμένοι από αυτούς είναι οι εξής:

- **LISA**: διαστημικός ανιχνευτής που θα παρακολουθεί χαμηλής συχνότητας βαρυτικά κύματα από συγχωνεύσεις υπερμεγέθων μελανών οπών και άλλα κοσμικά φαινόμενα. Αναμένεται να εκτοξευθεί περίπου το 2034 ([ESA – LISA](#); [Auclair et al. 2022](#)).
- **Einstein Telescope**: υπόγειος επίγειος ανιχνευτής στην Ευρώπη, με σχήμα τριγώνου πλευράς 10 km, ο οποίος θα ανιχνεύει βαρυτικά κύματα από συγχωνεύσεις μελανών οπών και αστερών νετρονίων με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και σε χαμηλότερες συχνότητες από τα υπάρχοντα interferometers. Αναμένεται να λειτουργήσει το 2035 ([Grado, 2023](#))
- **Cosmic Explorer**: αμερικανικός επίγειος ανιχνευτής 3ης γενιάς, με μήκος interferometer έως 40 km, που θα εντοπίζει γεγονότα σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Αναμένεται να λειτουργήσει μέσα στην επόμενη δεκαετία. ([Hall, 2022](#); [wikipedia](#))
- **Square Kilometre Array**: θα ανιχνεύσει υπερχαμηλής συχνότητας βαρυτικά κύματα, προσφέροντας νέα εργαλεία για τη μέτρηση της σταθεράς Hubble και την κατανόηση της μεγάλης κλίμακας δομής του Σύμπαντος. Αναμένεται να λειτουργήσει στις αρχές της επόμενης δεκαετίας. ([Weltman et al. 2018](#))

Η σύγχρονη εικόνα του Σύμπαντος αναδεικνύει έναν κόσμο όπου η ορατή ύλη αντιστοιχεί μόλις στο 5% της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας, ενώ το υπόλοιπο 95% αποτελείται από σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια, παραμένοντας ουσιαστικά αινιγματικό. Παρά την αβεβαιότητα σχετικά με τη φυσική τους προέλευση, οι δύο αυτές συνιστώσες είναι αναγκαίες για την κατανόηση της κοσμικής δομής, της γεωμετρίας και της εξέλιξης του Σύμπαντος. Η μελλοντική έρευνα υπόσχεται σημαντικές ανακαλύψεις, που αναμένεται να μεταμορφώσουν την παρατηρησιακή κοσμολογία, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για τη φύση της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας, για την ακριβή γεωμετρία του Σύμπαντος και για τη δυναμική της κοσμικής εξέλιξης. Η απάντηση σε αυτά τα θεμελιώδη ερωτήματα θα καθορίσει αν το  $\Lambda$ CDM αποτελεί μια προσωρινή προσέγγιση ή ένα πλήρες και θεμελιώδες πρότυπο για τη δομή και την ιστορία του Σύμπαντος.

## Εξαγωγή πρώτης εξίσωσης Friedmann

Με αφετηρία την Κοσμολογική Αρχή, δηλαδή ότι το Σύμπαν είναι ομογενές και ισότροπο, μπορούμε να εξάγουμε τη διαφορική εξίσωση της κοσμολογικής εξέλιξης, γνωστή ως πρώτη εξίσωση Friedmann που περιγράφει την ταχύτητα διαστολής/συστολής του Σύμπαντος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με αυστηρότητα από τις εξισώσεις πεδίου της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, είτε χρησιμοποιώντας τη Νευτώνεια προσέγγιση.

### 1. Στο πλαίσιο της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας

Ξεκινάμε με τις εξισώσεις πεδίου του Einstein υποθέτοντας την ύπαρξη της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ :

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (A.1.1)$$

Η πρώτη εξίσωση Friedmann θα προκύψει από τη μηδενική συνιστώσα της παραπάνω εξίσωσης.

#### Ο μετρικός τανυστής $g_{\mu\nu}$

Με βάση την Κοσμολογική Αρχή ο μετρικός τανυστής  $g_{\mu\nu}$  βασίζεται στη μετρική FLRW και σύμφωνα με τη σύμβαση  $(-, +, +, +)$ , όπως είδαμε στο κεφαλαίο 2, δίνεται από τη σχέση:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\left(-1, \frac{a^2(t)}{1-kr^2}, a^2(t)r^2, a^2(t)r^2\sin^2\theta\right) \quad (A.1.2)$$

όπου το στοιχείο του παραπάνω τανυστή που μας ενδιαφέρει είναι η χρονική του συνιστώσα,  $g_{00}$ , που ισούται με:

$$g_{00} = -1 \quad (A.1.3)$$

#### Ο τανυστής Einstein $G_{\mu\nu}$

Ο τανυστής Einstein ορίζεται ως:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} \quad (A.1.4)$$

όπου  $R_{\mu\nu}$  ο τανυστής Ricci με γενικό ορισμό:

$$R_{\mu\nu} = \partial_\alpha \Gamma_{\mu\nu}^\alpha - \partial_\nu \Gamma_{\mu\alpha}^\alpha + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \Gamma_{\alpha\beta}^\beta - \Gamma_{\mu\beta}^\alpha \Gamma_{\nu\alpha}^\beta \quad (A.1.5)$$

όπου  $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$  είναι τα σύμβολα Christoffel<sup>43</sup> ή αλλιώς οι συμβολισμοί σύνδεσης (connection coefficients), τα οποία εξαρτώνται από τον μετρικό τανυστή  $g_{\mu\nu}$  και τις μερικές του παραγώγους:

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} (\partial_{\mu} g_{\nu\beta} + \partial_{\nu} g_{\mu\beta} - \partial_{\beta} g_{\mu\nu}) \quad (A.1.6)$$

για  $\mu = \nu = 0$  και μετά από πράξεις προκύπτει η  $R_{00}$ , χρονική συνιστώσα του τανυστή Ricci (Carroll, 2004):

$$R_{00} = -3 \frac{\ddot{a}}{a} \quad (A.1.7)$$

Η βαθμωτή καμπυλότητα  $R$  που εμφανίζεται στον τανυστή Einstein, ορίζεται ως:

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \quad (A.1.8)$$

και ισούται με (Carroll, 2004):

$$R = 6 \left( \frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} \right) \quad (A.1.9)$$

### Ο τανυστής ενέργειας – ορμής $T_{\mu\nu}$

Όπως έχουμε προαναφέρει ο τελεστής ενέργειας – ορμής για ένα ιδανικό ρευστό δίνεται από τη σχέση:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p) u_{\mu} u_{\nu} + p g_{\mu\nu} \quad (A.1.10)$$

με  $u_{\mu} = (1, 0, 0, 0)$  στο σύστημα των συν – κινούμενων συντεταγμένων επομένως η μηδενική του συνιστώσα ισούται με:

$$T_{00} = \rho \quad (A.1.11)$$

Η μηδενική συνιστώσα της εξίσωσης (A. 1.1) είναι:

$$G_{00} + \Lambda g_{00} = 8\pi G T_{00} \quad (A.1.12)$$

όπου αντικαθιστώντας τον τανυστή Einstein με τη σχέση (A.1.4) και θέτοντας  $\mu = \nu = 0$ , έχουμε:

$$R_{00} - \frac{1}{2} R g_{00} + \Lambda g_{00} = 8\pi G T_{00} \quad (A.1.13)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις (A.1.7), (A.1.3) και (A.1.11) παίρνουμε:

<sup>43</sup> Τα σύμβολα Christoffel (Χριστόφελ) είναι αντικείμενα της διαφορικής γεωμετρίας που περιγράφουν πώς «αλλάζουν» τα διανύσματα όταν τα μετακινούμε πάνω σε μια καμπύλη ή σε μια καμπυλωμένη πολλαπλότητα.

$$-3\frac{\ddot{a}}{a} - \frac{1}{2}(-1)6\left(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2}\right) + \Lambda(-1) = 8\pi G\rho \quad (A.1.14)$$

έπειτα από λίγες πράξεις και απαλοιοφές, παίρνουμε:

$$3\frac{\dot{a}^2}{a^2} + 3\frac{k}{a^2} - \Lambda = 8\pi G\rho \quad (A.1.15)$$

μεταφέροντας τη σταθερά  $\Lambda$  και τον όρο της καμπυλότητας στο δεύτερο μέλος της ισότητας και διαιρώντας με 3, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (A.1.16)$$

## 2. Στο πλαίσιο της Νευτώνειας Βαρύτητας

Παρόλο που η Νευτώνεια εξαγωγή είναι προσεγγιστική, δίνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα χωρίς την κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  (Liddle, 2015).

Θεωρούμε έναν παρατηρητή σε ένα ομοιόμορφο διαστελλόμενο μέσο, με πυκνότητα μάζας  $\rho$ . Επειδή το Σύμπαν φαίνεται το ίδιο από οπουδήποτε, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα οποιοδήποτε σημείο να είναι το κέντρο του. Θεωρούμε τώρα, ένα σωματίδιο μάζας  $m$ , το οποίο κάποια χρονική στιγμή  $t$ , βρίσκεται σε απόσταση  $r$  και έχει ταχύτητα  $\dot{r}$ . Λόγω του θεωρήματος του Νεύτωνα, το σωματίδιο αισθάνεται δύναμη μόνο από το υλικό σε μικρότερες ακτίνες. Η συνολική μάζα μέσα στη σφαίρα δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{4\pi r^3}{3}\rho \quad (A.2.1)$$

ασκώντας στο σωματίδιο μάζας  $m$ , δύναμη ίση με:

$$F = \frac{GMm}{r^2} = \frac{4\pi G\rho r m}{3} \quad (A.2.2)$$

Η βαρυτική δυναμική ενέργεια που θα έχει το σωματίδιο μάζας  $m$ , είναι:

$$U = -\frac{GMm}{r} = -\frac{4\pi G\rho r^2 m}{3} \quad (A.2.3)$$

ενώ η κινητική:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 \quad (A.2.4)$$

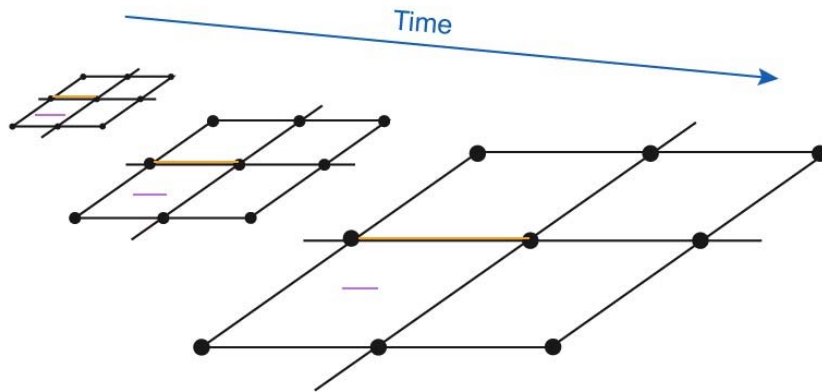
Η εξίσωση που περιγράφει πώς μεταβάλλεται η απόσταση  $r$ , προέρχεται από τη διατήρηση της ενέργειας για το συγκεκριμένο σωματίδιο, δηλαδή:

$$E = U + T \quad (A.2.5)$$

Με αντικατάσταση των  $U$  και  $T$  στην παραπάνω εξίσωση, έχουμε:

$$E = -\frac{4\pi G\rho r^2 m}{3} + \frac{1}{2}m\dot{r}^2 \quad (A.2.6)$$

Η σχέση αυτή μας δίνει την εξέλιξη της απόστασης  $r$  μεταξύ δύο σωματιδίων.



**Εικόνα Α. 2.1:** Καθώς ο χώρος διαστέλλεται με την πάροδο του χρόνου, το πλέγμα των συν – κινούμενων συντεταγμένων (μαύρες γραμμές) τεντώνεται. Οι πορτοκαλί γραμμές έχουν σταθερό μήκος στις συν – κινούμενες συντεταγμένες, αλλά το φυσικό τους μήκος αυξάνεται. Οι μοβ γραμμές δείχνουν ένα σταθερό φυσικό μήκος, το οποίο φαίνεται να μικραίνει σε σύγκριση με το διαστελλόμενο πλέγμα. Credit: NASA/SSU/Aurore Simonnet

Λόγω της διαστολής του Σύμπαντος εισάγουμε την έννοια των συν – κινούμενων συντεταγμένων. Οι συν – κινούμενες (comoving) συντεταγμένες  $\vec{x}$  είναι ένα σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στην κοσμολογία ώστε τα αντικείμενα που ακολουθούν τη διαστολή του Σύμπαντος να διατηρούν σταθερές θέσεις. Παρότι το πραγματικό, φυσικό τους μήκος αλλάζει, οι συν – κινούμενες αποστάσεις μένουν ίδιες, γιατί «κινούνται μαζί» με τη διαστολή του χώρου. Η μετατροπή από συν – κινούμενες σε φυσικές αποστάσεις γίνεται μέσω του παράγοντα κλίμακας  $a(t)$ , ο οποίος περιγράφει πόσο έχει διασταλεί το Σύμπαν σε σχέση με κάποια αρχική στιγμή. Έτσι, η φυσική απόσταση  $\vec{r}$ , προκύπτει ως:

$$\vec{r}(t) = a(t)\vec{x} \quad (A.2.7)$$

δείχνοντας ότι καθώς ο παράγοντας κλίμακας αυξάνεται με τον χρόνο, ο φυσικός χώρος μεγαλώνει ενώ οι συν – κινούμενες αποστάσεις παραμένουν σταθερές.

Μπορούμε λοιπόν, να ξαναγράψουμε τη σχέση (A.2.6) χρησιμοποιώντας τη σχέση (A.2.7) και ανακαλώντας ότι  $\dot{x} = 0$ , εξ ορισμού, καθώς τα αντικείμενα είναι σταθερά στις συν – κινούμενες συντεταγμένες:

$$E = -\frac{4\pi}{3}G\rho a^2 x^2 m + \frac{1}{2}m\dot{a}^2 x^2 \quad (\text{A.2.8})$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με  $2/(ma^2x^2)$  και αναδιατάσσοντας τους όρους παίρνουμε την πρώτη εξίσωση Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} \quad (\text{A.2.9})$$

όπου  $k = -2U/mx^2$  μια σταθερά, (καθώς η συνολική ενέργεια  $U$  διατηρείται και η απόσταση  $x$  είναι αμετάβλητη) αμετάβλητη και στον χώρο και στον χρόνο, με διαστάσεις  $[\mu\eta\kappa\omicron\varsigma]^{-2}$ . Ένα διαστελλόμενο Σύμπαν έχει μία μοναδική τιμή του  $k$ , την οποία διατηρεί καθ'όλη τη διάρκεια της εξέλιξής του και σχετίζεται με τη γεωμετρία του Σύμπαντος.

Η παραπάνω εξίσωση Friedmann μπορεί να γραφεί και στην ακόλουθη μορφή:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (\text{A.2.10})$$

όπου έχει προστεθεί ο όρος της κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ .

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

### Εξαγωγή εξίσωσης ρευστού

Η εξίσωση ρευστού μπορεί να προκύψει μέσω της συνθήκης της διατήρησης του τανυστή της ενέργειας – ορμής, δηλαδή μέσω της σχέσης:

$$\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0 \quad (\text{B.1.1})$$

Βασίζεται στον τανυστή ενέργειας – ορμής:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu} \quad (\text{B.1.2})$$

ενός ιδανικού ρευστού, του οποίου το τετραδιάνυσμα της ταχύτητας στις συν – κινούμενες συντεταγμένες, σύμφωνα με τη σύμβαση  $(-, +, +, +)$ , είναι:

$$u^\mu = (1, 0, 0, 0), \quad u_\mu = g_{\mu\nu} u^\nu = (-1, 0, 0, 0) \quad (\text{B.1.3})$$

καθώς και στον ακόλουθο μετρικό τανυστή, για την περίπτωση ενός ομογενούς και ισοτροπικού Σύμπαντος:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}\left\{-1, \frac{a^2(t)}{1-kr^2}, a^2(t)r^2, a^2(t)r^2 \sin^2\theta\right\} \quad (\text{B.1.4})$$

Η σχέση (B.1.1) αντιστοιχεί ουσιαστικά 4 εξισώσεις, μία για κάθε  $\nu$  (Liddle, 2015). Εκείνη που μας ενδιαφέρει όμως είναι εκείνη για  $\nu = 0$ , η οποία δίνει την εξίσωση της ενέργειας.

Άρα υπολογίζουμε :

$$\nabla^\mu T_{\mu 0} = 0 \quad (\text{B.1.5})$$

### Υπολογισμός του τανυστή $T_{\mu 0}$

Από τη σχέση (B.1.2) και για  $\nu = 0$  έχουμε:

$$T_{\mu 0} = (\rho + p)u_\mu u_0 + p g_{\mu 0} \quad (\text{B.1.6})$$

καθώς ο μετρικός τανυστής είναι διαγώνιος θα ισχύει  $g_{\mu 0} = 0$ , για  $\mu \neq 0$  και  $g_{00} = -1$

και επειδή:

$$u_0 = g_{00}u^0 = -1, \quad u_\mu = (-1, 0, 0, 0), \quad (\text{B.1.7})$$

παίρνουμε:

- Για  $\mu = 0$ :

$$T_{00} = (\rho + p)u_0u_0 + pg_{00} = (\rho + p)(-1)(-1) + p(-1) = \rho \quad (\text{B.1.8})$$

- Για  $\mu = i$  (χωρικές συνιστώσες):

$$T_{i0} = 0 \quad (\text{B.1.9})$$

Επομένως συνοψίζοντας τα παραπάνω έχουμε:

$$T_{\mu 0} = (\rho, 0, 0, 0) \quad (\text{B.1.10})$$

### Υπολογισμός της συναλλοίωτης παραγώγου $\nabla^\mu T_{\mu 0}$

Γράφοντας τη συναλλοίωτη παράγωγο χρησιμοποιώντας τα σύμβολα Christoffel  $\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha$  και για  $\nu = 0$ , προκύπτει (Liddle, 2015):

$$\nabla^\mu T_{\mu 0} = \partial^\mu T_{\mu 0} + \Gamma_{\lambda\mu}^\mu T_0^\lambda - \Gamma_{0\mu}^\lambda T_\lambda^\mu \quad (\text{B.1.11})$$

Για τον πρώτο όρο και από τη σχέση (B.1.6) έχουμε:

$$\partial^\mu T_{\mu 0} = \partial^\mu ((\rho + p)u_\mu u_0 + pg_{\mu 0}) \quad (\text{B.1.12})$$

όπου όπως είδαμε παραπάνω για  $\mu = i$  όλες οι χωρικές συνιστώσες μηδενίζονται ενώ για  $\mu = 0$ ,  $T_{00} = \rho$  επομένως:

$$\partial^0 T_{00} = \partial_t \rho = \dot{\rho} \quad (\text{B.1.13})$$

Για τον δεύτερο όρο της σχέσης (B.1.11) γνωρίζουμε ότι για τη συνιστώσα  $\nu = 0$  και ανακαλώντας ότι το  $T_\nu^\mu$  είναι διαγώνιο, επομένως μόνο για  $\lambda = 0$  το  $T_0^\lambda \neq 0$ , χρειαζόμαστε την ποσότητα  $\Gamma_{0\mu}^\mu$ . Τα σχετικά σύμβολα Christoffel είναι:

$$\Gamma_{00}^0 = 0, \quad \Gamma_{01}^1 = \Gamma_{02}^2 = \Gamma_{03}^3 = \frac{\dot{a}}{a} \quad (\text{B.1.14})$$

Επομένως:

$$\Gamma_{0\mu}^\mu = \Gamma_{00}^0 + \Gamma_{0i}^i \quad \mu \in i = 1, 2, 3 \quad (\text{B.1.15})$$

και

$$\Gamma_{0\mu}^\mu = \Gamma_{00}^0 + \Gamma_{01}^1 + \Gamma_{02}^2 + \Gamma_{03}^3 = 3 \frac{\dot{a}}{a} \quad (\text{B.1.16})$$

επομένως από τον δεύτερο όρο τελικά θα πάρουμε:

$$\Gamma_{0\mu}^\mu T_0^0 = 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho \quad (\text{B.1.17})$$

Για τον τρίτο όρο της σχέσης (B.1.11),  $-\Gamma_{0\mu}^\lambda T_\lambda^\mu$ :

Οι μόνοι μη μηδενικοί όροι θα προκύψουν για  $\mu = \lambda = i$  (χωρικοί δείκτες). Από τη σχέση (B. 1.2) του ταυυστή ενέργειας – ορμής για τις χωρικές συνιστώσες  $i, j$  έχουμε:

$$T_{ij} = (\rho + p)u_i u_j + p g_{ij} \quad (\text{B. 1.18})$$

όπου από τη σχέση (B. 1.3) ισχύει ότι  $u_i = 0$ , επομένως:

$$T_{ij} = p g_{ij} \quad (\text{B. 1.19})$$

που σημαίνει ότι:

- για  $i \neq j$   $T_{ij} = 0$
  - για  $i = j$   $T_{ii} = p$
- (B. 1.20)

δηλαδή κάθε χωρική διεύθυνση έχει την ίδια πίεση (ισοτροπία)

Επομένως ο τρίτος όρος δίνει:

$$-\Gamma_{0\mu}^{\lambda} T_{\lambda}^{\mu} = -\sum_{i=1}^3 \Gamma_{0i}^i p = -3 \frac{\dot{a}}{a} p \quad (\text{B. 1.21})$$

Άρα η σχέση (B. 1.11) μέσω των σχέσεων (B. 1.13), (B. 1.17) και (B. 1.21) γίνεται:

$$\nabla^{\mu} T_{\mu 0} = \dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho - 3 \frac{\dot{a}}{a} p \quad (\text{B. 1.22})$$

και μέσω της (B. 1.5), έχουμε:

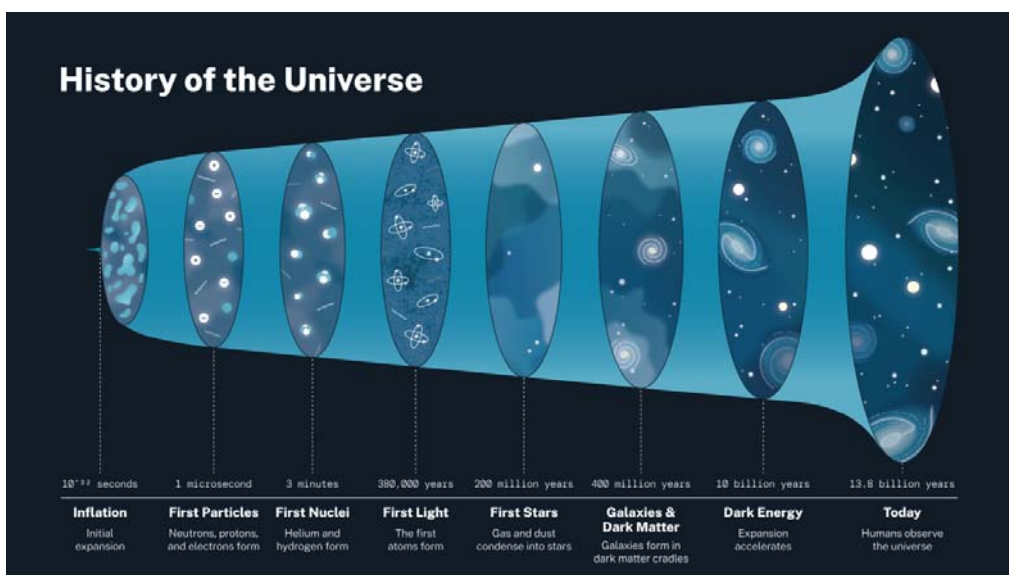
$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho - 3 \frac{\dot{a}}{a} p = 0 \quad (\text{B. 1.23})$$

με τελική μορφή τη γνωστή εξίσωση ρευστού:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho + p) = 0 \quad (\text{B. 1.24})$$

## Η ιστορία του Σύμπαντος

Η ιστορία του Σύμπαντος αποτελεί ένα από τα πιο συναρπαστικά κεφάλαια της σύγχρονης επιστήμης. Με βάση το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Πρότυπο, μέσα σε περίπου 13,8 δισεκατομμύρια χρόνια, το Σύμπαν εξελίχθηκε από μια ακραία θερμή και πυκνή κατάσταση σε μια απέραντη κοσμική δομή γεμάτη γαλαξίες, άστρα, πλανήτες και τελικά ζωή. Η αφήγηση αυτή μπορεί να χωριστεί σε διακριτές χρονικές περιόδους, όπως απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα, καθεμία από τις οποίες έπαιξε κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του σημερινού κοσμικού τοπίου (Ryden, 2017; Weinberg, 2008; wikipedia).



**Εικόνα Γ.1:** Η ιστορία του Σύμπαντος σε μία χρονογραμμή: Από τη στιγμή της αρχικής πληθωριστικής επέκτασης, τη δημιουργία των πρώτων σωματιδίων και πυρήνων, το σχηματισμό των πρώτων ατόμων και άστρων, μέχρι την ανάπτυξη των γαλαξιών και την επιτάχυνση της διαστολής υπό την επίδραση της σκοτεινής ενέργειας, φτάνοντας στη σημερινή παρατήρηση του σύμπαντος από τον άνθρωπο. Credit: NASA, December 20, 2022.

### Μεγάλη Έκρηξη και πρώιμη ιστορία (0 – $10^{-43}$ s)

Στην πρώτη απειροελάχιστη στιγμή μετά τη γέννηση του Σύμπαντος, κυριαρχούσαν κβαντικές διακυμάνσεις. Η βαρύτητα δεν είχε ακόμη διαχωριστεί από τις υπόλοιπες θεμελιώδεις δυνάμεις, και η κλασική φυσική δεν μπορεί να περιγράψει επαρκώς τι συνέβη. Πρόκειται για το πιο μυστηριώδες κομμάτι της κοσμολογικής ιστορίας. Η χρονική στιγμή  $10^{-43}$  λέγεται χρονική στιγμή Planck και σηματοδοτεί την αρχή της κλασικής κοσμολογίας.

### **Πληθωρισμός ( $10^{-36} - 10^{-32}$ s)**

Σε αυτήν την περίοδο, οι θεμελιώδεις δυνάμεις άρχισαν να διαχωρίζονται. Το Σύμπαν διαστελλόταν και ψυχόταν γρήγορα, επιτρέποντας τη σταδιακή εμφάνιση των πρώτων σωματιδίων. Παράλληλα, η ταχεία κοσμική πληθωριστική διαστολή μεγέθυνε τον χώρο εκθετικά ( $\sim 10^{26}$  φορές σε όγκο), λειαινόντας τις αρχικές ανομοιογένειες.

### **Μετά-πληθωριστική θέρμανση ( $10^{-32} - 10^{-6}$ s) (Allahverdi et al. 2010)**

Στην περίοδο αυτή, όταν ο πληθωρισμός σταματά, η ενέργεια που είχε «παγιδευτεί» στο Σύμπαν αρχίζει να απελευθερώνεται. Καθώς αυτή η ενέργεια μετατρέπεται σε σωματίδια και ακτινοβολία, η θερμοκρασία ανεβαίνει ξανά απότομα. Το Σύμπαν γεμίζει σταδιακά με κουάρκ, γλουόνια, ηλεκτρόνια και φωτόνια, σχηματίζοντας ένα εξαιρετικά θερμό και πυκνό πλάσμα.

### **Πρώιμο Σύμπαν και σωματίδια ( $10^{-6} - 3$ λεπτά)**

Καθώς η θερμοκρασία έπεφτε, άρχισαν να σχηματίζονται σταθερά σωματίδια όπως πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια. Η πυκνότητα ήταν τεράστια και οι αλληλεπιδράσεις πολύ συχνές. Προς το τέλος αυτής της περιόδου ξεκινούν οι πρώτες πυρηνικές διεργασίες.

### **Πρωτογενής Νουκλεοσύνθεση (3 – 20 λεπτά)**

Σε αυτά τα λεπτά συνέβη ένας από τους πιο κρίσιμους σταθμούς: η δημιουργία των πρώτων ελαφρών πυρήνων. Κυρίως σχηματίστηκαν υδρογόνο, ήλιο και ίχνη λιθίου. Η διαδικασία σταμάτησε όταν η θερμοκρασία έπεσε πολύ, καθιστώντας αδύνατη την περαιτέρω σύντηξη.

### **Αποδέσμευση και κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB) (380.000 χρόνια – 200 εκατομμύρια χρόνια)**

Όταν το Σύμπαν ψύχθηκε αρκετά, τα ηλεκτρόνια ενώθηκαν με τα πρωτόνια και σχημάτισαν ουδέτερα άτομα. Το φως απελευθερώθηκε για πρώτη φορά στον χώρο, δημιουργώντας αυτό που σήμερα παρατηρούμε ως κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου. Μετά από αυτό, το Σύμπαν βυθίστηκε σε μια περίοδο σκοταδιού χωρίς αστέρια.

### **Επαναϊονισμός και πρώτοι γαλαξίες (200 – 500 εκατομμύρια χρόνια)**

Οι μικρές ανομοιογένειες της πυκνότητας εξελίχθηκαν σε περιοχές βαρυτικής κατάρρευσης. Έτσι σχηματίστηκαν τα πρώτα άστρα – γιγαντιαία και βραχύβια. Η ακτινοβολία τους επαναϊονίζει το διαστρικό αέριο, τερματίζοντας τη Σκοτεινή Εποχή.

### **Γαλαξίες, σμήνη και μεγάλης κλίμακας δομή (1 δισ. χρόνια – σήμερα)**

Τα άστρα ενώνονται σε γαλαξίες, οι γαλαξίες σε σμήνη, και τα σμήνη σε υπερσμήνη, δημιουργώντας τον κοσμικό ιστό. Σταδιακά σχηματίζονται πλανητικά συστήματα και, σε ορισμένους πλανήτες, η χημική πολυπλοκότητα οδηγεί στην εμφάνιση της ζωής.

### **Σύγχρονη κοσμολογία / σκοτεινή ενέργεια**

Σήμερα, η εξέλιξη του Σύμπαντος καθορίζεται κυρίως από τη μυστηριώδη σκοτεινή ενέργεια, η οποία επιταχύνει τη διαστολή του. Το μακρινό μέλλον πιθανότατα θα οδηγήσει σε ένα ψυχρό, αραιό και σκοτεινό Σύμπαν, καθώς τα άστρα εξαντλούνται και η ενέργεια διαχέεται.

- Adams, F. C., & Laughlin, G. (1997). A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects. *Reviews of Modern Physics*, 69, 337–372. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.69.337>
- Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., ... & Zonca, A. (2020). *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
- Agulló, I., & Singh, P. (2017). *Loop quantum cosmology: A brief review*. In *Loop Quantum Gravity* (pp. 183–240). World Scientific.
- Allahverdi, R., Brandenberger, R., Cyr-Racine, F.-Y., & Mazumdar, A. (2010). *Reheating in inflationary cosmology: Theory and applications*. *arXiv preprint arXiv:1001.2600v3*. [https://arxiv.org/abs/1001.2600v3?utm\\_source=chatgpt.com](https://arxiv.org/abs/1001.2600v3?utm_source=chatgpt.com)
- Alfradique, V., Bom, C. R., Teixeira, G., & Santos, A. (2026). . *Improved constraint on the Hubble constant from dark sirens with LIGO/Virgo/KAGRA O4a* arXiv:2603.20195v1)
- Anchordoqui, L. A., Antoniadis, I., & Lüst, D. (2024). *Fuzzy dark matter and the dark dimension*. *European Physical Journal C*, 84, 273. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12622-y>
- Armendáriz-Picón, C., Mukhanov, V., & Steinhardt, P. J. (2001). Essentials of k – essence. *Physical Review D*, 63(10), 103510. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.63.103510>
- Ashtekar, A., Pawłowski, T., & Singh, P. (2006). Quantum nature of the big bang: Improved dynamics. *Physical Review D*, 74(8), 084003.
- Aubourg, É., Avila, S., Baudis, L., Beutler, F., Blomqvist, M., Bourassa, A., ... Zhao, G.-B. (2025). *Extended Dark Energy Analysis Using DESI DR2 BAO Measurements* (Phys. Rev. D 112, 083511 (2025))
- Auclair, P., Bacon, D., Baker, T., Barreiro, T., Bartolo, N., Belgacem, E., ... & Weir, D. J. (2023). *Cosmology with the Laser Interferometer Space Antenna*. *Living Reviews in Relativity*, 26(1), 5–254. <https://doi.org/10.1007/s41114-023-00045-2>
- Avila-Reese, V., Firmani, C., Hernández-Xolocotzi, L., & Vázquez, J. (1998). Halo structure and dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 297, 793–802.
- Bekenstein, J. D. (2004). Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm. *Physical Review D*, 70, 083509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.083509>

Bennett, C. L., et al. (2011). Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192(2), 18. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/18>

Bertone, G., Hooper, D., & Silk, J. (2005). Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Physics Reports*, 405(5–6), 279–390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>

BICEP/Keck Collaboration. (2021). Improved constraints on primordial gravitational waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck data. *Physical Review Letters*, 127(15), 151301.

Blum, K., et al. (2022), Snowmass2021 Cosmic Frontier White Paper arXiv:2203.07220 <https://arxiv.org/abs/2203.07220>

Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., & Rees, M. J. (1984). Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature*, 311, 517–525.

Boylan – Kolchin, M., Bullock, J. S., & Kaplinghat, M. (2011). Too big to fail? The puzzling darkness of massive Milky Way subhaloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, L40–L44. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01074.x>

Buttazzo, D., Degrassi, G., Giardino, P., Giudice, G. F., Sala, F., Salvio, A., & Strumia, A. (2013). Investigating the near-criticality of the Higgs boson. *Journal of High Energy Physics*, 2013(12), 89.

Boylan – Kolchin, M., Bullock, J. S., & Kaplinghat, M. (2012). The Milky Way’s bright satellites as an apparent failure of  $\Lambda$ CDM. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422, 1203–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20695.x>

Bullock, J. S., & Boylan – Kolchin, M. (2017). *Small-Scale Challenges to the  $\Lambda$ CDM Paradigm*. *ARA&A*, 55, 343–387.

Caldwell, R. R., Kamionkowski, M., & Weinberg, N. N. (2003). Phantom energy and cosmic doomsday. *Physical Review Letters*, 91, 071301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.071301>

Caldwell, R. R., & Kamionkowski, M. (2009). *The physics of cosmic acceleration*. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 59, 397–429.

Carr, B., Kühnel, F., & Sandstad, M. (2016, July 20). *Primordial black holes as dark matter* (arXiv:1607.06077). arXiv. <https://arxiv.org/abs/1607.06077>

Carroll, S. M. (1997). Lecture notes on general relativity. California Institute of Technology.

Carroll, S. M. (2001). The cosmological constant. *Living Reviews in Relativity*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>

Carroll, S. M. (2004). *Spacetime and geometry: An introduction to general relativity*. Addison-Wesley.

Clesse, S., & García-Bellido, J. (2017). *The clustering of massive primordial black holes as dark matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO*. *Phys. Dark Univ.*, 15, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2016.12.004>

Clowe Douglas, Maruša Bradač, Anthony H. Gonzalez, Maxim Markevitch, Scott W. Randall, Christine Jones, & Dennis Zaritsky. (2006). *A direct empirical proof of the existence of dark matter*. *The Astrophysical Journal Letters*, 648(2), L109–L113. <https://doi.org/10.1086/508162>

Cha, S., Cho, B. Y., Joo, H., Lee, W., HyeonHan, K., Scofield, Z. P., Finner, K., & Jee, M. J. (2025). *A high-caliber view of the Bullet Cluster through JWST strong and weak lensing analyses*. *The Astrophysical Journal Letters*, 987(1), L15. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/add2f0>

Coleman, S., & De Luccia, F. (1980). Gravitational effects on and of vacuum decay. *Physical Review D*, 21(12), 3305–3315.

Coles, P., & Lucchin, F. (2002). *Cosmology: The origin and evolution of cosmic structure* (2nd ed.). Wiley.

Conselice, C. J. (2016). *The evolution of galaxy structure over cosmic time*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54, 491–529. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091081915%20%80%91023417>

Creminelli, P., & Vernizzi, F. (2017). Dark energy after GW170817 and GRB170817A. *Physical Review Letters*, 119(25), 251302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.251302>

Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., & White, S. D. M. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *The Astrophysical Journal*, 292, 371–394.

De Blok, W. J. G., McGaugh, S. S., & Rubin, V. C. (2001). *High-resolution rotation curves of low surface brightness galaxies. II. Mass models*. *The Astronomical Journal*, 122(5), 2396–2427.

Del Popolo, A., & Le Delliou, M. (2021). *Review of solutions to the cusp-core problem of the  $\Lambda$ CDM model*. *Galaxies*, 9(4), 123. <https://doi.org/10.3390/galaxies9040123>

DES Collaboration. (2015). *Eight New Milky Way Companions Discovered in First-Year Dark Energy Survey Data*. *ApJ*, 807, 50.

DESI Collaboration, Aghamousa, A., et al. (2016). *The DESI experiment Part I: Science, targeting, and survey design* (arXiv:1611.00036). arXiv. <https://arxiv.org/abs/1611.00036>

DESI Collaboration, Abdul Karim, M., Aguilar, J., et al. (2025). *DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints*, *Physical Review D*, 112, 083515. DOI: 10.1103/PhysRevD.112.083515.

Diemand, J., Kuhlen, M., & Madau, P. (2007). *Formation and evolution of galaxy dark matter halos and their substructure*. *Astrophysical Journal*, 667, 859–877.

Diemand, J., Kuhlen, M., Madau, P., Zemp, M., Moore, B., Potter, D., & Stadel, J. (2008). *Clumps and streams in the local dark matter distribution*. *Nature*, 454, 735–738.

Dodelson, S., & Schmidt, F. (2020). *Modern cosmology* (2nd ed.). Academic Press.

Dolgov, A. D., & Kirilova, D. P. (1990). *Reheating after inflation*. *Soviet Journal of Nuclear Physics*, 51, 172–177.

Einasto, J. (1965). *Kinematics and dynamics of stellar systems*. *Trudy Inst. Astrofiz. Alma-Ata*, 5, 87–100.

Einstein, A. (1916). *The foundation of the general theory of relativity*. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–822.

Ettori, S., & Lombardi, M. (2003). *Gravitational lensing and X-ray emission in galaxy clusters*. *Astronomy & Astrophysics*, 398, 5–16.

European Space Agency. (n.d.). *How many stars are there in the Universe?* ESA. [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/How\\_many\\_stars\\_are\\_there\\_in\\_the\\_Universe](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/How_many_stars_are_there_in_the_Universe)

Fischer, P. (1996). *Galaxy cluster mass distribution from weak lensing*. *The Astrophysical Journal*, 460, L15–L18.

Fixsen, D. J. (2009). *The temperature of the cosmic microwave background*. *The Astrophysical Journal*, 707, 916–920.

Frieman, J. A., Turner, M. S., & Huterer, D. (2008). *Dark energy and the accelerating universe*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 46, 385–432. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145243>

Garrison-Kimmel, S., Boylan-Kolchin, M., Bullock, J. S., & Lee, K. (2017). *ELVIS: Exploring the Local Volume in Simulations*. *MNRAS*, 471, 1709–1727.

Grado, A. (2023). Einstein Telescope, the future generation of ground based gravitational wave detectors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2429(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2429/1/012041>

Graff, D. S., & Freese, K. (1995). *ApJ Letters*, 456, L79–L82.

Grøn, Ø., & Hervik, S. (2007). *Einstein's general theory of relativity: With modern applications in cosmology*. Springer. . <https://doi.org/10.1007/978-0-387-69200-5>

Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23, 347–356.

Hall, E. D. (2022). *Cosmic Explorer: A next-generation ground-based gravitational - wave observatory*. *Galaxies*, 10(4), 90. <https://doi.org/10.3390/galaxies10040090>

Halpern, P., & Tomasello, N. (2016). *Size of the observable universe*. *Advances in Astrophysics*, 1(3), 135–137. <https://doi.org/10.22606/adap.2016.13001>

Harrison, E. R. (2000). *Cosmology: The science of the universe* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Hawking, S. W., & Ellis, G. F. R. (1973). *The large scale structure of space-time*. Cambridge University Press.

Hertog, T., & Horowitz, G. T. (2004). *Towards a big crunch dual*. *Journal of High Energy Physics*, 2004(07), 073. <https://doi.org/10.1088/1126/E2%80%916708/2004/07/073>

Hobson, M. P., Efstathiou, G. P., & Lasenby, A. N. (2006). *General relativity: An introduction for physicists*. Cambridge University Press.

Hogg, D. W. (2000). *Distance measures in cosmology*. arXiv:astro-ph/9905116.

Hogg, D. W., Eisenstein, D. J., Blanton, M. R., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Gunn, J. E., & Schneider, D. P. (2005). Cosmic homogeneity demonstrated with luminous red galaxies. *The Astrophysical Journal*, 624(1), 54–58. <https://doi.org/10.1086/429084>

Inomata, K., Kawasaki, M., Mukaida, K., & Tada, Y. (2020). Gravitational waves induced by primordial black hole formation. *Physical Review D*, 101, 043532. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.043532>

Jaber, M., Peper, M., Hellwing, W. A., Aragón-Calvo, M. A., & Valenzuela, O. (2024). *Hierarchical structure of the cosmic web and galaxy properties*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 527(2), 4087–4099. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3347>

- Kamionkowski, M., & Kovetz, E. D. (2016). The quest for B modes from inflationary gravitational waves. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54, 227–269.
- Kazantzidis, S., Magorrian, J., & Moore, B. (2004). *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 352, 1082–1100.
- Kim, S. Y., Peter, A. H. G., & Hargis, J. R. (2018). *Physical Review Letters*, 121(21), 211302.
- Klypin, A., Kravtsov, A., Valenzuela, O., & Prada, F. (1999). *Where Are the Missing Galactic Satellites?* *ApJ*, 522, 82–92.
- Lahav, O., & Liddle, A. R. (2019). The cosmological parameters 2019. arXiv:1912.03637. <https://arxiv.org/abs/1912.03637>
- Larson, D., et al. (2011). *Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Power spectra and WMAP-derived parameters. The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192(2), 16. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/16>
- Laureijs, R., et al. (2011). *Euclid definition study report*. European Space Agency. <https://sci.esa.int/web/euclid>
- Lehners, J.-L. (2008). Ekpyrotic and cyclic cosmology. *Physics Reports*, 465(6), 223–263.
- Liddle, A. R. (2015). *An introduction to modern cosmology* (3rd ed.). Wiley.
- LSST Science Collaboration, Abell, P. A., et al. (2009). *LSST Science Book (Version 2.0)* (arXiv:0912.0201). arXiv. <https://arxiv.org/abs/0912.0201>
- Melchiorri, A., et al. (2007). *Cosmological observations and theory*. Springer.
- Milgrom, M. (1983). *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. The Astrophysical Journal*, 270(365–370). <https://doi.org/10.1086/161130>
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman.
- Mondino, C., [et al.]. (2024). [Title of the article]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 531, 632–648.
- Moore, B., Ghigna, S., Governato, F., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J., & Tozzi, P. (1999). *Dark Matter Substructure within Galactic Halos. ApJ*, 524, L19–L22.
- Munafo, R. (n.d.). *Notable properties of specific numbers*. Retrieved Month Day, Year, from <https://www.mrob.com/pub/math/numbers23.html>

Mukhanov, V. (2005). *Physical foundations of cosmology*. Cambridge University Press.

Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. (1996). The structure of cold dark matter halos. *The Astrophysical Journal*, 462, 563–575.

Navarro, J. F., Ludlow, A., Springel, V., Wang, J., Vogelsberger, M., White, S. D. M., Helmi, A. (2010). , 402(1), 21–34.

Oort, J. H. (1932). The distribution of stars in the Milky Way. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 6, 249–285.

Oort, J. H. (1940). The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane. *The Astrophysical Journal*, 91, 273–278.

Peacock, J. A. (1999). *Cosmological physics*. Cambridge University Press.

Peccei, R. D., & Quinn, H. R. (1977). CP conservation in the presence of instantons. *Physical Review Letters*, 38(25), 1440–1443. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.1440>

Peebles, P. J. E., & Ratra, B. (2003). The cosmological constant and dark energy. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 559–606. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>

Perlmutter, S., et al. (1999). Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high – redshift supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2), 565–586.

Pettini, M. (n.d.). *Introduction to cosmology*.

Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartolo, N., Basak, S., Battye, R., Benabed, K., ... & Zonca, A. (2018). *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters* (arXiv:1807.06209)

Rasia, E., Tripodi, R., Borgani, S., Biffi, V., Avestruz, C., Cui, W., De Petris, M., Dolag, K., Eckert, D., Ettori, S., & Gaspari, M. (2025). *The Three Hundred Project: Modeling baryon and hot-gas fraction evolution in simulated clusters* (arXiv:2505.21624). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.21624>

Riess, A. G., et al. (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009–1038. <https://doi.org/10.1086/300499>

Retana-Montenegro, E., Van Hese, E., Gentile, G., Baes, M., & Frutos-Alfaro, F. (2012). *Analytical properties of Einasto dark matter haloes*. *Astronomy & Astrophysics*, 540, A70. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118543>

Roberts, M. S. (1966). *A high-resolution 21-cm study of the Andromeda Galaxy (M31)*. *The Astrophysical Journal*, 144, 639–657.

Rubin, V. C., & Ford, W. K., Jr. (1970). Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions. *The Astrophysical Journal*, 159, 379–403.

Ryden, B. (2006). *Introduction to cosmology*. Addison-Wesley.

Ryden, B. (2017). *Introduction to cosmology* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Sales, L. V., Robles, V. H., Bullock, J. S., Boylan-Kolchin, M., Santos-Santos, I., & Escala, A. (2022). *The impact of baryonic physics on small-scale challenges to  $\Lambda$ CDM*. *Nature Astronomy*, 6, 897–907. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01745-4>

Scolnic, D. M., et al. (2025). Measurements of the Hubble constant. (preprint).

Scognamiglio, D., Leroy, G., Harvey, D., Massey, R., Rhodes, J., Akins, H. B., Brinch, M., Berman, E., Casey, C. M., Drakos, N. E., Faisst, A. L., Franco, M., Fung, L. W. H., Gozaliasl, G., He, Q., Hatamnia, H., Huff, E., Hogg, N. B., Ilbert, O., . . . Weaver, J. R. (2026). An ultra-high-resolution map of (dark) matter. *Nature Astronomy*. <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02763-9>

Sotiriou, T. P., & Faraoni, V. (2010).  *$f(R)$  theories of gravity*. *Reviews of Modern Physics*, 82(1), 451–497. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.451>

Spergel, D. N., et al. (2003). First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe observations: Determination of cosmological parameters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 148(1), 175–194. <https://doi.org/10.1086/377226>

Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., Frenk, C. S., Yoshida, N., Gao, L., Navarro, J., Thacker, R., Croton, D., Helly, J., Peacock, J. A., Cole, S., Thomas, P., Couchman, H., Evrard, A., Colberg, J., & Pearce, F. (2005). *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*. **Nature**, 435(7042), 629–636. <https://doi.org/10.1038/nature03597>

Steinhardt, P. J., & Turok, N. (2002). A cyclic model of the universe. *Science*, 296(5572), 1436–1439.

Tisserand, P., et al. (2007). Limits on MACHO dark matter from microlensing surveys. *Astronomy & Astrophysics*, 469(2), 387–404.

Van de Hulst, H. C., Muller, C. A., & Oort, J. H. (1954). *The spiral structure of the outer part of the Galactic System, determined from observations of the 21-cm line of hydrogen*. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 12, 117–149.

Van de Hulst, H. C., Muller, C. A., & Oort, J. H. (1957). *Radio observations of the spiral structure of the Andromeda Nebula (M31) from the 21-cm line of hydrogen*. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 14, 1–38.

Verde, Treu & Riess. (2019). Cosmological constraints from strong lenses. *ApJ*.

Weinberg, S. (2008). *Cosmology*. Oxford University Press.

Weltman, A., Bull, P., Camera, S., Kelley, K., Padmanabhan, H., Pritchard, J., ... & Gaensler, B. M. (2018). *Fundamental Physics with the Square Kilometre Array*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1810.02680>

Wilkinson, D. T., & Wilson, R. W., & Penzias, A. A. (1967). Measurement of continuum radiation at 4080 Mc/s. *Science*, 156, 1100–1101.

York, D. G., et al. (2000). *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*. *AJ*, 120, 1579–1587.

Zlatev, I., Wang, L., & Steinhardt, P. J. (1999). Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant. *Physical Review Letters*, 82, 896–899.

Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6, 110–127.